

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS DAS ÁGUAS	
---	---	---

Trabalho Técnico LaCiA No. 03.

MAPEAMENTO DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

Organizador:

Leonardo Romero Monteiro

Organizador: Monteiro, Leonardo Romero Mapeamento de Perigo de Inundação - Joinville: UDESC/CCT/LaCiA, 2025, 222 páginas. Palavras Chave: Inundação, Perigo de Inundação, Modelagem Hidrológica, Modelagem Hidrodinâmica

Edição brasileira 2026

SUMÁRIO

Sumário	ii
1 INTRODUÇÃO	1
LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
1.1 Objetivos	1
1.2 Estrutura do Texto e do Curso	2
2 BACIA HIDROGRÁFICA - CONCEITOS GERAIS, DEFINIÇÃO E DELIMITAÇÃO	4
LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO	
2.1 Características físicas de uma bacia hidrográfica	6
2.1.1 Área e Perímetro da bacia	7
2.1.2 Comprimento do rio principal	7
2.1.3 Declividade média do rio principal e da bacia hidrográfica	7
2.1.4 Cobertura vegetal, uso e tipos de solo	8
2.1.5 Forma da bacia	8
2.1.6 Índices de drenagem	9
2.2 Área Inundável e Sub-bacias de Contribuição	10
2.3 APLICAÇÃO:	
Delimitação de bacias hidrográficas	
Estudo de caso: Bacia do Rio Negrinho em Rio Negrinho-SC	11
2.3.1 Obtenção de dados	11
2.3.2 Etapas para a delimitação automática da bacia hidrográfica	12
2.3.3 Características físicas da bacia hidrográfica	31
2.3.4 Recorte do MDT da região de interesse	41
3 MODELAGEM HIDROLÓGICA	44
LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO	
3.1 Classificação	45
3.2 Modelo Chuva-Vazão	46
3.2.1 Tempo de concentração	49

3.2.2	Precipitação	51
3.2.3	Perdas de precipitação	57
3.2.4	Transformada em escoamento superficial	61
3.2.5	Escoamento de base	63
3.2.6	Escoamento em rios	63
3.3	Calibração	63
3.3.1	Otimização de Parâmetros	64
3.3.2	Função Objetivo	65
3.4	Validação	66
3.5	Comentários	66
3.6	APLICAÇÃO:	
	Modelagem Hidrológica com HEC-HMS	
	Estudo de caso:	
	MPI para a área urbana de Rio Negrinho-SC	68
3.6.1	Introdução	68
3.6.2	Calibração e Validação	68
3.6.2.1	Método 1 - Acesso direto ao site Hidroweb (procedimento não utilizado no presente documento)	70
3.6.2.2	Método 2 - Acesso pelo QGIS (procedimento utilizado no presente documento)	72
3.6.2.3	Dados de calibração e validação	73
3.6.3	HEC-HMS	73
3.6.3.1	Procedimentos iniciais	74
3.6.3.2	Novo projeto	75
3.6.3.3	Criação de bacia	76
3.6.3.4	Definição dos parâmetros de entrada do modelo	78
3.6.4	Calibração do modelo hidrológico	92
3.6.4.1	Inserção dos hietograma observado	92
3.6.4.2	Inserção do hidrograma de saída observado	94
3.6.4.3	Criação do Controle de especificações	95
3.6.4.4	Rodando a simulação	96
3.6.4.5	Calibração por Otimização	99
3.6.4.6	Resultados da otimização da calibração	101
3.6.5	Validação do modelo hidrológico	103
3.6.5.1	Inserção de dados de precipitação	103
3.6.5.2	Inserção de dados de vazão	104
3.6.5.3	Simulação da validação	106
3.6.6	Criação do Hidrograma de projeto	108
3.6.6.1	Equação IDF	108
3.6.6.2	Tempo de Concentração do Rio Principal	108

3.6.6.3	Método 1 - Serviço Geológico Brasileiro e Planilha Eletrônica	110
3.6.6.4	Método 2 - HidroChuSC	112
3.6.6.5	Chuva de Projeto e Duração Crítica	114
3.6.6.6	Aplicação no HidroChuSC	115
3.6.6.7	Aplicação no HEC-HMS	117

4 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA 121

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

JOÃO LUIZ DA ROCHA BORIN

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

4.1	Classificação	121
4.2	Escoamento Permanente	122
4.3	Escoamento Não Permanente	123
4.4	Condições iniciais e de contorno e estabilidade	124
4.5	Métodos Numéricos	124
4.5.1	Discretização Espacial	124
4.5.2	Discretização Temporal	125
4.6	Validação	127
4.7	Comentários	128
4.8	Exemplo prático	130
4.8.1	Preparação do computador	131
4.8.2	Primeiros passos no programa	131
4.8.3	Incorporação do MDT	132
4.8.4	Modelagem 2D	136
4.8.5	Processamento e validação do modelo hidrodinâmico	154
4.8.5.1	Validação do modelo	162
4.8.6	Obtenção das informações para o MPI	165
4.8.6.1	Tempos de Retornos	165
4.8.7	Analisando os resultados	166

5 MAPA DE PERIGO DE INUNDAÇÃO 171

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

5.1	Mapa de Perigo de Inundação	171
5.1.1	Índice e Nível de Perigo	172
5.1.2	Criando o Mapa de Perigo	173
5.2	Exemplo prático	175

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	180
	FRANCIELE MARIA VANELLI	
	LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
	APÊNDICE A – NOÇÕES DE MODELAGEM	184
	LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
A.1	Tipos	184
A.2	CrITÉrios para a seleção de um modelo	186
A.3	Tipos de dados na modelagem	187
A.4	Calibração	187
A.5	Verificação e Validação	188
A.6	Comentários	188
	APÊNDICE B – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)	189
	LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
	ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO	
B.1	OpenTopography	189
B.2	Serviço Geológico Brasileiro - SGB	192
B.3	SRTM	193
B.4	Outros	194
	APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÕES DE HUFF	195
	LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
	APÊNDICE D – MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D	199
	LEONARDO ROMERO MONTEIRO	
	GIULIANA CRISTOFOLINI DOS SANTOS	
	JOÃO LUIZ DA ROCHA BORIN	
D.0.1	Modelagem 1D	199
	Referências Bibliográficas	212
	Referências	212

1 INTRODUÇÃO

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

O Laboratório de Ciências das Águas (LaCiA) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) vem, por meio desta apostila, dar continuidade às diversas palestras e cursos oferecidos para divulgar e discutir a prevenção de desastres associados a fenômenos naturais. Agora, com o formato de Minicurso de Ensino à Distância, esta apostila servirá como um guia para o Mapeamento de Perigo de Inundação (MPI). Para a produção deste material, teve-se o apoio de bolsistas de extensão de projetos e programas vinculados ao laboratório, além de voluntários desde 2020. A seguir são apresentados os antigos bolsistas que colaboraram com esta publicação.

Capítulo 2: Luiza Voit da Fonseca; Giuliana Cristofolini dos Santos; Hugo Göbel; Bruna Fernanda Soares.

Capítulo 3: Giuliana Cristofolini dos Santos; Hugo Göbel.

Capítulo 4: Giuliana Cristofolini dos Santos.

Os autores que estão presentes no capítulo são aqueles que estão efetivamente desenvolvendo o material em sua versão atual.

Conforme a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Lei 12.608/12) [[Brasil, 2012](#)], os municípios brasileiros devem mapear seus riscos de desastres. Como o risco é função do perigo, da vulnerabilidade e da exposição, a presente apostila auxilia os agentes que trabalham para o município a produzir o mapa de perigo, que é um requisito parcial do mapa de risco.

Nesta apostila, são repassados conhecimentos técnico-científicos sobre inundações, desde os processos básicos, como o transporte da água, até produtos completos, como o MPI. Para realizar a modelagem hidrológica é utilizado o programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) [[USACE-HEC, 2021](#)] e para realizar a simulação hidrodinâmica é utilizado o programa HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) [[USACE-HEC, 2023](#)]. Estes programas não são os únicos adequados para a criação de MPI, porém, por efeitos práticos, são os utilizados nesta apostila. A utilização dos programas será realizada por Windows, entretanto, para usuários mais experientes, é possível utilizar os programas também em plataforma Linux.

1.1 OBJETIVOS

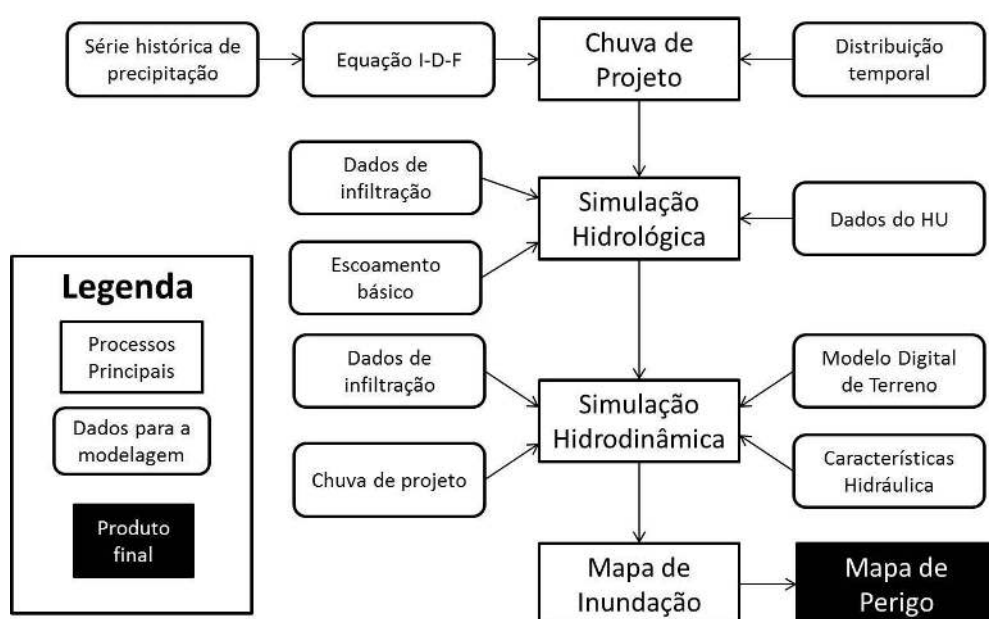
Esta apostila tem como objetivo instruir sobre os temas relacionados ao MPI, servindo como instrumento para a aplicação do minicurso de MPI ministrado pelo LaCiA/UDESC.

Esta apostila repassa apenas conhecimento técnico-científico do desenvolvimento físico do fenômeno de inundação, enquanto os temas voltados a aspectos econômicos e sociais da população atingida, também muito importantes, não são desenvolvidos.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO E DO CURSO

A metodologia seguida para o MPI é a proposta por [Monteiro and Kobiyama \[2013\]](#) (Figura 1.1), e assim, esta apostila é organizada com base neste artigo. Esta apostila é dividida em seis capítulos, em que o primeiro refere-se a esta introdução.

Figura 1.1 – Fluxograma do MPI.



Fonte: [Monteiro and Kobiyama \[2013\]](#).

O capítulo 2, sobre bacias hidrográficas, apresenta os conceitos básicos sobre o tema, com ênfase em itens importantes para as simulações hidrológica e hidrodinâmica. Neste capítulo, também está contido um exemplo prático que utiliza ferramentas de geoprocessamento para delimitar e caracterizar uma área de estudo.

No capítulo 3, sobre modelagem hidrológica, discutem-se e apresentam-se os conceitos dos modelos de precipitação total, precipitação efetiva, transformação da precipitação em escoamento superficial e, por fim, escoamento de base, que compõem um modelo chuva-vazão. Fenômenos que possuem importância em escala de tempo maior, como a evapotranspiração (ou apenas evaporação [[Savenije, 2004](#)]) não são apresentados.

No capítulo 4, são apresentados conceitos sobre simulação hidrodinâmica. A simulação bidimensional é discutida, com enfoque nas Equações de Águas Rasas utilizadas para simular escoamentos não permanentes.

No capítulo 5 é discutido o mapeamento de inundação e o MPI, enfatizando a importância do Índice de Perigo. Por fim, no último capítulo (capítulo 6), é apresentado um texto informativo sobre o mapeamento de vulnerabilidade e de risco.

No final dos capítulos 2, 3, 4 e 5, uma seção é desenvolvida passo a passo, com a aplicação do tema do capítulo para efetivar o mapeamento da área de perigo de inundação, na prática.

2 BACIA HIDROGRÁFICA - CONCEITOS GERAIS, DEFINIÇÃO E DELIMITAÇÃO

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

Objetivo do capítulo: apresentar conceitos básicos e aplicações voltadas à unidade de análise hidrológica, isto é, a bacia hidrográfica, para subsidiar o MPI.

O ciclo hidrológico refere-se à circulação contínua da água na terra nas diferentes fases: sólida, líquida e de vapor, ligando a atmosfera, a terra e os oceanos. Este ciclo é estudado a partir da hidrologia, que pode ser definida como a ciência que trata do espaço, do tempo e das características de frequência da ocorrência, distribuição, movimento e armazenamento da quantidade e qualidade das águas da Terra.

A partir do ponto de vista das áreas da hidrologia, o ciclo hidrológico é estudado na fase terrestre a partir da bacia hidrográfica, definida como uma área na superfície terrestre sobre a qual o escoamento superficial em qualquer ponto converge para uma única saída, chamada de seção transversal de referência ou exutório. Um dos principais interesses em estudar a bacia hidrográfica é que suas características constituem um sistema natural de transformação de chuva em vazão, influenciando diretamente a dinâmica hídrica local [Singh, 2017].

A escala espacial muitas vezes é utilizada para definir bacias em macrobacias e microbacias. Entende-se por macrobacia a maior bacia relacionada a determinado local. Por exemplo, a bacia do rio Guaporé, no estado de Rondônia, faz parte da macrobacia do Rio Amazonas. Vários conceitos são aplicados na definição de microbacias, podendo ser adotados critérios como unidades de medida hidrológicas e ecológicas. Para Faustino [1996], uma microbacia possui toda a sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub-bacia sendo sua área inferior a 100 km^2 , e várias microbacias formam uma sub-bacia.

Outro conceito importante atribuído a microbacias é o ecológico, que considera a menor unidade do ecossistema onde se pode observar a delicada relação de interdependência entre os fatores bióticos e abióticos, sendo que perturbações podem comprometer a dinâmica de seu funcionamento. Esse conceito visa a identificação e o monitoramento, de forma orientada, dos impactos ambientais [Leonardo, 2003].

Uma bacia hidrográfica também pode ser dividida em sub-bacias e cada uma das sub-bacias pode ser considerada uma bacia hidrográfica, possuindo um vínculo com a geometria fractal pelas suas autossemelhanças em diferentes escalas [Caballero et al., 2020]. Para definir uma

bacia hidrográfica, normalmente, é necessário considerar os cursos de água, o exutório e as informações topográficas.

É importante diferenciar o conceito de região hidrográfica, que é o espaço territorial compreendido por uma ou mais bacias ou sub-bacias hidrográficas imediatas, com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, visando orientar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos [Marcuzzo et al., 2017].

As regiões hidrográficas, que podem ser denominadas unicamente de "bacias", diferem das bacias hidrográficas, pois não precisam possuir apenas um exutório. O Brasil possui quatro principais regiões hidrográficas: a bacia Amazônica, a bacia do rio São Francisco, a bacia do Tocantins-Araguaia e a bacia do rio da Prata, formada pelas bacias do Paraná, do Paraguai e do Uruguai. Essas quatro bacias reunidas cobrem aproximadamente 73,1% do território nacional. Ao todo, o Brasil possui 12 bacias hidrográficas, que estão distribuídas por todo o território brasileiro, conforme (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Regiões hidrográficas do Brasil.

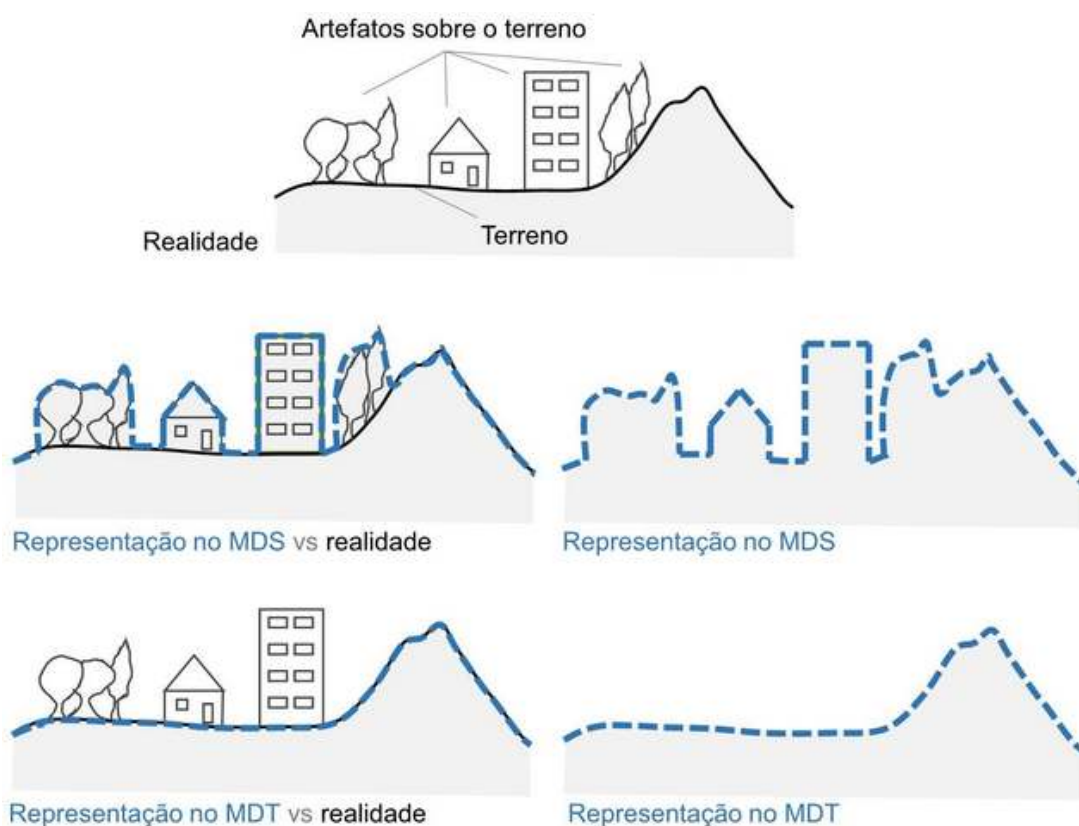


Fonte: Próprios autores.

As informações de relevo, como curvas de nível e Modelos Digitais de Terreno (MDTs), são dados de altitude que nos permitem identificar diferentes características, como o divisor de águas superficiais e a direção para onde escoar a água, os quais auxiliam na delimitação da bacia hidrográfica. Para este processo de delimitação, a definição de uma bacia hidrográfica pode ser feita de forma manual, sobre mapas, ou automática, com o auxílio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Em alguns países, como o Brasil, o MDT pode ser considerado como um sinônimo de Modelo Digital de Elevação (MDE), porém, em outros países, como os Estados Unidos, o MDT é um tipo de MDE. Além dessas representações da altimetria do terreno, existe também o Modelo Digital de Superfície (MDS), onde a principal diferença entre os demais é o fato de o MDT considerar a altitude em relação ao solo, enquanto o MDS considera as edificações, árvores ou qualquer objeto que provoque um aumento do nível da superfície para determinar a altitude (Figura 2.2). Para uma compreensão mais aprofundada do tema e do geoprocessamento de modelos digitais de elevação, recomenda-se a leitura do livro "Modelos Digitais de Elevação para Estudos Ambientais" de Adriano Rolim da Paz [Paz, 2024].

Figura 2.2 – Esquema ilustrativo do que representa um MDS e do que representa um MDT.



Fonte: Paz [2024].

2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA

As características físicas de uma bacia hidrográfica incluem um importante grupo de fatores que influenciam o escoamento superficial e as propriedades de uma bacia. As principais características de uma bacia hidrográfica no estudo da hidrologia superficial são a área, o comprimento do rio principal, a declividade do rio e da bacia, e a cobertura do solo. Diversos parâmetros im-

portantes para a hidrologia, como o tempo de concentração, podem ser obtidos a partir dessas características básicas.

2.1.1 Área e Perímetro da bacia

A área de drenagem constitui uma das feições mais importantes de uma bacia hidrográfica, pois fornece um fator de escala, importante para muitas outras características relacionadas à hidrologia, sendo uma variável fundamental para definir o potencial hídrico. Esta característica é **definida pela superfície em projeção horizontal e delimitada pelo divisor topográfico**, mediante ferramentas manuais ou digitais. O divisor topográfico é definido pelo divisor de águas (normalmente encontrado no topo de morros e montanhas) e o exutório. Como o exutório é definido pelo estudo de interesse, poderíamos obter infinitas bacias hidrográficas em um mesmo rio.

O perímetro da bacia é o comprimento da linha imaginária ao longo do seu divisor de águas [Tonello, 2005]. Esse comprimento pode ser importante para o cálculo do coeficiente de compactidade ou de outros índices que caracterizam as bacias hidrográficas.

2.1.2 Comprimento do rio principal

O rio principal é definido como aquele que drena a maior área no interior da bacia hidrográfica. Este pode ser determinado a partir do perfil longitudinal do curso d'água medindo-se o comprimento do trecho entre o ponto de interesse ou exutório e a nascente mais distante a este ponto [Tucci, 2004]. Este comprimento está diretamente relacionado com o tempo que a água demora para escoar superficialmente ao longo do sistema, que, por sua vez, também depende de outros fatores. Rios com menor declividade tendem a possuir maior comprimento, pois costumam ter mais meandros, enquanto rios com maior declividade, como os montanhosos, tendem a ter menos meandros e menor comprimento.

2.1.3 Declividade média do rio principal e da bacia hidrográfica

A declividade de uma bacia hidrográfica tem relação importante com vários processos hidrológicos, tais como a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo, entre outros. É, além disso, um dos fatores principais que regulam o tempo de duração do escoamento superficial e o de concentração da água precipitada nos leitos dos cursos d'água. A **declividade média de um rio** é a relação entre a diferença de cotas e o comprimento do rio, como

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}, \quad (2.1)$$

em que S é a declividade média do rio (m/m), H_{max} é a cota máxima (m), H_{min} é a cota mínima (m) e L é o comprimento do rio (m).

Para o cálculo da declividade média da bacia, pode-se subdividir a bacia em faixas de altitude e ponderar a declividade individual de cada faixa com a área. Métodos numéricos a partir de dados matriciais são muito utilizados ao calcular a declividade individual de cada célula e a declividade da bacia é a média destas células.

Portanto, temos que a **declividade da bacia** é usualmente utilizada para determinar a velocidade do escoamento superficial antes deste alcançar o rio e a **declividade do rio principal** consiste em representar a velocidade do escoamento superficial assim que este atinge o rio.

2.1.4 Cobertura vegetal, uso e tipos de solo

Formada ao longo de milhões de anos de processos geomorfológicos e atualmente sendo drasticamente alterada pelas atividades antrópicas, a topografia desempenha um papel fundamental no movimento da água nas bacias hidrográficas. A topografia também é um dos fatores determinantes no tipo de vegetação que pode se adaptar ao local. Como exemplo, temos que, em bacias íngremes, existe mais transporte de sedimentos, fazendo com que os solos sejam mais facilmente carregados.

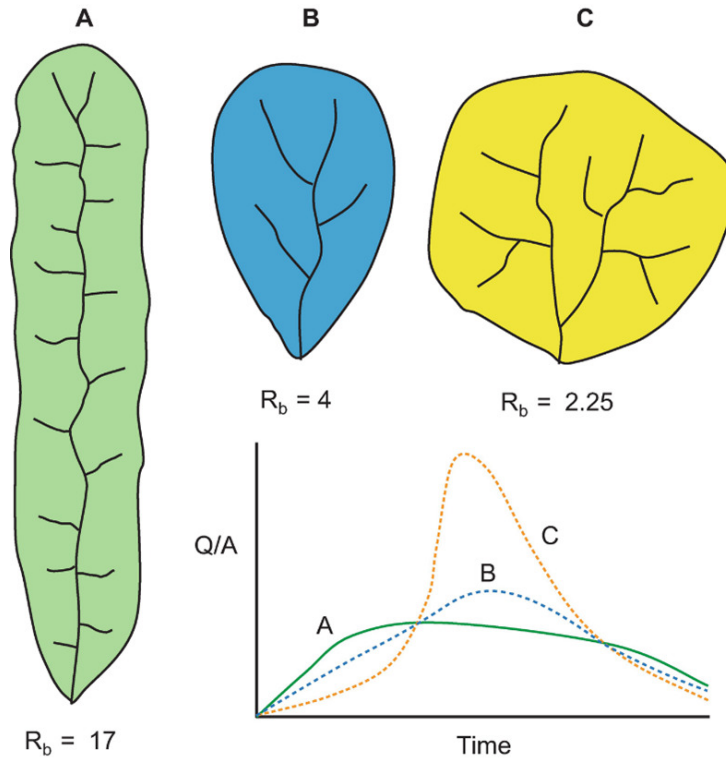
O processo de infiltração em uma bacia hidrográfica depende fundamentalmente do tipo de solo, da sua cobertura vegetal ou do seu uso e da sua umidade. O arranjo das partículas sólidas e sua graduação granulométrica determinam o espaço disponível para recepção de água, bem como a sua facilidade de movimento no solo [Paiva and Paiva, 2001]. Por exemplo, solos arenosos e profundos levam à redução expressiva do escoamento superficial, solos argilosos e rasos levam a uma redução menor do escoamento superficial e solos impermeabilizados praticamente não reduzem o escoamento superficial.

Diversos são os métodos para quantificar a relação entre a infiltração e interceptação da água, dependendo do tipo de solo e do seu uso. O Método *Soil Conservation Service - Curve Number* (SCS-CN) [Cronshey, 1986] é um dos mais utilizados e será apresentado com mais detalhes no Capítulo 3 de Modelagem Hidrológica.

2.1.5 Forma da bacia

A geometria da bacia é uma característica importante entre os fatores que influenciam a resposta hidrológica da bacia hidrográfica (Figura 2.3). Grande parte disso está relacionada ao tempo que as partículas de água levam para chegar ao exutório. Existem diversos métodos para quantificar a forma da bacia, a partir de seu grau de alongamento ou compacidade [Christofolletti, 1980]. O formato da bacia hidrográfica contribui para a velocidade com que a água precipitada chega ao curso hídrico, e o seu tamanho determina a quantidade de escoamento gerada pela bacia hidrográfica.

Figura 2.3 – Resposta hidrológica de uma bacia a partir da geometria.



Fonte: [Alsharhan and Rizk \[2020\]](#)

A avaliação da forma de uma bacia pode ser efetuada a partir do cálculo de índices que representam relações com formas geométricas conhecidas. Entre os parâmetros mais utilizados para medir a forma de uma bacia hidrográfica se encontram o Índice de Gravelius ou Coeficiente de Compacidade

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}, \quad (2.2)$$

em que K_c é o Índice de Compacidade ou de Gravelius que é a relação entre o perímetro da bacia P e o perímetro de uma bacia, assumindo-se um formato circular, com a mesma área A . Índices iguais a 1 representam bacias circulares e índices maiores do que 3 representam bacias alongadas. Valores menores de K_c indicam maior potencialidade de produção de picos de enchente.

2.1.6 Índices de drenagem

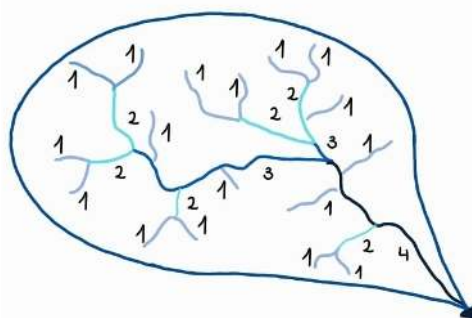
Em muitos casos, a bacia hidrográfica também é descrita a partir das características de sua rede de drenagem, que é outro fator que influencia a geração de cheias. Um dos índices é a **densidade de drenagem** definida como a soma dos comprimentos de todos os cursos de água divididos pela área da bacia

$$Dd = \frac{\sum L}{A}, \quad (2.3)$$

em que Dd é a densidade de drenagem, L é o comprimento de cada trecho de rio e A é a área da bacia.

Outro índice utilizado é o ordenamento dos cursos de água da bacia hidrográfica. Existem dois principais métodos para classificar a rede de drenagem, o primeiro é o método de hierarquização desenvolvido por Horton [1975], e o segundo é o método de Strahler [1957] (Figura 2.4), que é uma modificação do método de Horton. Atualmente, o método Strahler é o mais utilizado.

Figura 2.4 – Ordem de cursos de água segundo Strahler.



Fonte: Próprios autores.

O método de Strahler define que os cursos d'água sem tributários são de primeira ordem, sendo as nascentes do rio principal ou afluentes; os cursos de segunda ordem são aqueles que se originam da confluência de dois cursos de primeira ordem; os cursos de terceira ordem se originam da confluência de dois cursos de segunda ordem, e assim sucessivamente. Sempre que um curso de ordem superior se encontra com um curso de ordem inferior, a sua ordem não se altera.

Mais recentemente, inferiu-se o conceito de rio de ordem zero [Godoy et al., 2021]. Este é compreendido como um rio efêmero encontrado apenas após eventos de precipitação que ocorrem a montante da nascente do rio, ou desvinculado a ela. Este conceito pode ser relevante quando se estuda microbacias.

Ao se utilizar métodos puramente numéricos, a densidade de drenagem varia conforme a escala dos dados matriciais utilizados, portanto, deve-se utilizar sempre a mesma escala caso se tenha interesse em comparar diferentes bacias hidrográficas. Isso ocorre porque os rios podem ser definidos unicamente devido à conformação do relevo de uma bacia. Erros podem ocorrer neste procedimento, como o método considerar um rio de ordem zero como sendo um rio de primeira ordem ou um rio de segunda ordem como sendo um rio de primeira ordem.

2.2 ÁREA INUNDÁVEL E SUB-BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO

Para o estudo específico de inundação, utilizando a modelagem hidrológica em conjunto com a modelagem hidrodinâmica, mas de forma desacoplada, a bacia de estudo deve ser di-

vidida em: sub-bacias de contribuição (BCs) e área inundável (AI). As simulações hidrológicas são realizadas para as BCs e as hidrodinâmicas para a AI. Em caso de uso de modelo hidrodinâmico-hidrológico (acoplados), em que toda a bacia hidrográfica é discretizada em malha espacial, e a chuva é aplicada nesta malha em que as equações hidrodinâmicas também são aplicadas, não existe necessidade desta diferenciação¹.

As BCs são diferenciadas da AI pelo elevado potencial de inundação que a segunda possui. Como auxílio para esta diferenciação, devem ser realizadas visitas de campo para obter informações por meio de entrevistas com moradores. Ainda, dependendo do projeto de mapeamento de inundação, a área inundável pode ser considerada simplesmente como uma área que se tem interesse especificamente, como, por exemplo, um bairro em específico, e o resto da bacia pode ser considerado como sub-bacia de contribuição.

As áreas que constituem o mapa de inundação não podem ser consideradas como BCs. Os mapas de perigo de inundação são confeccionados apenas para a AI, visto que não há necessidade ou interesse deste estudo nas BCs.

2.3 APLICAÇÃO: DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO NEGRINHO EM RIO NEGRINHO-SC

Na presente seção do capítulo, a descrição das etapas para delimitação de bacias hidrográficas é apresentada, desde a obtenção da base de dados até o uso da ferramenta de geoprocessamento. Além disso, são realizados cálculos de algumas características físicas da bacia, que podem ser úteis para a sua compreensão e, posteriormente, utilizados como dados para os modelos **HEC-HMS** e **HEC-RAS**.

Neste documento, é apresentado um exemplo de aplicação na bacia do Rio Negrinho no município de Rio Negrinho, no estado de Santa Catarina, utilizando o *software* **QGIS**.

2.3.1 Obtenção de dados

Para iniciar o processo de delimitação da bacia hidrográfica, é fundamental dispor das ferramentas de geoprocessamento, dos dados topográficos e dos dados hidrológicos da região da bacia hidrográfica que se deseja delimitar.

O procedimento descrito neste documento utiliza o *software* livre de código-fonte aberto de Sistema de Informações Geográficas (SIG), **QGIS**, que pode ser obtido de forma gratuita. Basta acessar o *site* oficial do **QGIS** (<https://www.qgis.org>) e baixá-lo. Se não for um usuário experiente, opte pelas versões mais atuais com a denominação *Long Term Version*. Após isso,

¹ Este tema será detalhado no Capítulo 4.

realize o procedimento de instalação do arquivo baixado. Utilize a configuração padrão de instalação.

- **Obs. 1:** Os passos a seguir apenas se enquadram nas versões do QGIS entre 3.16 e 3.99. Ainda assim, nessas versões, podem ocorrer variações do que será apresentado a seguir.
- **Obs. 2:** Caso você tenha muita dificuldade com este tipo de programa, recomenda-se fortemente que você procure auxílio de pessoas próximas a você, além de buscar soluções através de tutoriais disponíveis on-line.

É altamente aconselhável que os procedimentos seguintes, de todo o documento, sejam realizados em um diretório com nomes curtos, sem espaços, sem acentos ou cedilha. Aconselhamos criar uma pasta em algum diretório inicial (*i.e.* **C://**, **D://**, **E://**, ou algum outro diretório de sua preferência). Este procedimento é importante para a utilização, principalmente, dos programas HEC-HMS e HEC-RAS, apresentados nos capítulos posteriores. **A organização dos arquivos é fundamental para o sucesso dos procedimentos!**

2.3.2 Etapas para a delimitação automática da bacia hidrográfica

Para maior facilidade no procedimento de trabalho com programas de geoprocessamento, é indicado que o usuário já tenha conhecimentos prévios deste tipo de ferramenta. De qualquer maneira, o presente trabalho traz, de forma detalhada, as etapas para a delimitação de bacia hidrográfica automaticamente, para auxiliar os iniciantes a realizarem os procedimentos solicitados.

No presente documento, como exemplo, identificaremos a região de inundação na área urbana do município de Rio Negrinho, em Santa Catarina. Para isso, **o primeiro passo é localizar a área de interesse em mapas on-line** (Figura 2.5a), garantindo o reconhecimento da região que será trabalhada. A foz do Rio Negrinho no Rio Negro representa o exutório da bacia hidrográfica em questão (Figura 2.5b), com coordenadas: Latitude -26.233409 e Longitude -49.549575.

Figura 2.5 – Identificação da região de interesse.

(a) Delimitação do município de Rio Negrinho utilizando informações on-line.



(b) Localização do exutório no Rio Negrinho.



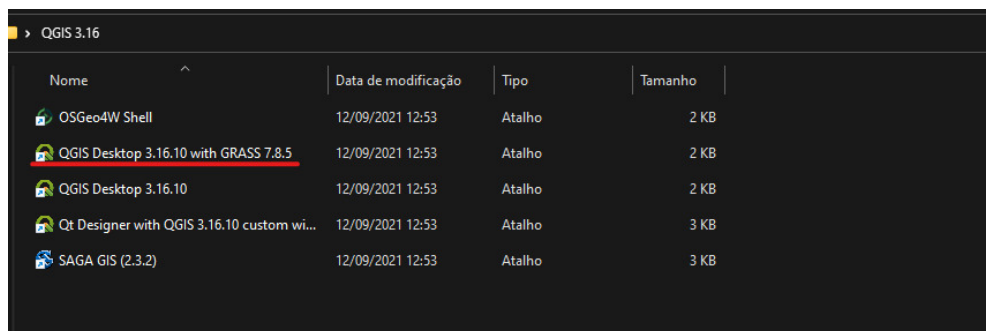
Fonte: Próprios autores.

Organização das informações

Os seguintes procedimentos devem ser realizados para que o processo de delimitação automática da bacia hidrográfica seja possível:

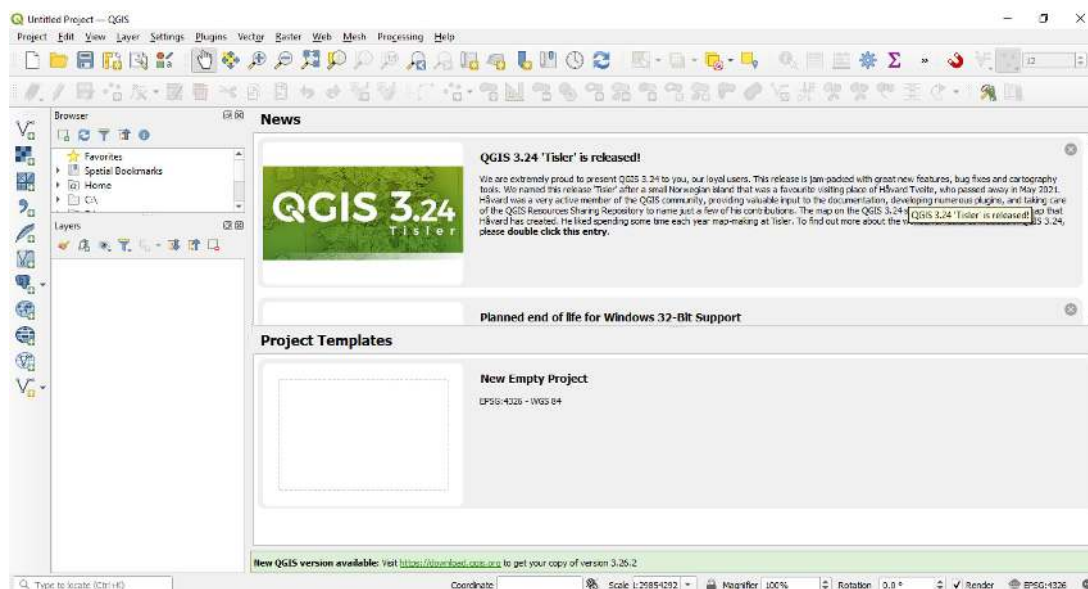
- Deve-se abrir o *QGIS with Grass*, para poder utilizar as funções necessárias durante a delimitação. Em algumas versões do QGIS, essa opção pode não estar disponível. Nesses casos, deve-se abrir o *QGIS Desktop*, pois a ferramenta *Grass* já está integrado de forma implícita. Para este segundo caso, certifique-se que o complemento "*GRASS GIS provider*" está instalado. Para isso, acesse o menu "*Complementos*" no QGIS.
- Para abrir o *software*, deve-se abrir uma pasta localizada na área de trabalho com o nome do programa (Figura 2.6), ou procurar por QGIS no menu "*Iniciar*" do Windows. A tela inicial do programa será semelhante à mostrada na Figura 2.7.

Figura 2.6 – Abrindo o programa.



Fonte: Próprios autores.

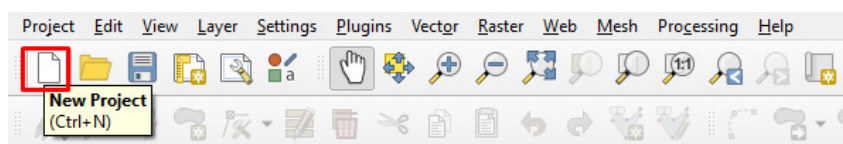
Figura 2.7 – Tela inicial do programa.



Fonte: Próprios autores.

- Para iniciar um novo projeto, clica-se no canto esquerdo da tela em "*Novo Projeto*", ou ainda, clique em **CTRL + N** (Figura 2.8), uma tela em branco com abas laterais e superiores deve aparecer;

Figura 2.8 – Novo projeto.



Fonte: Próprios autores.

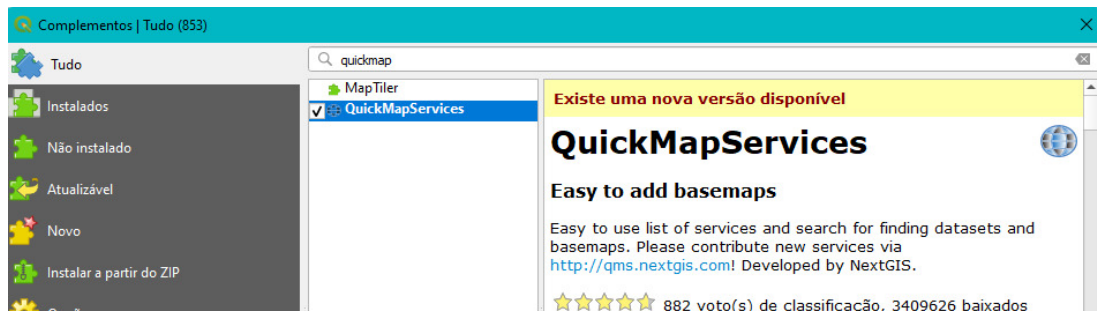
- Verifique se os itens "*Navegador*" e "*Caixa de Ferramentas de Processo*" estão ativados (Figura 2.9) para termos mais funcionalidades e facilitar o uso da ferramenta. Caso não estejam ativados, ative-os;



- Figura 2.10 – Acessar complementos em *Plugins*.



Figura 2.11 – Adicionando o *QuickMapServices*.



Fonte: Próprios autores.

- Caso esteja on-line, você pode adicionar uma imagem de satélite georreferenciada indo à aba "Web" » "QuickMapServices" » "Google" » "Google Satellite". Note que você pode optar por outros produtos, caso seja do seu interesse. Agora você pode encontrar o município de Rio Negrinho na tela de visualização do QGIS!
- É interessante inserir o *shape*² (arquivo vetorial) da bacia hidrográfica (BH) que representa aproximadamente a região de estudo, para se ter uma ideia da região a ser representada. Como podemos acabar realizando o procedimento para uma bacia hidrográfica que nos é desconhecida, devemos ter uma ideia de qual o seu tamanho. O IBGE possui a delimitação de diversas bacias hidrográficas brasileiras que pode nos auxiliar nesta compreensão. Para fazer o *download* do *shape* das bacias que podem auxiliar em compreender a região de interesse, pode-se acessar o *site* do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/>) e seguir o seguinte caminho: Página principal » Geociências » Informações ambientais » Estudos ambientais » Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil, em Bacias Hidrográficas do Brasil - BHB250 clique em vetores, e depois faça *download* do arquivo "bacias_nivel_6.zip"(Figura 2.12). No mesmo site, também pode-se encontrar os arquivos necessários para cobertura, uso e tipo do solo.

² Todo o arquivo no QGIS é atrelado a um Sistema de Referência de Coordenadas (SRC). É importante que todos os arquivos utilizados estejam utilizando a mesma referência com o mesmo número de SRC.

Figura 2.12 – Página de *download* dos arquivos de bacias hidrográficas brasileiras.



Fonte: Próprios autores.

- Para adicionar ao QGIS o arquivo da bacia já baixado da internet, deve-se extrair o conjunto de arquivos compactados (extrair do .zip)³. Depois, pode-se encontrar o arquivo .shp na pasta pelo navegador do próprio programa e clicar 2 vezes para aparecer. Outra forma de inserir o arquivo é arrastar o arquivo .shp (agora em um diretório do Windows/Linux) referente à bacia hidrográfica para o programa. Note que não existe área limitada que abranja o município de Rio Negrinho para a "bacias nivel 6", entretanto podemos ter uma ideia do tamanho da bacia de Rio Negrinho, pois ela não faz parte deste polígonos já formados (Figura 2.13).
- Após adicionar o shape é possível modificar a cor do mesmo, a opacidade, se vai possuir apenas contorno ou se será totalmente preenchido, clicando com o botão direito e acessando "Propriedades".
- Pode-se remover deste arquivo as regiões que não se tem interesse, por questão de organização. Neste caso, no painel à esquerda *Layers* (Camadas), deve-se clicar com o botão direito do mouse no shape do limite municipal e/ou no shape das bacias hidrográficas e abrir a "Tabela de atributos", conforme a Figura 2.14. Feito isso, seleciona-se todos os itens de uma vez e deixa-se somente o que interessa. Para fazer isso, clica-se em **CTRL + A**, ou ainda, na parte superior, entre a coluna de números à esquerda e a barra de ferramentas superior (Figura 2.15), depois, com o botão **CTRL** escolhe-se o item que representa a região de interesse e se clica no número que aparece na mesma coluna da

³ O shape é composto por um conjunto de arquivos que precisam ter o mesmo nome e estar na mesma pasta para poderem funcionar adequadamente. É aconselhado, antes de utilizar este arquivo, que o organize na pasta usada para este procedimento.

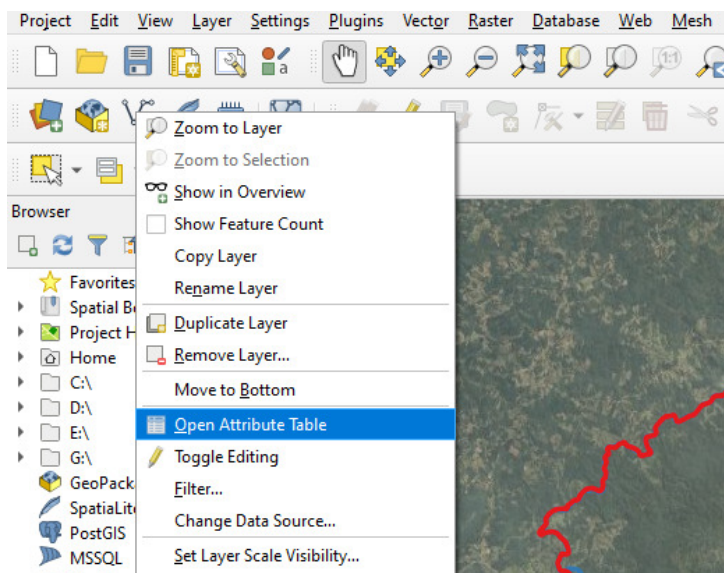
Figura 2.13 – Provável área da bacia de Rio Negrinho com base no *shape* "bacias nivel 6".



Fonte: Próprios autores.

esquerda (Figura 2.16). Então, deve-se clicar na ferramenta de edição, sendo a primeira que aparece na barra com o símbolo de "lápiz", em seguida, clica-se no "lixo" para deletar o excesso (Figura 2.17) de informações. Após isso, clique novamente no "lápiz" e salve as informações.⁴

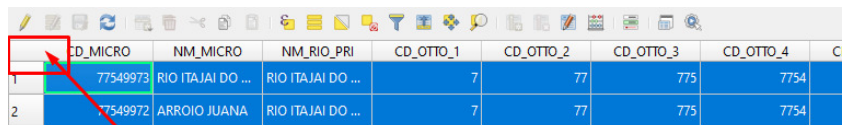
Figura 2.14 – Acessando a tabela de atributos.



Fonte: Próprios autores.

⁴ Procure ajuda em tutoriais online do QGIS para mais informações. Utilizar programas de geoprocessamento pela primeira vez pode ser complexo.

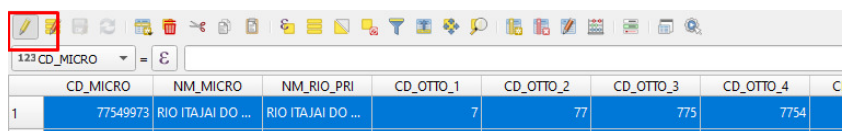
Figura 2.15 – Selecionando todos os itens na tabela de atributos.



	CD_MICRO	NM_MICRO	NM_RIO_PRI	CD_OTTO_1	CD_OTTO_2	CD_OTTO_3	CD_OTTO_4	CD...
1	77549973	RIO ITAJAI DO ...	RIO ITAJAI DO ...	7	77	775	7754	
2	77549972	ARROIO JUANA	RIO ITAJAI DO ...	7	77	775	7754	

Fonte: Próprios autores.

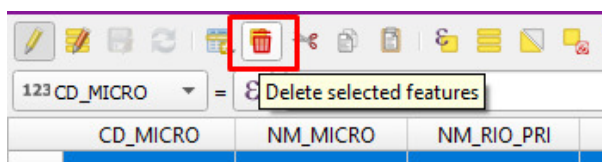
Figura 2.16 – Deselecionando o item de interesse e clicando na edição na tabela de atributos.



	CD_MICRO	NM_MICRO	NM_RIO_PRI	CD_OTTO_1	CD_OTTO_2	CD_OTTO_3	CD_OTTO_4	CD...
1	77549973	RIO ITAJAI DO ...	RIO ITAJAI DO ...	7	77	775	7754	

Fonte: Próprios autores.

Figura 2.17 – Excluindo todos os itens em excesso da tabela de atributos.



Fonte: Próprios autores.

- É interessante que se adicione também o *shape* do curso d'água. No caso de SC, é possível baixar através do site SIG SC (<http://sigsc.sc.gov.br/>), clicando em "Download" (Figura 2.18), posteriormente em "Solicitar dados vetoriais" e "Meus Downloads" (Figura 2.19) (um breve cadastro é necessário). A obtenção dos arquivos de curso d'água pode ser realizada pelo site da ANA ou outra entidade que possua esta informação.

Figura 2.18 – Página inicial do site SIG SC.



Fonte: Próprios autores.

- No QGIS, para ajustar a visualização, a ordem das camadas define qual arquivo estará em cima e qual estará em baixo.

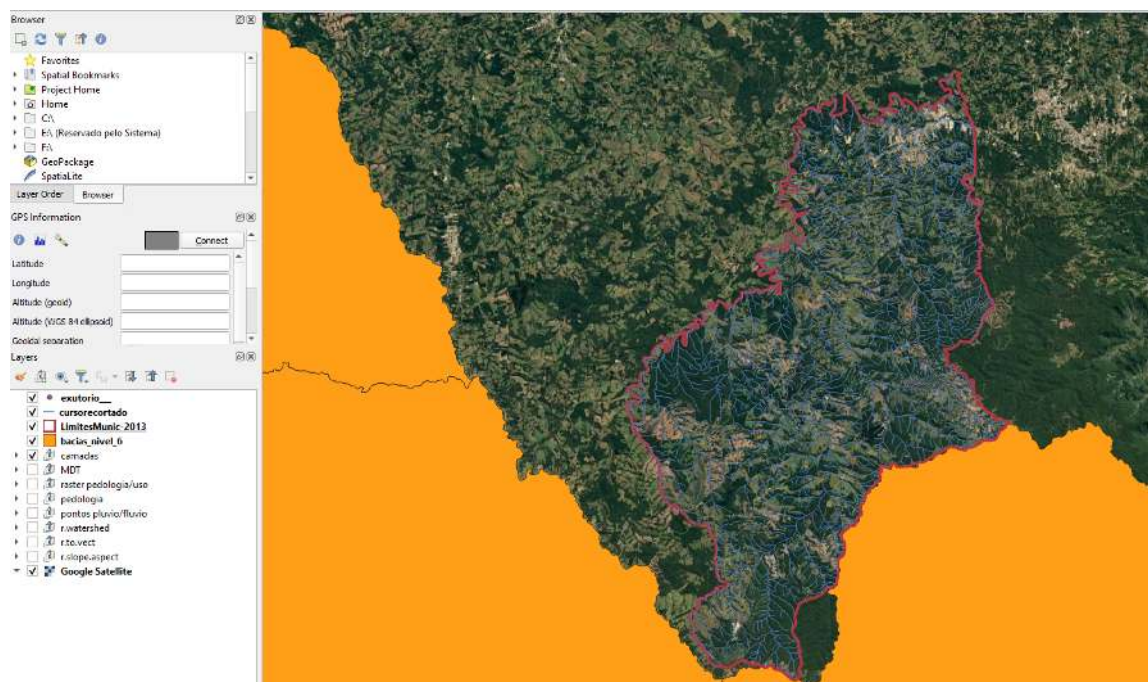
Figura 2.19 – Download da hidrografia de SC pelo site do SIG SC.



Fonte: Próprios autores.

- Adicionados os *shapes* de bacia hidrográfica, limite de município e o curso d'água (Figura 2.20), poderá ser dado prosseguimento à delimitação da bacia.

Figura 2.20 – Procedimento inicial no QGIS.



Fonte: Próprios autores.

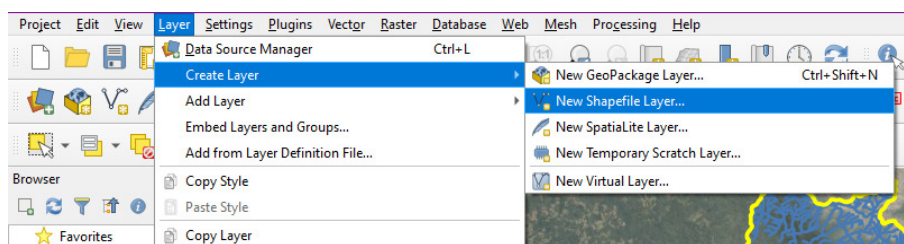
- É importante localizar o exutório de interesse. Para melhorar a organização, crie uma nova pasta no diretório onde já estão adicionados os demais *downloads*. No QGIS, na barra superior, clica-se em "Camada" » "Criar nova camada" » "Nova camada shapefile" (Figura 2.21a). Desse modo, será aberta uma aba, no campo "Nome do arquivo", clica-se nas reticências à direita e seleciona-se a pasta recém-criada para salvar os arquivos do

exutório. Neste momento, deve-se definir um nome para o arquivo e salvá-lo dentro da pasta. Continuando as configurações, coloque na "Codificação do arquivo" a "UTF-8" e como "Tipo de geometria" adicione "Ponto", como na Figura 2.21b. A localização do ponto de interesse pode ser feita de duas formas:

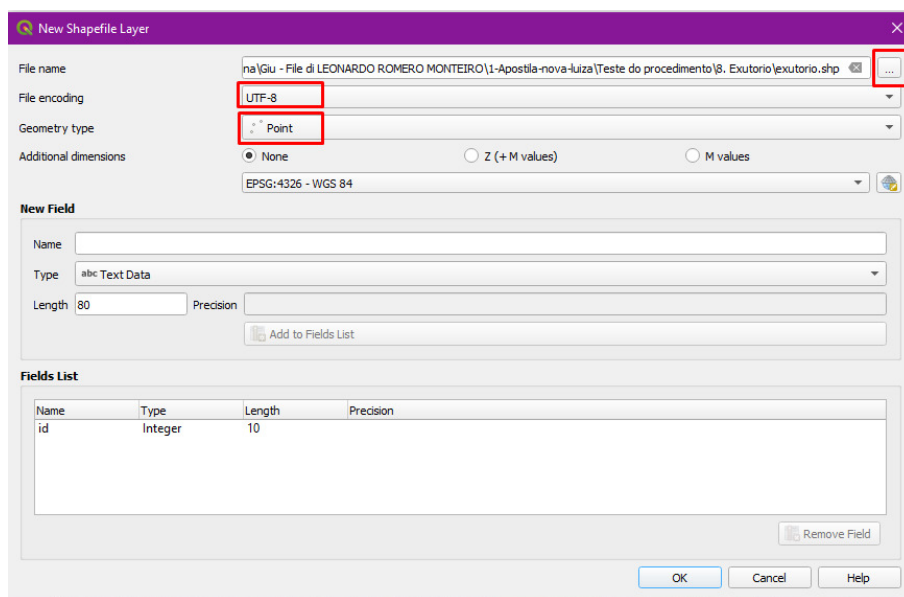
- Manualmente: No painel "Camadas", é necessário selecionar o exutório criado e ativar o modo de edição clicando no lápis ("Alternar edição"). Clique em "Adicionar Ponto" (Figura 2.22a) e, no mapa, insira manualmente o ponto do exutório, utilizando como referência a hidrografia e os limites da bacia de interesse.
- Por coordenadas: Para adicionar o ponto com base em coordenadas conhecidas, vá ao menu "Complementos" » "Gerenciar e Instalar complementos...". Na caixa de busca, digite "NumericalDigitize" e instale o plugin. Na barra de ferramentas "Digitalizar", localize o ícone do complemento instalado e clique nele (Figura 2.22b). Na janela que será aberta, insira as coordenadas X e Y dos pontos desejados, garantindo que o sistema de coordenadas seja compatível com o da camada ou do projeto.

Figura 2.21 – Criando nova camada para o exutório.

(a) Criação de novo *shapefile*.



(b) Configuração para inserção de ponto.



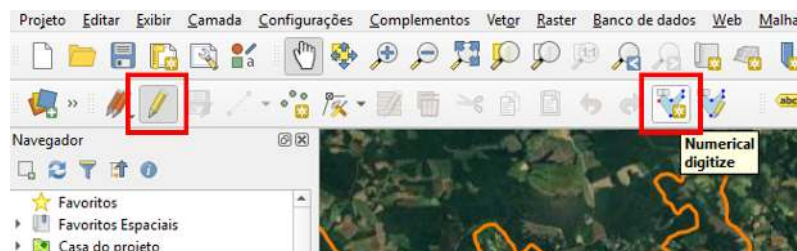
Fonte: Próprio autor.

Figura 2.22 – Inserindo ponto no mapa.

(a) Manualmente.



(b) Por coordenadas.



Fonte: Próprio autor.

Processamento do Modelo Digital do Terreno (MDT)

Para dar prosseguimento ao processo de delimitação da bacia hidrográfica, deve-se dispor do MDT da área de interesse. **Diversas formas de se obter essas informações são apresentadas no Apêndice B. Acesse este apêndice para dar continuidade ao procedimento. Aplique o passo do software OpenTopography.**

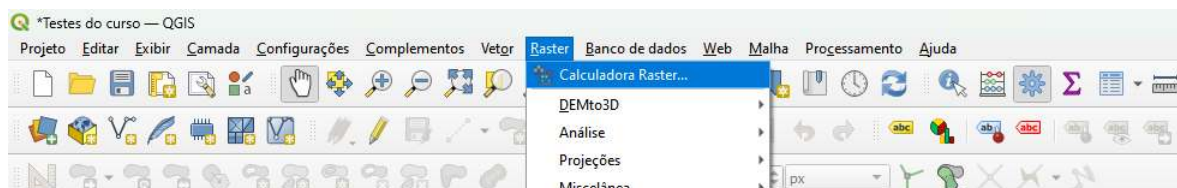
Neste processamento inicial, recomenda-se utilizar um MDT de **menor resolução**, pois arquivos muito detalhados podem aumentar o tempo de processamento sem trazer benefícios significativos para a análise preliminar. No presente exemplo, utilizou-se o MDT do OpenTopography Copernicus Global DSM 30 m. É importante obter um MDT maior do que a bacia hidrográfica que será delimitada. Para auxiliar, utilize como referência os arquivos *shapefiles* do curso d'água e da bacia hidrográfica nível 6.

Correção de alturas negativas

O QGIS será utilizado para eliminar possíveis alturas negativas. O processamento automático de bacia hidrográfica não permite o uso de valores negativos no MDT, pois isso pode interferir nos cálculos hidrológicos.

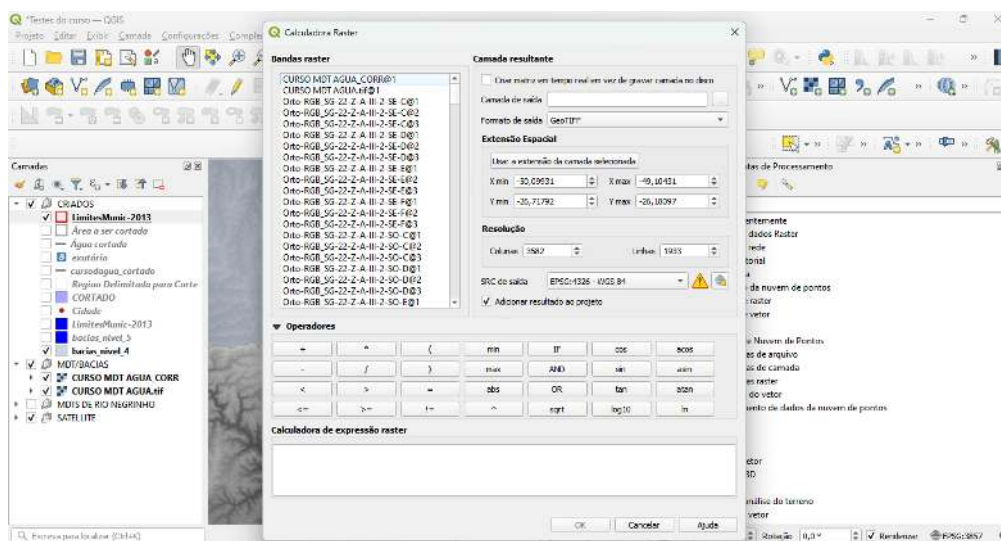
- Pesquise na aba superior à opção "*Raster*", após isso selecione "*Calculadora Raster*" (Figura 2.23). Essa ferramenta é a padrão de processamento do próprio QGIS, que não depende de nenhum outro complemento ou extensão. Após abrir a "*Calculadora Raster*", uma aba semelhante a uma calculadora aparecerá na tela (Figura 2.24).

Figura 2.23 – Selecionado o Raster Calculator.



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.24 – Tela de visualização do Raster Calculator.



Fonte: Próprios autores.

- Ao abrir a calculadora, abaixo encontra-se uma caixa de texto na qual podem ser feitos vários códigos para auxiliar o desenvolvimento do projeto. Nesse caso específico, para se reparar os valores negativos, deve-se escrever:
$$("Nome\ do\ MDT" \leq 0) * 0 + ("Nome\ do\ MDT" \geq 0) * ("Nome\ do\ MDT")$$
- Esclarecendo o que foi escrito na calculadora, para este MDT: se algum valor deste for menor ou igual a zero, será reescrito como 0. Mas, caso este MDT seja maior ou igual a 0, permanecerá como o mesmo valor do MDT.
- Para evitar erros ao digitar o nome do MDT, clique sobre ele na lista de camadas disponíveis dentro da "Calculadora Raster". O nome será inserido automaticamente.
- Para definir a pasta onde o arquivo será gerado e o seu nome, clique nos três pontos ao lado de "Camada de saída". Após a execução do programa, um **novo MDT** será criado com o nome digitado anteriormente.⁵

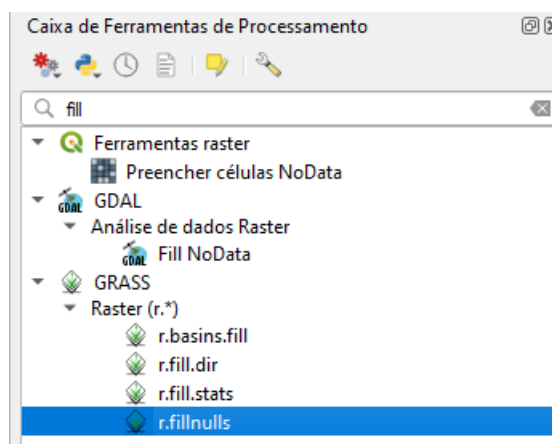
Preenchimento de falhas ou depressões

⁵ Recomenda-se não utilizar acentos ou espaços para evitar erros no processamento; caso necessário, use underline (_) para dar o espaçamento. Lembre-se também de deixar um caminho curto ao salvar o arquivo, pelo mesmo motivo.

Esta é uma ferramenta que permite preencher imperfeições nos dados do MDT e remover as falhas que podem surgir por algum erro na sua criação. Para este procedimento, é necessário preencher depressões, mesmo que sejam verdadeiras. O algoritmo de criação de bacia hidrográfica não tem a capacidade de assimilar adequadamente este tipo de informação. Regiões nas quais se acomodam essas falhas e depressões tendem a prejudicar e até inviabilizar os próximos passos necessários para a delimitação de uma bacia hidrográfica.

Para corrigir essas falhas, utiliza-se a ferramenta "*r.fillnulls*", disponível no QGIS, conforme a Figura 2.25. A ferramenta já virá configurada com parâmetros pré-definidos, bastando selecionar o "MDT" em *Input raster layer of fill*, depois é só executar.

Figura 2.25 – *r.fillnulls*.



Fonte: Próprios autores.

- Esta correção utiliza o método de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*), que atribui pesos ponderados aos pontos amostrais. Para mais informações desta ferramenta, consulte materiais complementares ou tutoriais disponíveis na internet.

Organização das camadas

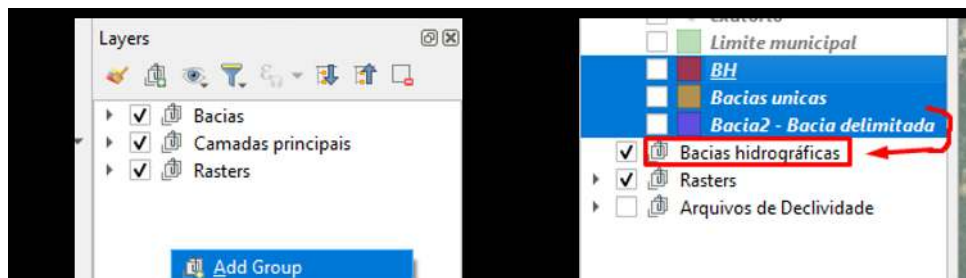
Para executar um projeto no QGIS, é imprescindível uma boa organização, principalmente porque o *software* lida com diferentes camadas, o que pode tornar os procedimentos confusos. Nesse sentido, podemos criar grupos e subgrupos, organizando os dados de maneira mais estruturada. Basta clicar com o botão direito no espaço vazio do painel de camadas (Figura 2.26a) e selecionar a opção "*Novo Grupo*" e nomear conforme desejado. Arraste e solte as camadas dentro dos grupos criados (Figura 2.26b).

Delimitação de Bacia Hidrográfica

Depois das obtenções de informações e procedimentos, podemos delimitar as bacias hidrográficas a partir do procedimento descrito a seguir:

- Na caixa de ferramentas, pesquise e abra a "*r.watershed*";

Figura 2.26 – Organização das camadas: (a) Criação dos grupos, (b) Separação das camadas nos grupos.

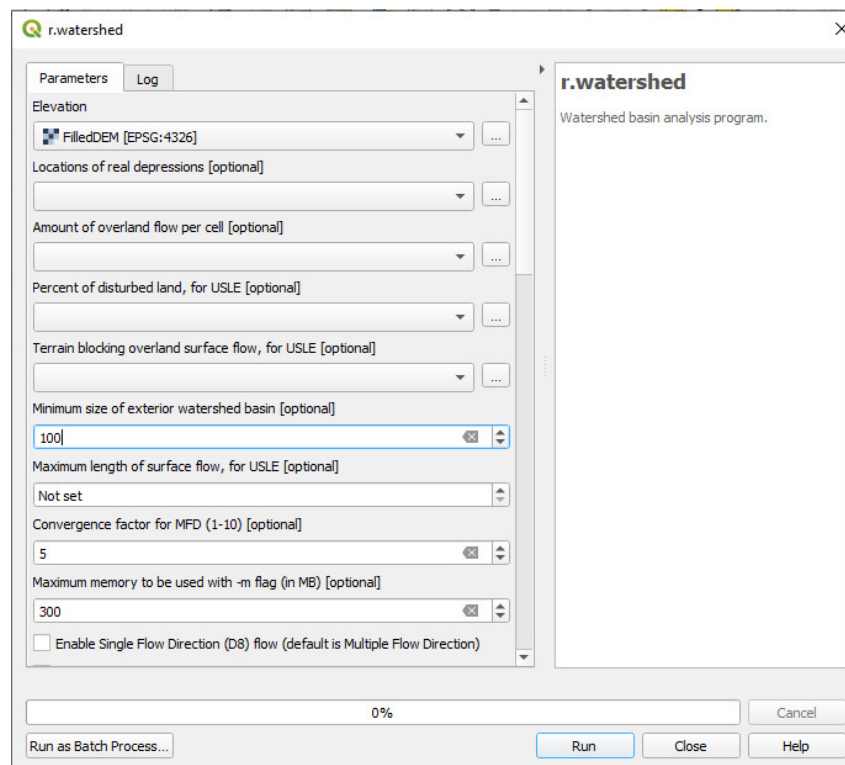


Fonte: Próprios autores.

- Na opção "*Elevação*", selecione a camada MDT corrigida anteriormente ("*FilledDEM*" ou algum outro nome que tenha sido utilizado), gerada na etapa de preenchimento de falhas e depressões;
- Em "*Tamanho mínimo do exterior da bacia*", coloque o valor de 100, conforme a Figura 2.27, porém, tenha em vista que esse valor pode variar conforme o local e o nível de detalhe que se deseja. Para bacias muito pequenas (menores que 50 km²), aconselha-se reduzir este valor e para bacias muito grandes (maiores que 1000 km²), aconselha-se aumentar este valor. Nesse caso, pode-se executar o programa e gerar as camadas temporárias (Figura 2.28);⁶

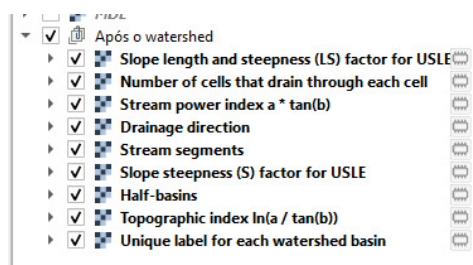
⁶ Entretanto, aconselha-se salvar cada arquivo gerado com seu respectivo nome, para evitar que os arquivos fiquem armazenados na memória do computador. Como os arquivos são muito grandes, ao armazená-los apenas na memória, estes poderiam ser apagados caso o QGIS seja fechado, o que poderia prejudicar o trabalho futuro. Para salvar os arquivos, deve-se ir até a parte inferior da aba do *r.watershed* e alocar cada arquivo gerado em uma pasta, fornecendo-lhe um nome, utilizando o ícone dos três pontos para cada arquivo individualmente.

Figura 2.27 – Configurações do preenchimento de falhas.



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.28 – Resultado *r.watershed*.



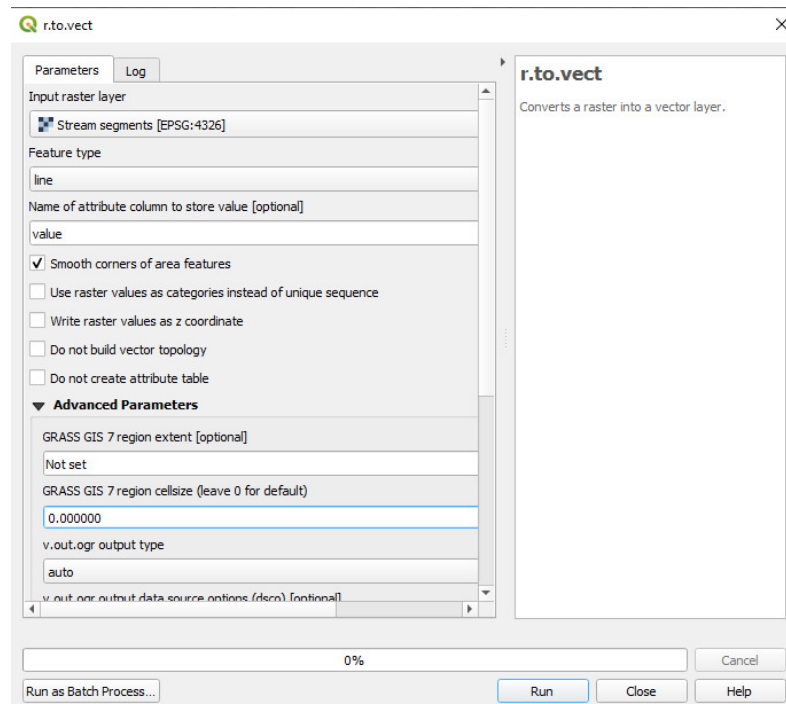
Fonte: Próprios autores.

- Por fim, pode-se organizar as camadas geradas em um subgrupo.

Para prosseguir com a análise, é preciso transformar as camadas "Segmento de fluxo" e "Rótulo único para bacias hidrográficas" para vetor. Para isso, utiliza-se a ferramenta "*r.to.vect*", encontrada na "*Caixa de Ferramentas*":

- Para o "Segmento de Fluxo", usa-se "*linha*" no campo "*Tipo de feição*" e marque a opção "*Corners suaves de feições de área*". É preciso salvar a camada gerada como permanente, pode-se nomear de "Drenagem" (Figura 2.29).

Figura 2.29 – Ferramenta *r.to.vect* para transformar as camadas "Segmento de fluxo".

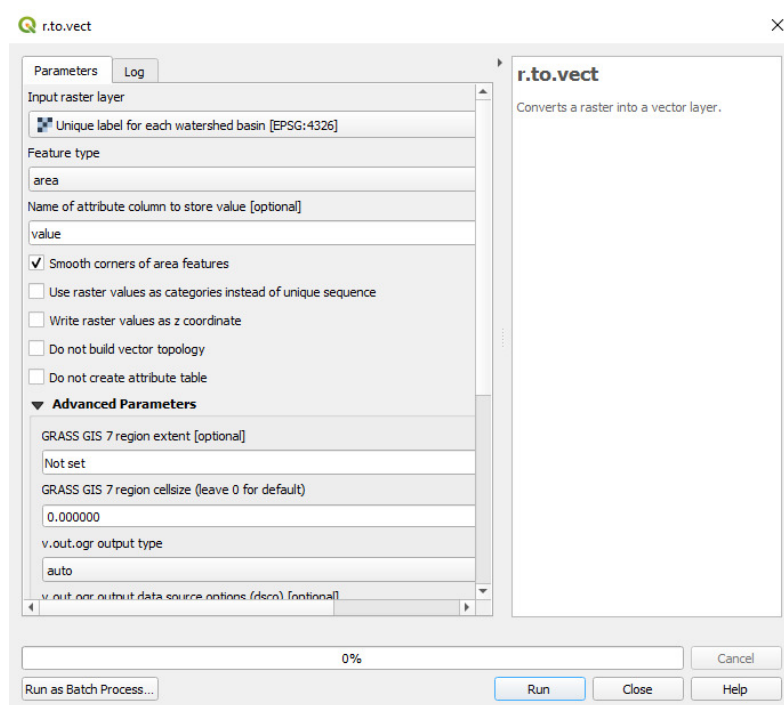


Fonte: Próprios autores.

- Já para o "Rótulo único para as bacias hidrográficas", deve-se preencher o campo tipo de feição com "área" e marcar a opção "Corners suaves de feições de área". Deve-se salvar a camada gerada como permanente, pode-se nomear de "Bacias_unicas" (Figura 2.30).

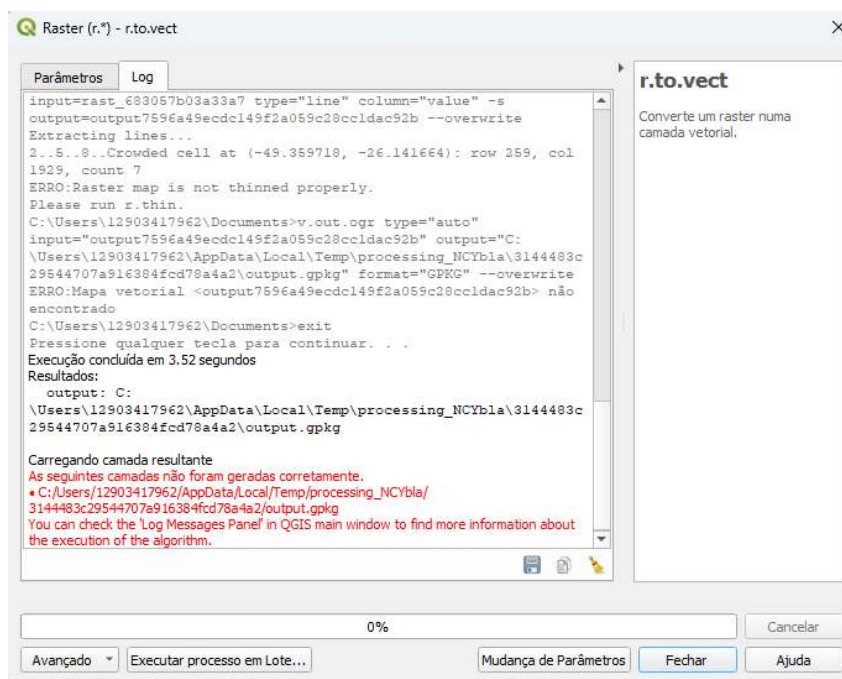
Observação: para o caso de algumas das camadas do passo anterior aparecerem esta mensagem (Figura 2.31):

Figura 2.30 – Ferramenta *r.to.vect* para transformar as camadas "Rótulo único para bacias hidrográficas".



Fonte: Próprios autores.

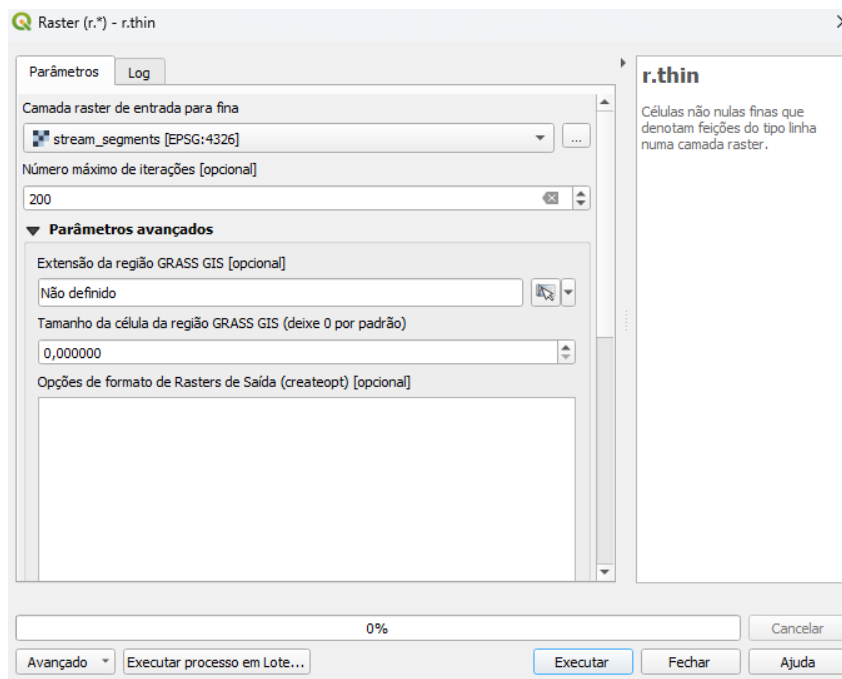
Figura 2.31 – Erro no *r.to.vect*



Fonte: Próprios autores.

Iremos à Ferramenta *r.thin* (Figura 2.32) para assim "diluir". Quando executado, irá criar um novo *shape*, sendo assim possível voltar ao passo anterior.

Figura 2.32 – Ferramenta *r.thin*



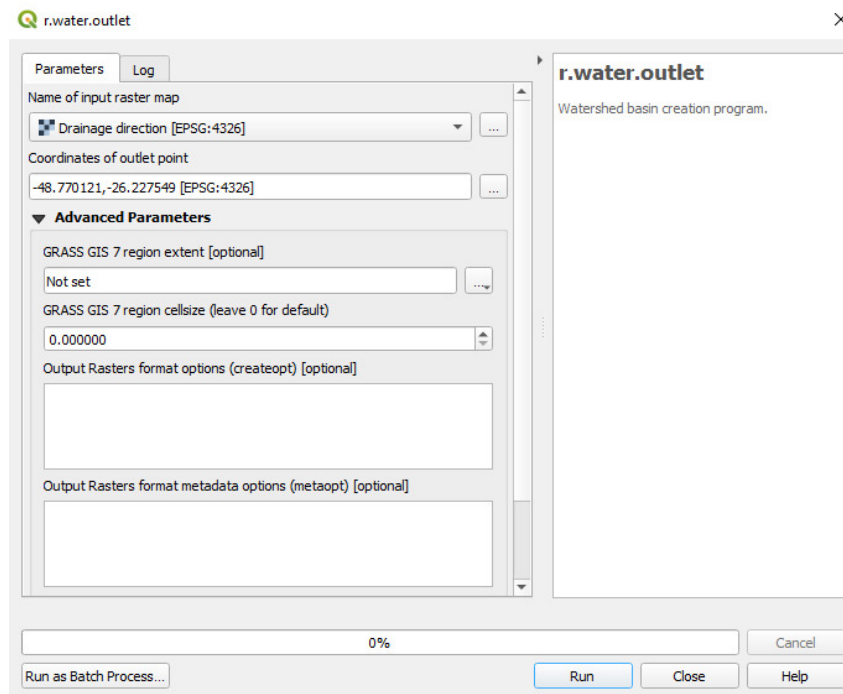
Fonte: Próprios autores.

Delimitando a Bacia Hidrográfica

Na "Caixa de Ferramentas", pesquise pela ferramenta "*r.water.outlet*". Configure-a conforme mostrado na Figura 2.33, isto é, na opção "Nome do mapa raster de entrada", selecione a camada "Direção de Drenagem" e no campo "Coordenadas de exutório" é importante escolher um ponto para a definição da bacia hidrográfica referente ao ponto escolhido (Figura 2.34).⁷ Após a execução do programa, a bacia hidrográfica é delimitada (Figura 2.35). Note que a projeção da "Direção de Drenagem" tem que ser igual à projeção das "Coordenadas do exutório". Nesse caso, utilize EPSG:4326. Caso isso não ocorra, altere a projeção da camada no QGIS ou converta a projeção da "Direção de Drenagem" antes de prosseguir.

⁷ Na hora de escolher o ponto de exutório no mapa, é recomendado manter ativada a camada "Segmento de fluxo" ou "Drenagem" para visualizar a melhor posição do exutório, que deve estar exatamente em cima dos segmentos de drenagem apresentados. A hidrografia da ANA (ou de outras fontes) não deve ser utilizada como base para a definição do exutório.

Figura 2.33 – Configurando o *r.water.outlet*.



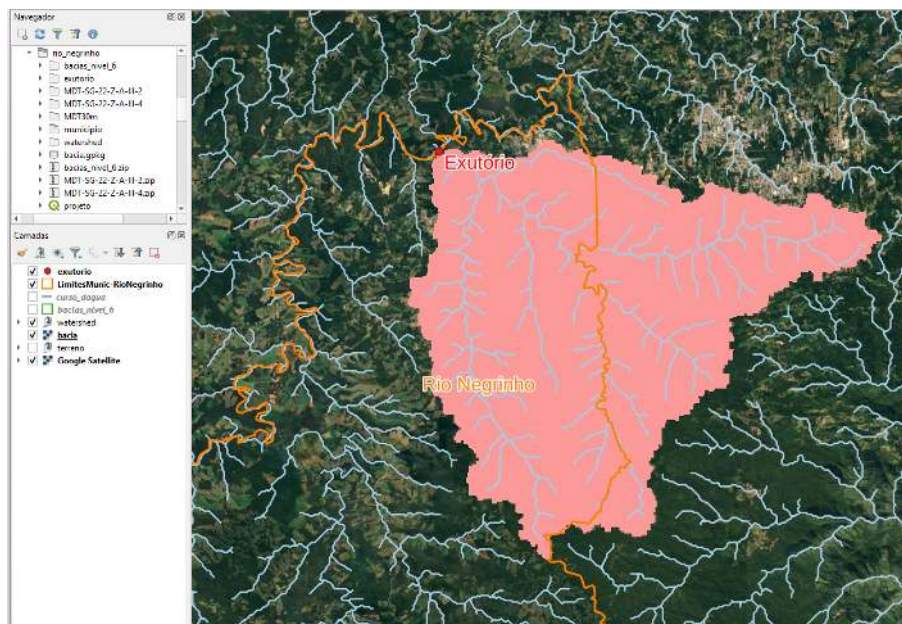
Fonte: Próprios autores.

Figura 2.34 – Escolhendo o exutório com base na hidrografia correta pelo *r.water.outlet*.



Fonte: Próprios autores.

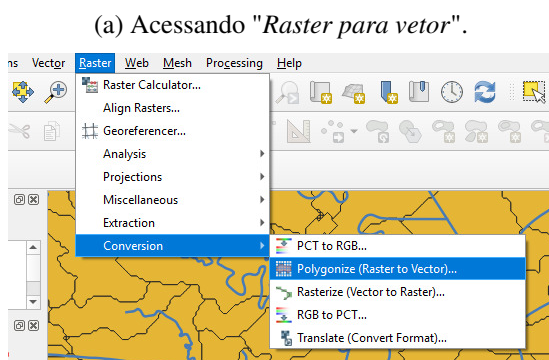
Figura 2.35 – Bacia hidrográfica resultante do *r.water.outlet*.



Fonte: Próprios autores.

Por fim, transforma-se a delimitação da bacia em vetor para que suas propriedades como perímetro e área sejam facilmente obtidas. Para isso, na barra de tarefas, na parte superior, acessa-se "Raster" » "Converter" » "Raster para vetor" (Figura 2.36). Salve o arquivo em uma pasta para torná-lo permanente.

Figura 2.36 – Conversão de *raster* para *vetor*.



Fonte: Próprios autores.

2.3.3 Características físicas da bacia hidrográfica

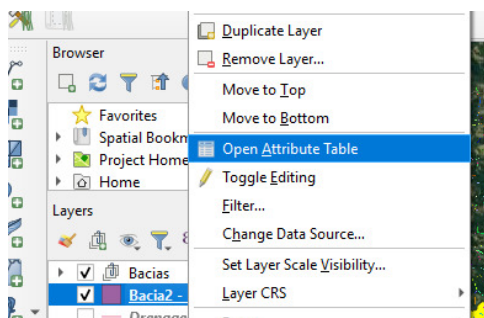
O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas, área, comprimento de rio, declividade, forma, topografia, solo, cobertura vegetal, entre outros. A seguir, serão representados métodos para se obter diversas informações utilizando o QGIS.

Área da bacia

Para o cálculo da área da bacia hidrográfica no QGIS, utiliza-se a "Tabela de Atributos". Clique com o botão direito sobre a camada (*layer*) correspondente e selecione a opção "Abrir Tabela de Atributos" (Figura 2.37).

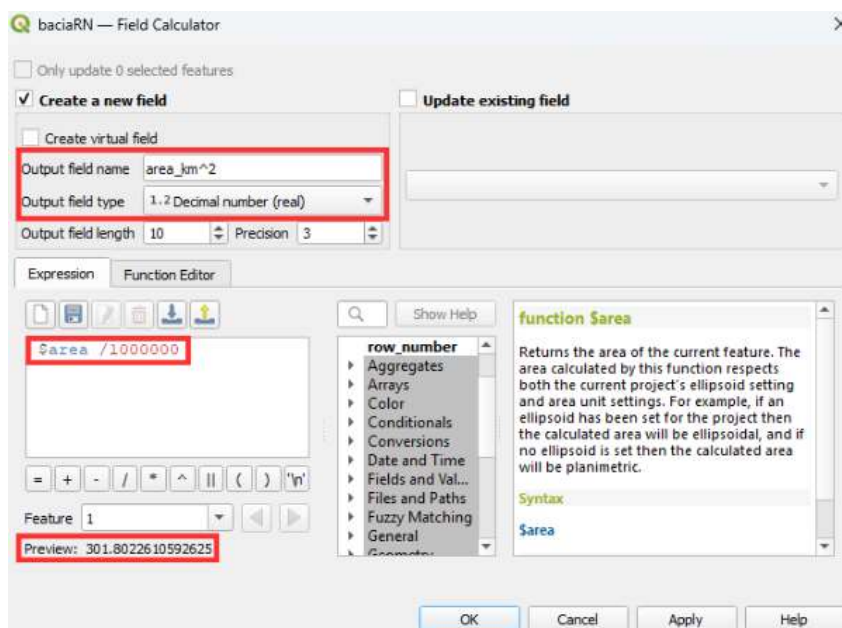
Para começar a editar a tabela, clica-se no ícone de "lápis" no canto superior esquerdo. Após isso, deve-se clicar na ferramenta com ícone de "ábaco" ou **CTRL + I** para abrir a "Calculadora de Campo". Depois, deve-se adicionar um campo na tabela a partir de "Criar um novo campo" com o nome desejado, por exemplo, "area_km²". Em "Tipo", escolha "Decimal (double)" para armazenar valores com casas decimais. Assim, deve-se colocar no campo "Expressão" a fórmula "\$area/1000000". Isso converte a área de m² para km², garantindo que o valor calculado esteja na unidade correta, conforme a Figura 2.38.

Figura 2.37 – Acessando a Tabela de Atributos para o cálculo da área.



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.38 – Cálculo da área.

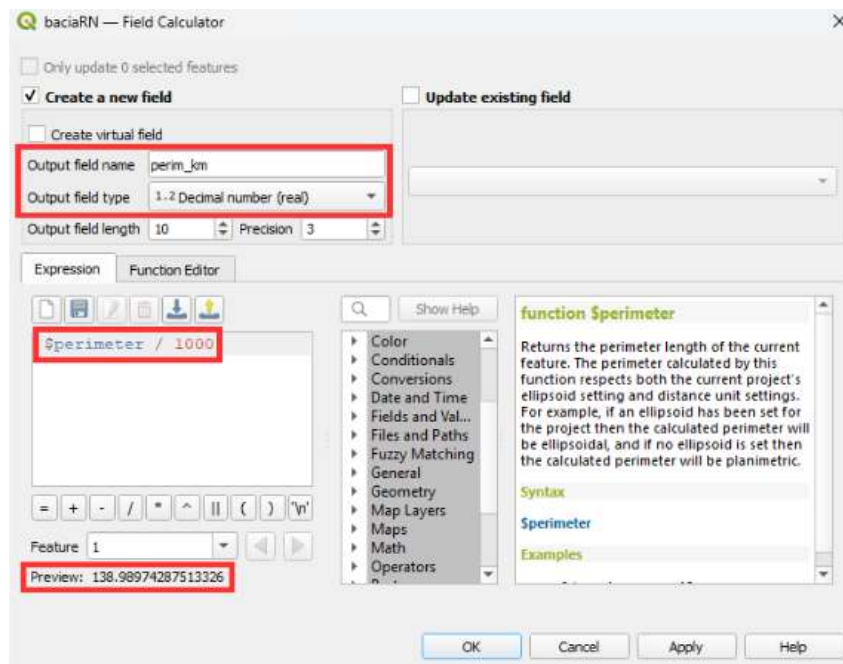


Fonte: Próprios autores.

Perímetro da bacia

Da mesma forma que realizado para a área da bacia, pode-se abrir a "Calculadora de Campo", configurá-la para "Criar um campo virtual" nomeado "perim_km" e tipo "Decimal (double)". Coloca-se no campo "Expressão" a fórmula "\$perimeter/1000" para a unidade adotada ser km, conforme a Figura 2.39.

Figura 2.39 – Cálculo do perímetro.



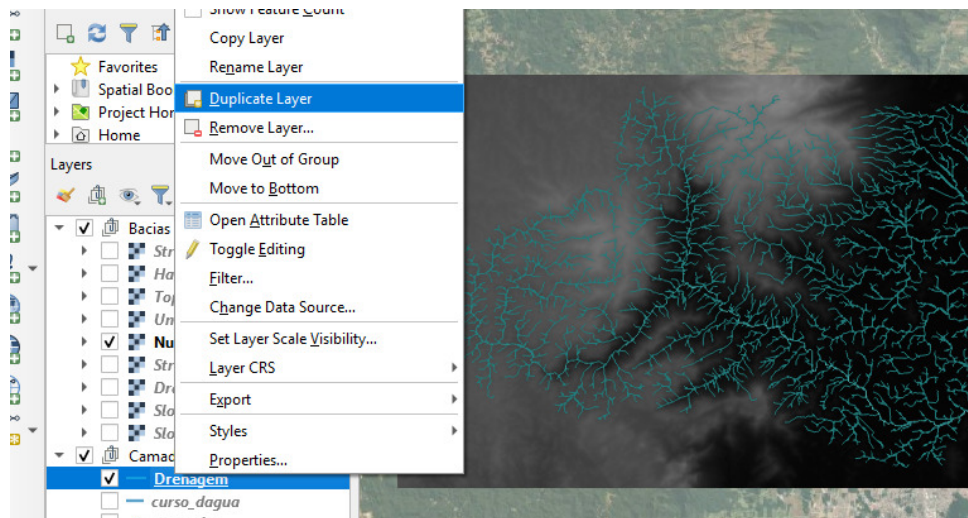
Fonte: Próprios autores.

Comprimento do rio principal

Para o cálculo do comprimento do rio principal, é preciso identificar e selecionar o trecho que compreende o rio principal. Ativa-se o *raster* criado "Número de células que drenam mediante cada célula", que deixará mais clara a trilha onde passa o rio. Para vê-la utilize o *zoom*, assim você pode identificar qual é o rio principal.

Em seguida, coloque a camada referente aos cursos d'água, obtida no SIGSC, acima deste *raster* para que possa ser vista. Dupliche o *shape* dos cursos d'água, clicando com o botão direito em cima dela e em "Duplicar camada", conforme a Figura 2.40. Antes de alterar a nova camada criada, deve-se salvá-la com outro nome para não modificar a anterior. Na nova camada, será mantido apenas o rio principal.

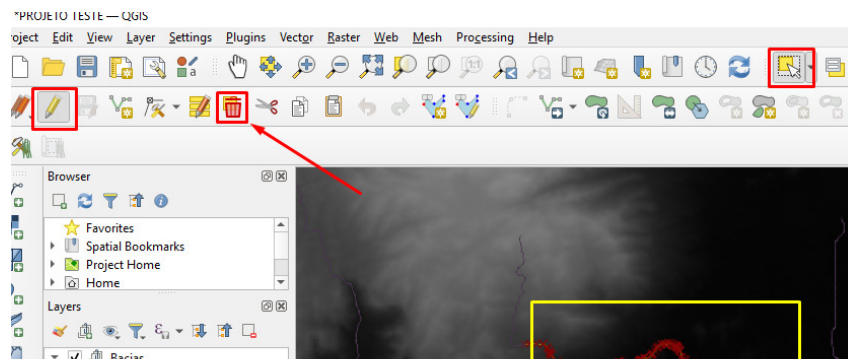
Figura 2.40 – Duplicando a camada de drenagem.



Fonte: Próprios autores.

Assim, clique com o botão do "lápis" para habilitar a edição da camada e "Selecionar feições por área" na barra de ferramentas. Selecione os trechos que não pertencem ao rio principal e exclua-os (Figura 2.41).

Figura 2.41 – Cortando todos os rios que não pertencem ao principal.

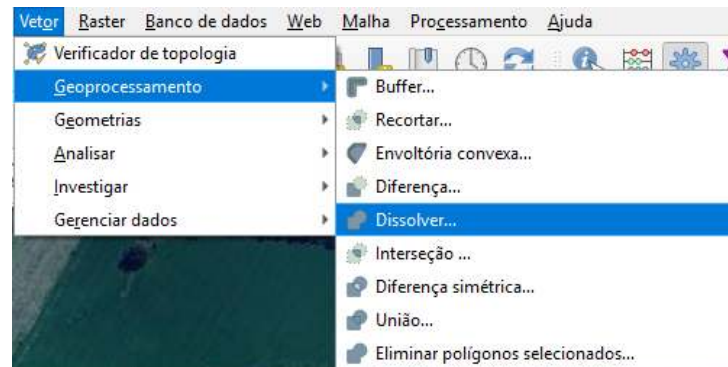


Fonte: Próprios autores.

Depois dessa etapa, deve-se selecionar todos os trechos restantes e juntá-los em uma única camada. Para isso, basta ir em "Geoprocessamento" e depois em "Dissolver" (Figura 2.42).

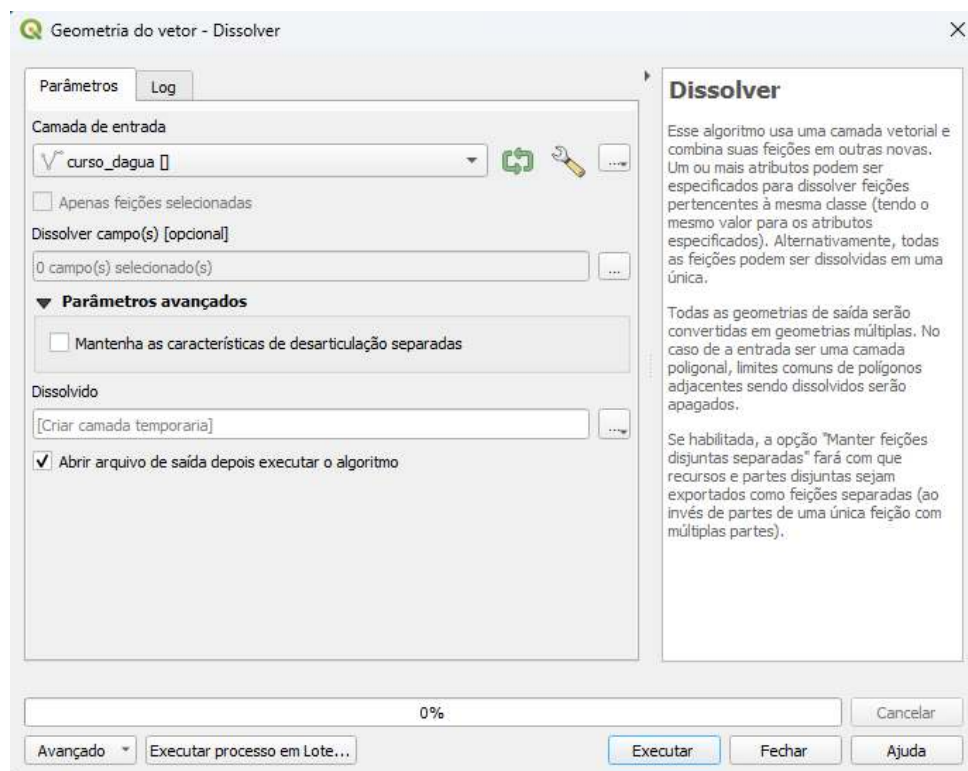
Com isso, selecione em "Camada de entrada" o shape do curso d'água, salve o arquivo dissolvido em uma pasta adequada (três pontos ao lado da caixa do "Dissolvido") e clique em "Executar".

Figura 2.42 – Juntando os trechos para transformá-los em um único *shape*.



Fonte: Próprios autores.

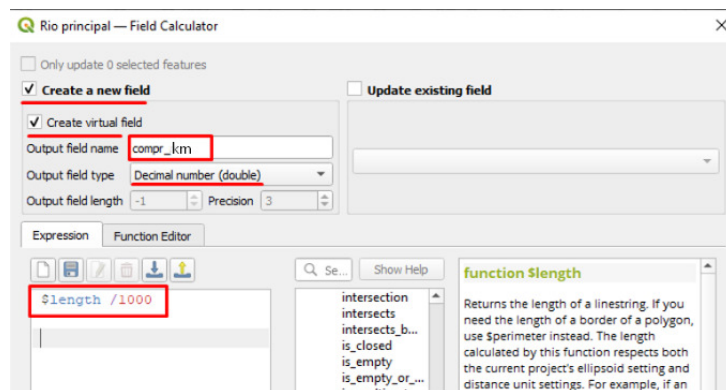
Figura 2.43 – Dissolvendo o *shape*.



Fonte: Próprios autores.

Após isso, realiza-se o mesmo processo do item de cálculo de **Área da bacia**, selecionando a camada recém-criada do rio principal e clicando no "ábaco" na barra de ferramentas, mudando-se somente a propriedade para " $\$ length/1000$ ", em quilômetros, conforme a Figura (2.44).

Figura 2.44 – Configurando para descobrir o comprimento.



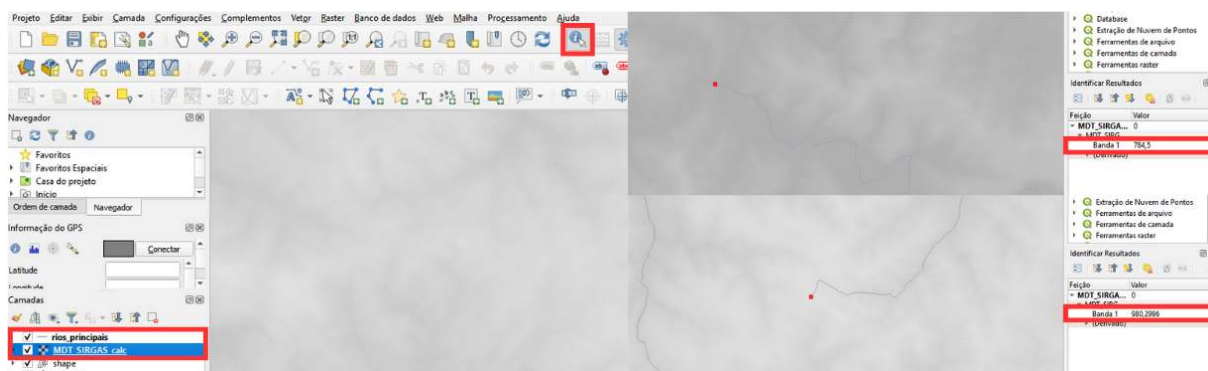
Fonte: Próprios autores.

Declividade Média

A declividade média de um rio, como apresentada no Item 2.1.3, é a relação entre a diferença de cotas e o comprimento do rio (Equação 2.1). Para descobrir as medidas de cotas, é preciso estar com a camada do MDT selecionada e clicar no ícone *i* da barra de ferramentas e, posteriormente, nos pontos de interesse (isto é, a jusante e a montante do rio). Neste caso, encontrou-se uma cota mínima de 784,5 m e uma cota máxima de 980,3 m (Figura 2.45). Dessa forma, para o cálculo da declividade média da bacia, deve-se substituir os valores encontrados das cotas e do comprimento, os quais já estão nas unidades de medida corretas, conforme

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} = \frac{980,3 - 784,5}{41094,022} = 0,00476 \text{ m/m.} \quad (2.4)$$

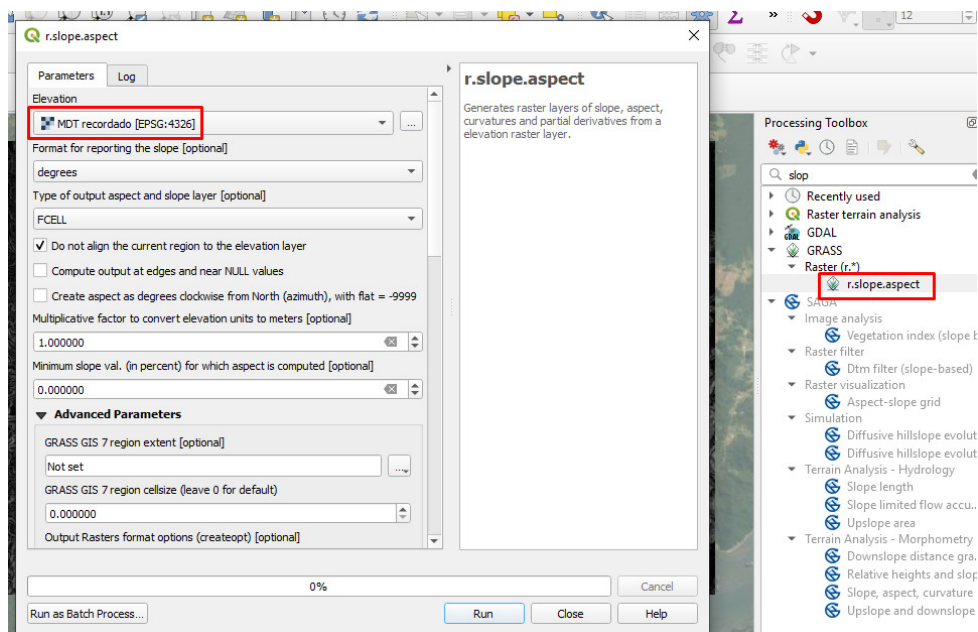
Figura 2.45 – Procurando as cotas máximas para efetuar a declividade média. Na imagem, tem-se a cota máxima utilizada para o cálculo.



Fonte: Próprios autores.

Para gerar o **raster de declividades da bacia** do rio Negrinho, é necessário abrir a "Caixa de Ferramentas" e pesquisar por "*r.slope.aspect*". Nesse caso, a camada de entrada será o "MDT recortado", conforme a delimitação da bacia (Figura 2.46).

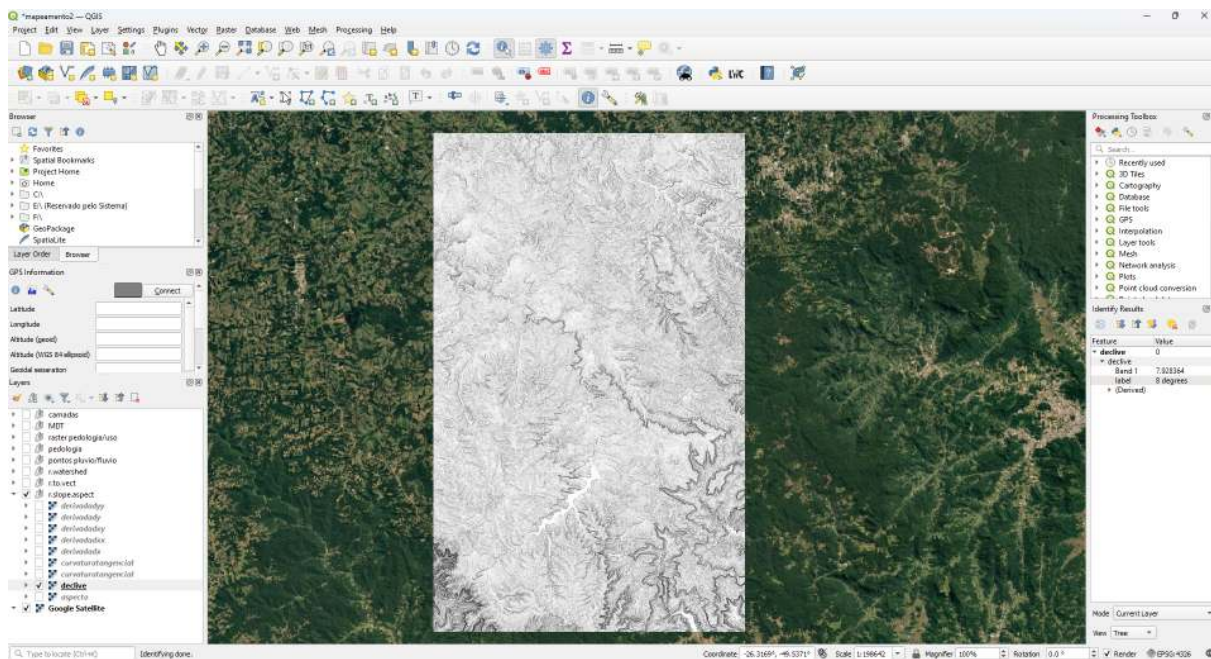
Figura 2.46 – Configurando para descobrir as declividades da bacia do Rio Negrinho-SC.



Fonte: Próprios autores.

Note que é possível definir o formato que se deseja obter a declividade, em graus ou %. Com os *rasters* formados (clique nos três pontos no tipo de *raster* de interesse para definir a posição e o nome do novo raster) e ative a camada de interesse, como mostrado na Figura (2.47).

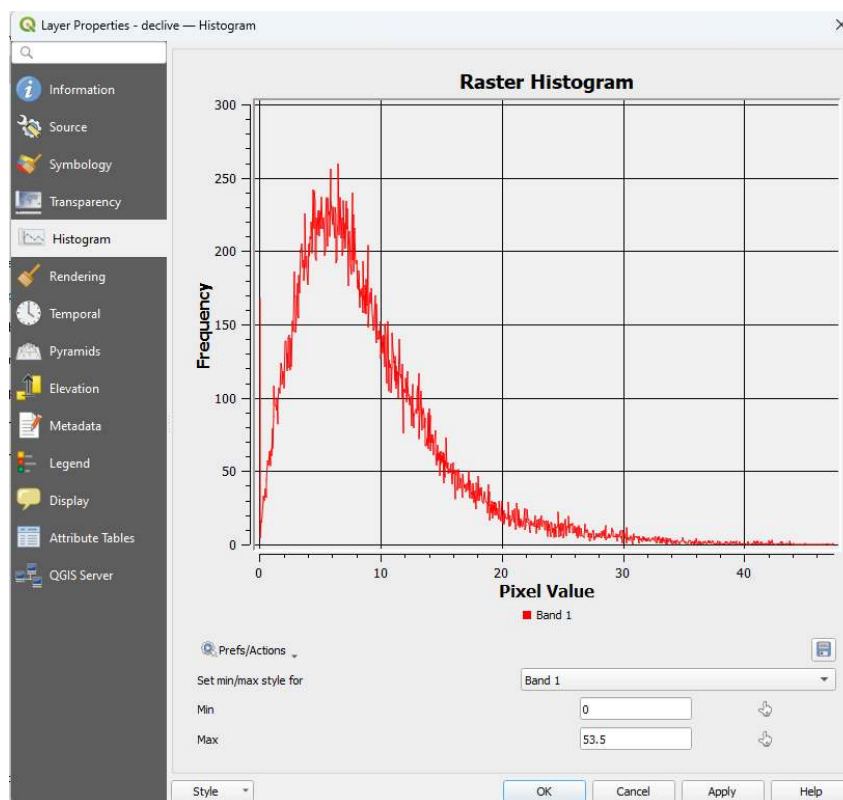
Figura 2.47 – Raster de declividades da bacia do Rio Negrinho-SC.



Fonte: Próprios autores.

Uma forma de observar os resultados de declividade da bacia é através do histograma. Para isso, clique duas vezes em cima da camada em questão, depois, vá para "*Propriedades*" e selecione a opção "Histograma" para ver o comportamento do gráfico com relação às inclinações (Figura 2.48). Neste caso, nota-se que a maioria das declividades do relevo analisado é baixa, mas também é possível perceber a presença do início da serra catarinense pela frequência de declividades maiores. Este procedimento é interessante para visualização, porém não mostra o valor exato da declividade média da bacia.

Figura 2.48 – Histograma de declividades da bacia do Rio Negrinho-SC.



Fonte: Próprios autores.

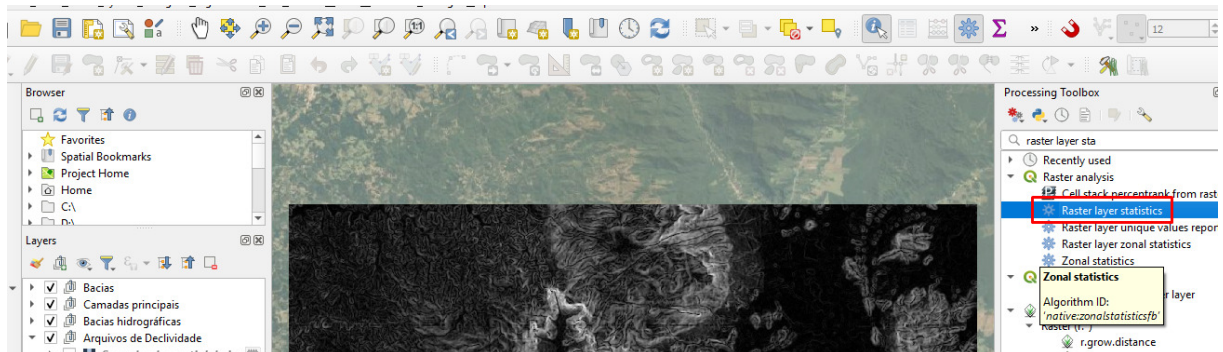
Para obter a declividade média da bacia, deve-se cortar o *raster* pela camada máscara para que apenas a bacia seja avaliada (*Raster* > Extrair > Recortar *raster* pela camada de máscara > insere-se o *raster* de declividade gerado e o *shape* com o formato da bacia > Execute)¹. Além disso, deve-se ir até a "Caixa de ferramentas", pesquisar por "Estatísticas da camada *raster*" (Figura 2.49), clicar nela e, em seguida, colocar como "Camada de entrada" o *raster* de "Declividade" criado há pouco (Figura 2.50). A partir disso, clica-se nas estatísticas que aparecerão ao lado direito da tela para observar os resultados. No caso desta bacia, descobriu-se um valor de 10,1756° para a declividade média da bacia hidrográfica (Figura 2.51). Como este valor será utilizado para cálculos futuros, é interessante deixá-lo em uma unidade de medida

¹ Caso ocorra algum problema nesse procedimento, pode-se ir na "Caixa de Ferramentas» procurar por "Consertar geometrias" ou ainda "Verificar validação..." e consertar possíveis erros para obter o *raster* da declividade no formato da bacia.

mais adequada para as equações, neste caso, m/m. Para isso, basta fazer uma simples tangente do ângulo encontrado em graus. Isto é,

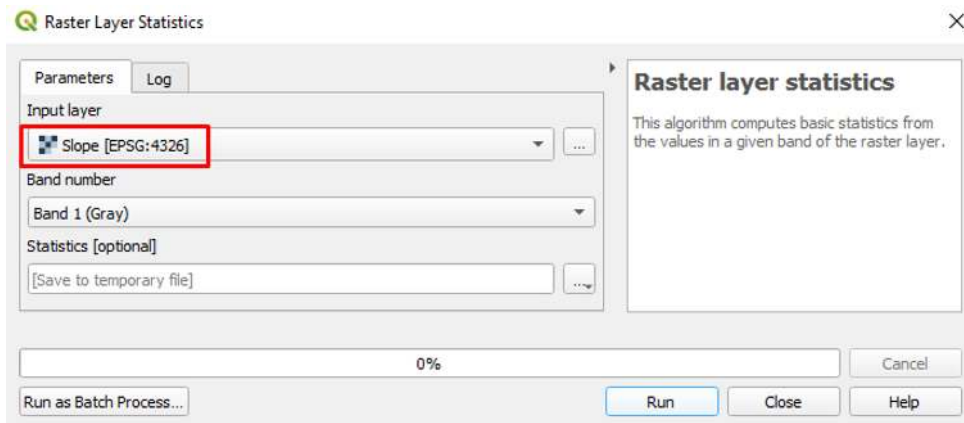
$$\text{tangente}(10,1756^\circ) = 0,1795 \text{ m/m.}$$

Figura 2.49 – Acessando as "Estatísticas da camada raster".



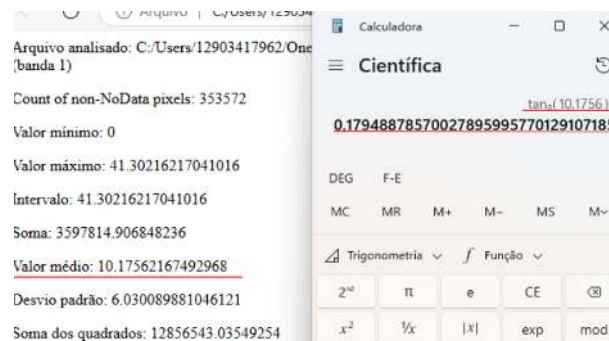
Fonte: Próprios autores.

Figura 2.50 – Configurando para descobrir as estatísticas da camada de declividades.



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.51 – Resultado da declividade média da bacia.



Fonte: Próprios autores.

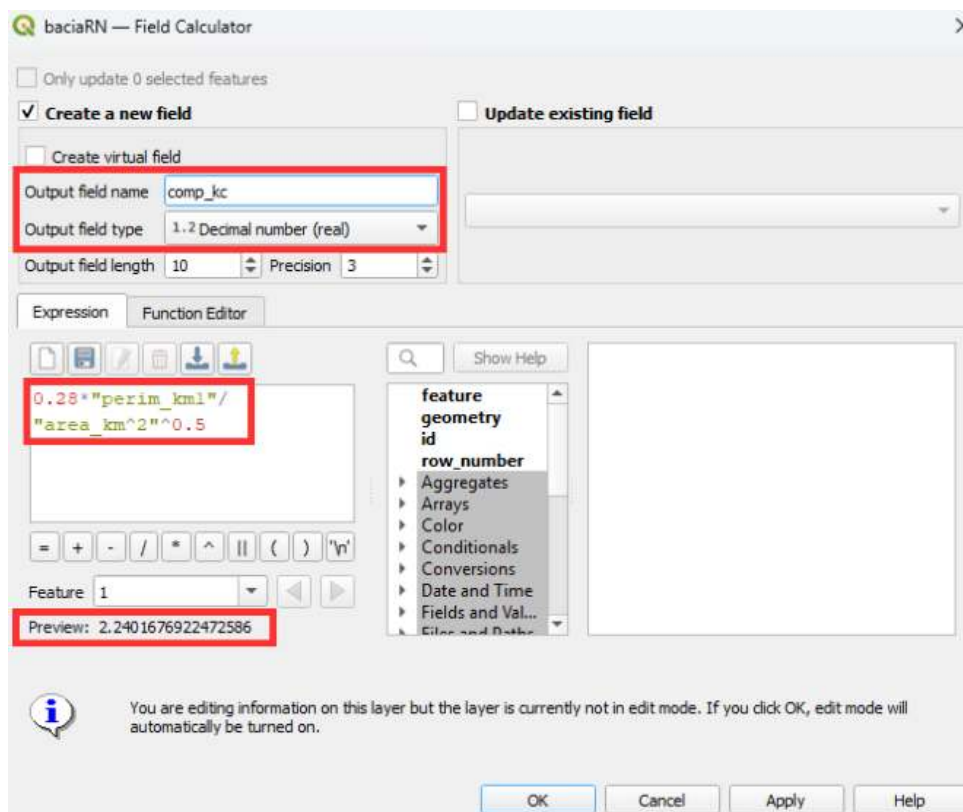
Forma da Bacia

Para o cálculo da forma da bacia, utiliza-se o "Índice de Gravelius" ou "Coeficiente de Compacidade" (K_c), a fim de analisar a resposta hidrológica de nossas bacias, como descrito anteriormente no Item 2.1.5, utilizamos a fórmula

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 \frac{138,990}{\sqrt{301,802}} = 2,240. \quad (2.5)$$

Para realizar este cálculo diretamente pelo QGIS, clica-se no *shape* da bacia com o botão direito e na tabela de atributos, acesse a calculadora (ícone de "ábaco"), com a área (Item 2.3.3) e o perímetro já obtidos, como feitos nas etapas já vistas, realiza-se o cálculo conforme a Equação 2.5 ($0.28 * \text{"perimetro"} / \text{"area"} ^ 0.5$) (Figura 2.52).

Figura 2.52 – Configurações para encontrar o coeficiente de compacidade.



Fonte: Próprios autores.

2.3.4 Recorte do MDT da região de interesse

Para dar prosseguimento ao processo de mapeamento de perigo de inundação, deve-se dispor do MDT da área de interesse a ser estudada, onde efetivamente a inundação será mapeada. Diversas formas de obter essas informações são apresentadas no Apêndice B.

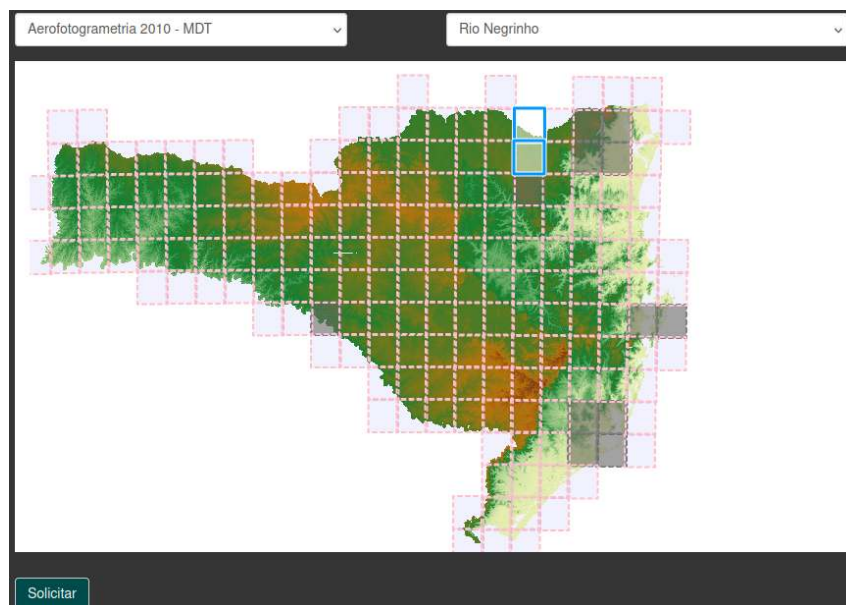
Para obter o MDT da área inundável a ser trabalhada, é interessante processar o MDT encontrado, pois, geralmente, os arquivos originais possuem uma área muito maior (ou menor) do que a de interesse, o que torna o processamento dos dados inadequado.

Nesta etapa, é importante escolher um MDT com a melhor resolução. No presente exemplo, utilizaremos o banco de dados do Estado de Santa Catarina, pelo SIGSC, que possui resolução com malha de $1 \times 1 m^2$. Para selecionar a região urbana central de Rio Negrinho, que é o local de interesse de nosso estudo, no site do SIGSC, selecione as regiões e faça o download, como indicado na Figura 2.53. A nomenclatura dos dados é:

- Modelo Digital de Terreno SG-22-Z-A-III-2, e;
- Modelo Digital de Terreno SG-22-Z-A-III-4.

Estes dados são bastante grandes (entre 0,6 e 2,1 GB), então o **download** pode demorar. Retire do ".zip" os arquivos baixados.

Figura 2.53 – Seleção (em azul) das regiões para download no SIGSC.



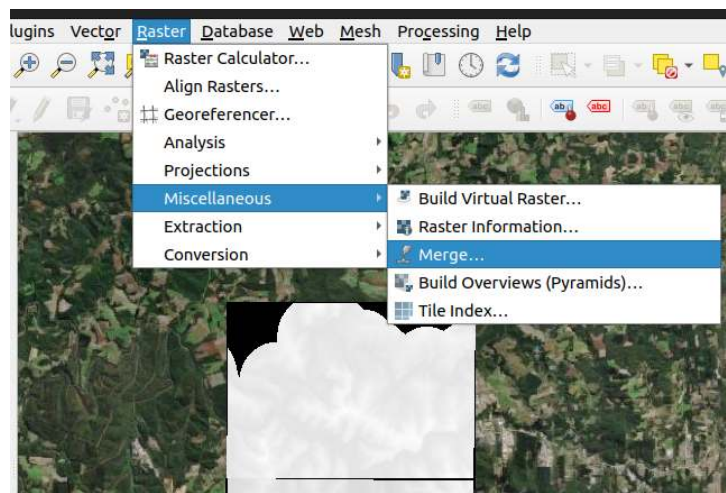
Fonte: Próprios autores.

No QGIS, a região de interesse é demarcada pelos arquivos:

- MDT_SG-22-Z-A-III-2-SE-F, e;
- MDT_SG-22-Z-A-III-4-NE-B.

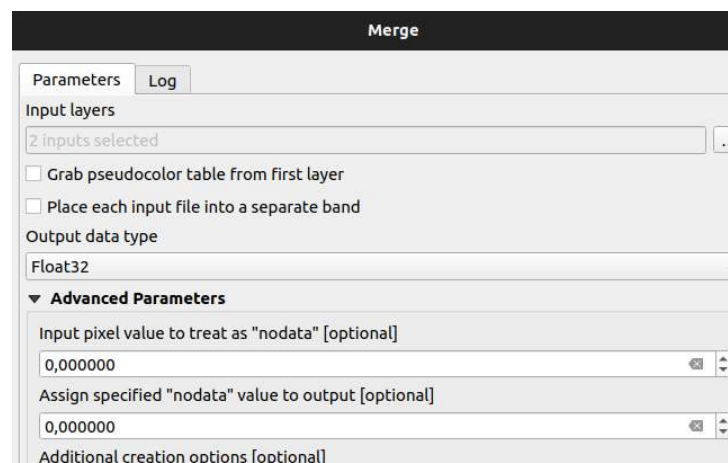
Assim, abra estes arquivos no QGIS. Unifique os arquivos acessando a aba Raster» Miscelânea» Mosaico... (Figura 2.54). Dentro da ferramenta, selecione em "Camadas de entrada" os MDTs e em "Parâmetros Avançados»> "Tratar valor de pixel de entrada como "sem dados coloque o valor de zero, assim como no item inferior (Figura 2.55). Assim, a unificação ocorrerá da forma adequada, sem sobrepor os valores dos contornos em preto de cada MDT. Posteriormente, salve o arquivo em um local adequado (três pontos na caixa do "Mesclado") e execute a ferramenta.

Figura 2.54 – Acesso à ferramenta "Merge".



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.55 – Utilização da ferramenta "Merge".



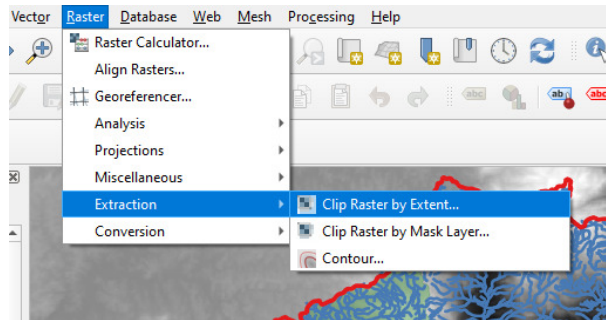
Fonte: Próprios autores.

Agora recortaremos o MDT unificado para a área de interesse.

- Na barra superior de tarefas, clique em *Raster » Extrair » Recortar raster pela extensão* (Figura 2.56). Após selecionar a opção, desenha-se a extensão desejada na tela do QGIS utilizando a opção "Extensão de recorte" escolhendo a última opção mostrada ao clicar

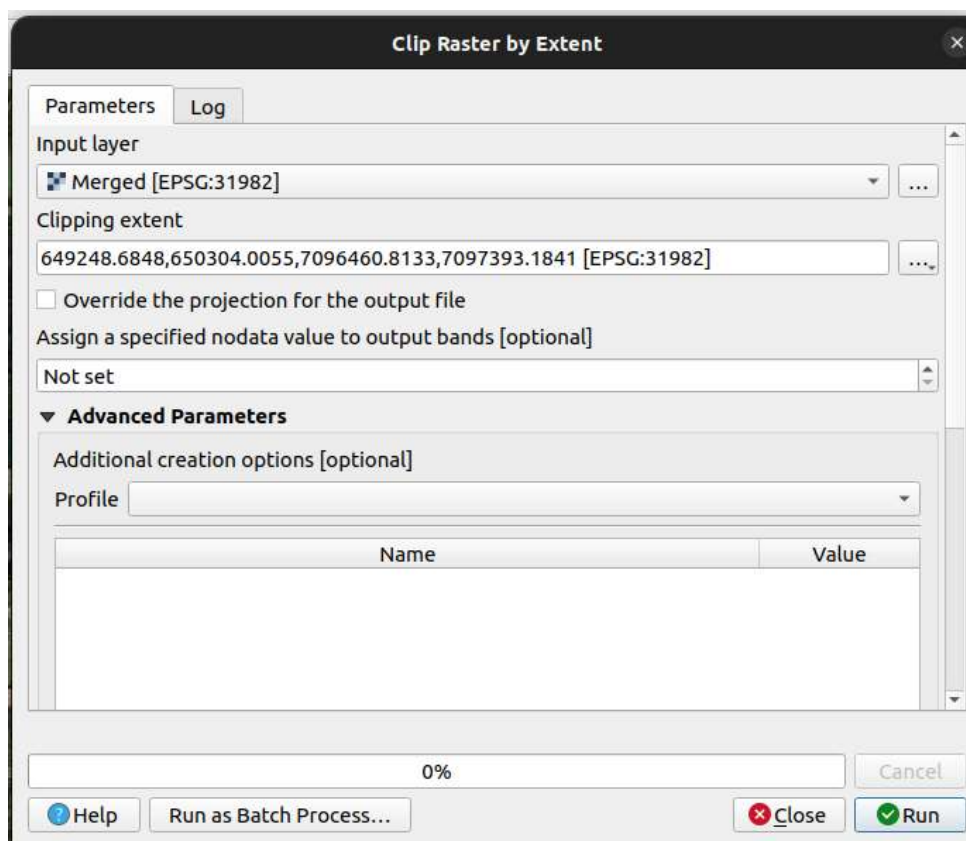
nas reticências no canto direito (Figura 2.57) (valores em EPSG 31982 extraídos neste exemplo: 649248.6848,650304.0055,7096460.8133,7097393.1841), por fim, selecione uma pasta para o arquivo criado (três pontos em "Recortado") e execute.

Figura 2.56 – Selecionando o caminho para o corte.



Fonte: Próprios autores.

Figura 2.57 – Recortando o raster.



Fonte: Próprios autores.

Finalmente, temos um arquivo que será utilizado na etapa de Modelagem Hidrodinâmica em que o escoamento da inundação será simulado.

3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

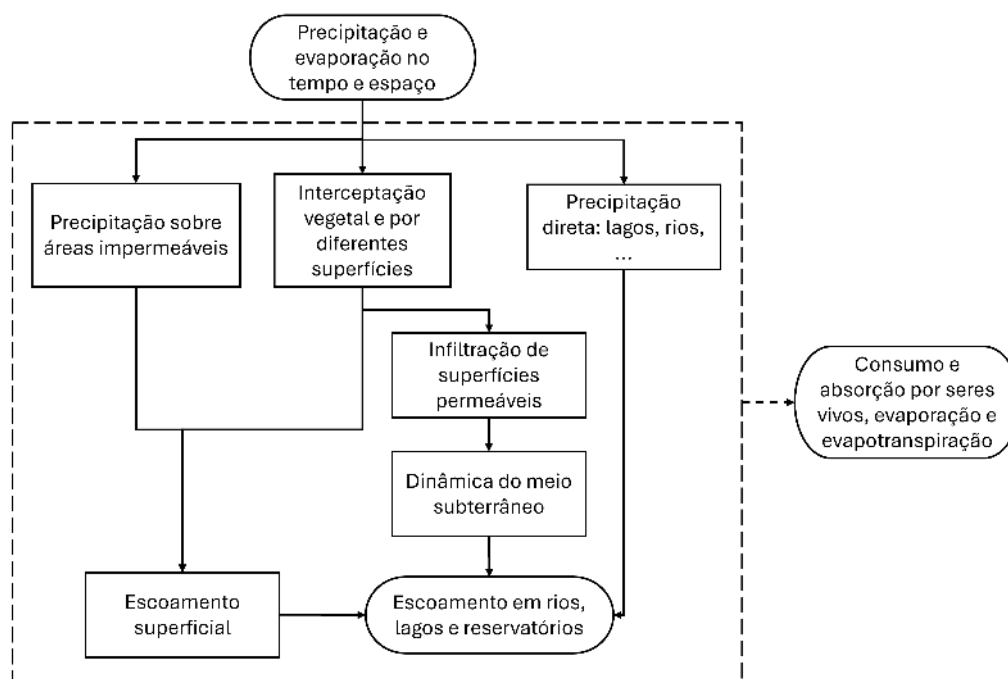
LEONARDO ROMERO MONTEIRO

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

Objetivo do capítulo: apresentar conceitos básicos e aplicações voltadas à modelagem hidrológica para o MPI.

Na hidrologia, estuda-se o ciclo hidrológico ou alguma parte específica desse ciclo. Assim, a maioria dos modelos hidrológicos, dos que são modelos matemáticos, representa parte do ciclo hidrológico utilizando formulações matemáticas. Assim, temos: **modelos de balanço hídrico** que avaliam entradas e saídas de água em uma bacia; **modelos de gestão de recursos hídricos** que focam no planejamento e na operação de reservatórios e sistemas hídricos; **modelos de chuva-vazão**, que representam como a precipitação que ocorre em uma bacia hidrográfica influencia a geração de vazão em um exutório; entre outros tipos de modelos. A compreensão geral de como os processos hidrológicos estão conectados é representada pelo esquema apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma dos modelos hidrológicos.



Fonte: Próprios autores

A modelagem hidrológica é uma ferramenta que pode ter diversos fins, desde verificar a consistência dos dados observados (obtidos pelo uso de alguma ferramenta de medição em

campo) até representar o comportamento da bacia hidrográfica em situações passadas, atuais, prever condições futuras ou, ainda, fazer a avaliação de possíveis cenários. Independentemente do seu uso, a modelagem hidrológica requer dados hidrológicos confiáveis que possibilitem os procedimentos de calibração e validação, além da representação das situações de interesse. Para uma compreensão mais ampla do que são dados hidrológicos, aconselha-se a leitura da referência [Vanelli et al. \[2020\]](#).

3.1 CLASSIFICAÇÃO

Cada modelo é classificado por diversas características, podendo representar o tipo de procedimento de cálculo, os dados de entrada e os resultados apresentados. Não existem classes de modelos melhores ou piores, pois tudo depende da sua aplicação. A seguir, são apresentadas as principais classificações dos modelos hidrológicos.

- Determinístico × Estocástico;

No modelo *determinístico*, os resultados não se comportam por probabilidades, pois a aleatoriedade não é utilizada diretamente nos equacionamentos do modelo. Já em modelos *estocásticos*, existem parâmetros que inferem aleatoriedade à simulação e os resultados devem ser analisados de forma probabilística.

- Conceitual (Fisicamente Conceitual) × Empírico;

No modelo *conceitual*, os aspectos naturais (físicos, químicos ou biológicos) são considerados como as características predominantes que se relacionam com o processo hidrológico, sendo necessárias para obter o resultado do modelo. No modelo *empírico*, também conhecido como "caixa-preta", os dados passam por operações matemáticas que não representam leis ou princípios reais (físicos). Estas equações são criadas utilizando análises estatísticas e de probabilidades. Os modelos empíricos são utilizados para tratar fenômenos muito complexos que seriam difíceis de serem abordados conceitualmente. Ainda, existem modelos que utilizam tanto a abordagem conceitual quanto a empírica. Estes modelos podem ser chamados de *semi-empíricos* ou *semi-conceituais*, ou simplesmente *conceituais e empíricos*.

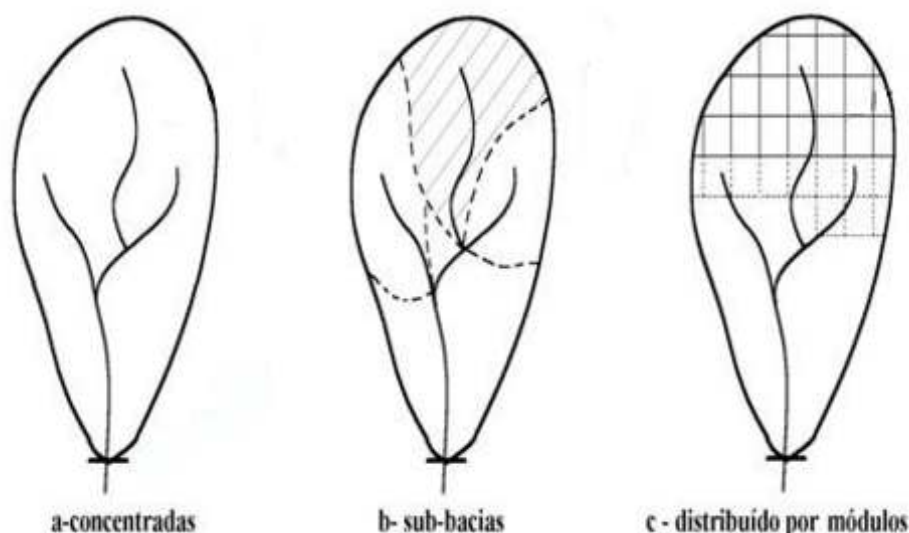
- Eventual × Contínuo;

Na modelagem hidrológica, o modelo *eventual* simula um período curto (um evento de chuva), que pode durar horas ou dias. Já, no modelo *contínuo*, períodos longos são simulados agregando mais de um evento chuvoso à simulação. Os modelos contínuos são amplamente utilizados ao acoplar o modelo hidrológico a um modelo meteorológico.

- Concentrado × Distribuído;

O modelo *concentrado* é aquele que não considera a variabilidade espacial das variáveis de entrada, saída ou parâmetros, utilizando apenas valores médios para uma bacia. No modelo *distribuído*, a área da bacia é subdividida em células menores, fazendo com que os parâmetros, os dados de entrada e de saída apresentem variação espacial bidimensional. Nota-se que, para o segundo caso, os modelos devem considerar as variações espaciais das variáveis. Também existem os *sistemas de modelos concentrados* que, por sua vez, dividem a bacia em sub-bacias menores e modelos concentrados são aplicados a estas bacias que podem possuir características diferentes umas das outras. Os hidrogramas das sub-bacias devem ser considerados para se obter um hidrograma único, referente a bacia de estudo (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Discretização de bacias. a- representa um modelo concentrado, b- representa um modelo concentrado, mas dividido em sub-bacias, e c- representa um modelo distribuído por malha.



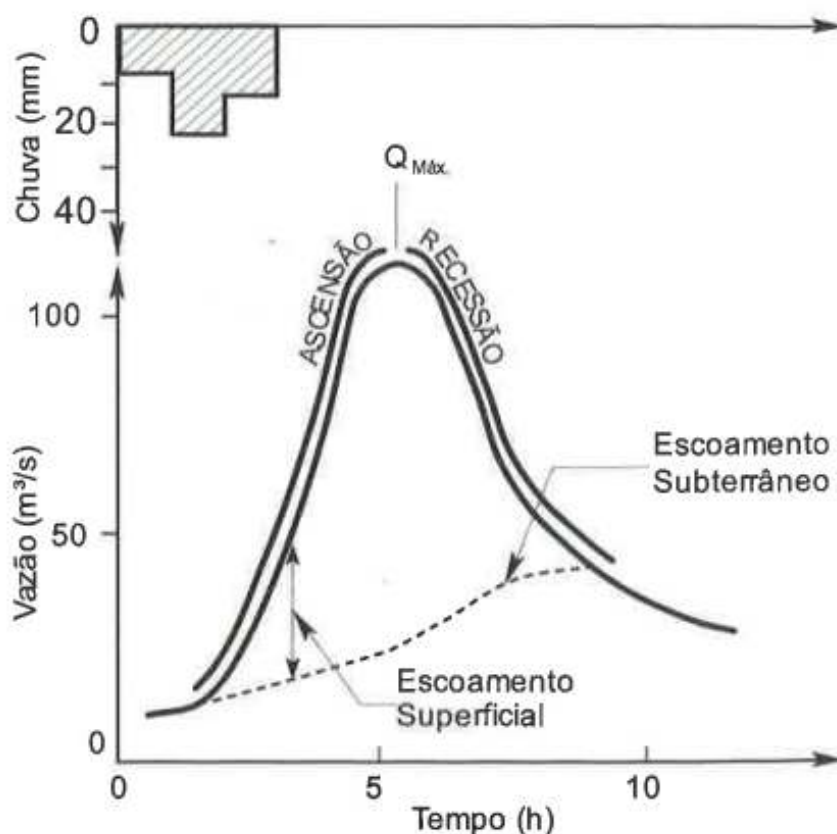
Fonte: Tucci et al. [1993].

3.2 MODELO CHUVA-VAZÃO

Um modelo chuva-vazão é um tipo de modelo hidrológico que fornece a vazão do exutório da bacia hidrográfica em estudo, considerando uma precipitação total (seja ela medida, de projeto ou prevista) aplicada a esta bacia hidrográfica, levando em conta as perdas que esta precipitação sofre para se tornar precipitação efetiva, além das contribuições de escoamento de base. Neste tipo de modelo, geralmente, a vazão é apresentada no formato de um hidrograma, onde é possível identificar características como ascensão, recessão e pico de vazão (Figura 3.3). Esta vazão gerada pelo modelo está atrelada a uma seção transversal de rio. Os modelos chuva-vazão são geralmente formados por um conjunto de modelos que representam partes menores

do ciclo hidrológico, como os modelos de precipitação total, precipitação efetiva, transformação da precipitação em escoamento superficial, de escoamento básico e de evapotranspiração.

Figura 3.3 – Características do hidrograma.

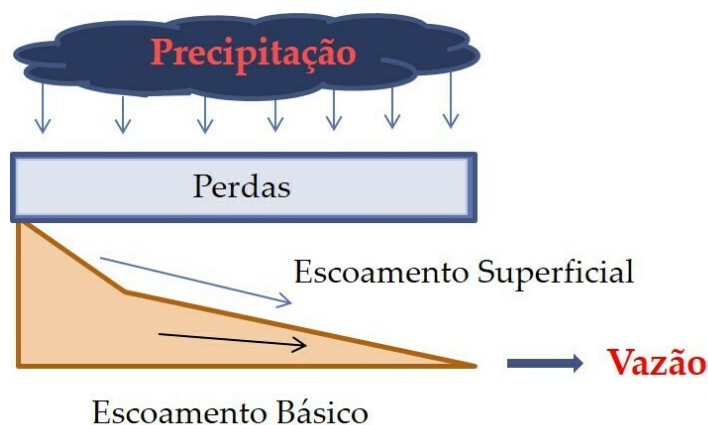


Fonte: Collischonn and Dornelles [2013].

Para o procedimento de mapeamento de perigo de inundação, utilizaremos o modelo hidrológico chuva-vazão para criar vazões de projeto a partir de chuvas de projeto. Estas vazões de projeto são utilizadas posteriormente no modelo hidrodinâmico para efetivar a propagação do escoamento na região de interesse. Para se ter uma compreensão mais ampla sobre modelagem na área da hidrologia e da hidráulica, aconselha-se a leitura do Apêndice D.

Qualquer modelo hidrológico chuva-vazão pode ser utilizado para a presente metodologia, desde que ele seja adequado para a bacia de estudo, pois o objetivo principal deste procedimento é exclusivamente obter os hidrogramas de projeto. Aconselha-se utilizar modelos que levem em consideração ao menos os processos de infiltração, de escoamento superficial e de escoamento básico (Figura 3.4). Fenômenos que possuem importância em escala de tempo maior, como a evapotranspiração (ou apenas evaporação Savenije [2004]) não são considerados na aplicação do MPI, pois temos interesse em eventos chuvosos e curtos, em que a evapotranspiração não é relevante.

Figura 3.4 – Processos que compõem o modelo chuva-vazão utilizado nesta metodologia.



Fonte: Próprios autores.

Segundo Tucci [1998], as séries históricas de precipitações costumam ser mais longas do que as de vazão. Além disso, com a modificação das bacias pela construção de obras hidráulicas e alterações no uso do solo, as séries de vazões podem deixar de ser homogêneas ou estacionárias¹. Partindo da precipitação, é possível completar a série histórica de vazões desconhecidas ou estimá-las para os novos cenários existentes ou previstos para as bacias, utilizando a modelagem chuva-vazão.

A estrutura dos modelos hidrológicos chuva-vazão é dependente de como a bacia hidrográfica é considerada, que pode ser por modelo concentrado, distribuído por sub-bacias ou por módulos. Nesse tipo de modelo, os processos hidrológicos são geralmente representados por modelos distintos que trabalham de forma acoplada, nos quais os processos representados são:

- **Precipitação Total:** Representa a precipitação que ocorreu em um evento de chuva antes de atingir a superfície da bacia hidrográfica. Geralmente, essas informações podem ser medidas ou, ainda, estimadas a partir de metodologias, como, por exemplo, a chuva de projeto.
- **Precipitação Efetiva/Processo de Perdas:** Assim que a precipitação alcança a superfície da bacia hidrográfica, parte de seu volume é retida (processo denominado de "perda") e parte da chuva efetivamente escoar pela superfície do solo, denominada de "precipitação efetiva".
- **Transformada do Escoamento:** Processo de transformar a precipitação efetiva que atingiu o solo em vazão do escoamento superficial. As características físicas da bacia hidrográfica fazem com que a chuva chegue mais rapidamente ou mais lentamente a um rio. Este processo modifica o formato que o hidrograma terá.

¹ De fato, nem as precipitações são consideradas como estacionárias devido à influência das mudanças climáticas. Infelizmente, este assunto está além do escopo do presente documento.

- Escoamento Base: Escoamento geralmente alimentado por águas subterrâneas que contribui para o escoamento em rios, mesmo em períodos sem chuva.

Outros processos podem ser modelados, dependendo da complexidade que se deseja representar.

3.2.1 Tempo de concentração

O tempo de concentração é uma característica hidrológica de uma bacia hidrográfica. Este é um dos tempos de resposta da bacia hidrográfica mais utilizados no cálculo de chuvas e hidrogramas de projeto. É um parâmetro hidrológico difícil de ser estabelecido com exatidão porque se baseia em conceitos abstratos, impossíveis de ocorrer na realidade.

Para [Collischonn and Dornelles \[2013\]](#), o tempo de concentração define-se como "*o tempo de viagem da gota de água da chuva que atinge a região mais remota da bacia, desde o início de seu escoamento até o momento em que atinge o exutório*". Assim, por ser um conceito abstrato, pois não é possível encontrar a gota mais remota da bacia e segui-la até o exutório. Temos a ideia também de que a gota mais remota seria a última a chegar no exutório, o que, de fato, não é verdade. Este tempo representaria, virtualmente, o tempo a partir do qual todo o escoamento superficial da bacia hidrográfica estaria contribuindo para a geração de vazão no exutório.

O tempo de concentração não pode ser medido diretamente, necessitando de estratégias para sua medição indireta. Quando se conhece bem a relação precipitação-vazão, é mais fácil estimar o tempo de concentração a partir de relações empíricas. Na ausência desses dados, podem ser aplicadas fórmulas empíricas pré-concebidas, respeitando suas limitações.

Normalmente, este parâmetro é estimado a partir das características geomorfológicas da bacia hidrográfica. Para isso, existem diversas equações empíricas (Tabela 3.1) resultantes de diferentes análises em bacias com determinadas características e em condições diferentes. Desse modo, a escolha de uma equação deve ser baseada na observação das características da bacia em estudo e nas condições para as quais as formulações foram desenvolvidas [[Collischonn and Dornelles, 2013](#)]. Outra sugestão na seleção da equação de tempo de concentração é o artigo de [Silveira \[2005\]](#), onde foi avaliado o desempenho de 23 fórmulas de tempo de concentração, com base em dois arquivos teste, um com 29 bacias rurais e outro com 32 bacias urbanas.

Tabela 3.1 – Equações de tempo de concentração.
(CONTINUA)

Nome	Equações	Observações
Kirpich [Mota and Kobiyama, 2015]	$t_c = 9,67 \cdot 10^{-5} L^{0,798} S^{-0,399}$ Sendo: t_c o tempo de concentração, em horas, L o comprimento da bacia medido ao longo do curso d'água a partir da exutória até o ponto mais elevado da bacia, em milhas, e S a declividade do curso de água, calculado como H/L, adimensional.	Desenvolvida com dados de sete pequenas bacias rurais do Tennessee com declividades variando de 3 a 10% e áreas de, no máximo, $0,5 \text{ km}^2$. Quando o valor de L é superior a 10 km, a fórmula parece subestimar o valor de t_c [Franco and Fill, 2004].
Ven Te Chow (1962) [Chow et al., 1962]	$t_c = 0,160 L^{0,64} S^{-0,32}$ Sendo: t_c o tempo de concentração, em horas, L o comprimento do rio principal, em km, e S declividade do mesmo, adimensional.	Esta equação se baseia em dados coletados de 20 bacias hidrográficas rurais e é recomendada para áreas variando entre 1,1 e 19 km^2 .
IPH II (1998) [Germano et al., 1998]	$t_c = 18,628 \frac{L^{0,882}}{A_i^{0,272}}$ Sendo: t_c o tempo de concentração, em minutos, L o comprimento do talvegue, em km, e A_i a taxa de impermeabilização da bacia, em %.	Equação utilizada para bacias Urbanas com área de drenagem variando de 2,5 a 137 km^2 .
SCS Lag (1975) [Franco and Fill, 2004]	$t_c = 0,057 L^{0,8} \left[\left(\frac{1000}{CN} \right) - 9 \right]^{0,7} S^{-0,5}$ Sendo: t_c o tempo de concentração, em horas, L o comprimento do rio principal, em km, CN o número de deflúvio, adimensional, e S a declividade do curso d'água, em m/m.	A fórmula do SCS foi desenvolvida em bacias rurais com áreas de drenagem de até 8 km^2 , mas também pode ser utilizado para bacias urbanas. O SCS sugere procedimentos para ajuste em função da área impermeabilizada e da parcela dos canais que sofreram modificações. Essa fórmula costuma superestimar o valor de t_c em comparação com as expressões de Kirpich.

Tabela 3.1 – Equações de tempo de concentração.
(CONCLUSÃO)

Nome	Equações	Observações
Dooge (1956) [Silveira, 2005]	$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}}$ Sendo: t_c o tempo de concentração, min., A a área da bacia, em km^2, S a declividade do talvegue, adimensional.	Tem como base dados de dez bacias rurais da Irlanda, com áreas na faixa com áreas compreendidas entre 140 e 930 km^2 . Geralmente aplicado a bacias hidrográficas rurais.
Califórnia <i>Culverts Practice</i> (1942) [Franco and Fill, 2004]	$t_c = 57,0 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{para } A \leq 0,5 \text{ km}^2$ ou $t_c = 85,2 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{para } A > 1,0 \text{ km}^2$ Sendo: t_c o tempo de concentração, min., L o comprimento do talvegue, em km, e H o desnível total do talvegue, em m.	Aplicam-se as mesmas limitações de Kirpich, ou seja, declividades de 3 e 10%. A adaptação para maiores áreas foi feita pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. Geralmente é aplicada em bacias rurais, embora, na prática, tem sido usada para áreas maiores dentro da aplicabilidade do método racional.

3.2.2 Precipitação

A precipitação é entendida, em hidrologia, como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Dentre as formas de precipitação, a chuva é um dos principais fenômenos nos estudos hidrológicos, já que tem a capacidade de produzir escoamento rapidamente devido à sua fluidez e capacidade de gerar grandes volumes. No caso do Brasil, a chuva é o tipo de precipitação predominante, sendo quase nula a ocorrência dos outros tipos, se comparados a esta. Por este motivo, a chuva será o único fenômeno de precipitação estudado neste texto.

Na avaliação do balanço hídrico de inundações, a precipitação é geralmente a principal entrada de massa, com exceção daquelas situações em que a inundação não é causada por precipitação, como na quebra de barragem devido a uma falha estrutural grave. Devido ao seu comportamento complexo, a precipitação é um dos principais fenômenos de estudo da hidrologia, uma vez que a dificuldade de sua previsão é um dos fatores cruciais na preparação da sociedade para as inundações, o que leva à ocorrência de desastres.

As precipitações consideradas no modelo chuva-vazão podem ser precipitações **medidas**, de **projeto**, **previstas** ou **hipotéticas**. A seguir, será realizada uma explanação sobre cada um desses tipos.

As **precipitações previstas** são obtidas de modelos meteorológicos e são utilizadas na previsão de eventos provocados pela chuva, por exemplo, a inundação. Já as **precipitações hipotéticas** são dados criados para representar algum caso ou cenário desejado. Ainda que se possa criar mapas de inundação com essas precipitações, eles não são comumente utilizados para o procedimento do MPI. Entretanto, com o apoio do mapa de perigo de inundação, as precipitações previstas ou hipotéticas podem ser utilizadas para auxiliar na tomada de medidas preventivas ao evento.

A **precipitação medida** pode ser obtida mediante equipamentos que mensuram a precipitação pontualmente (pluviômetro e pluviógrafo) ou por satélites e radares. Para aumentar a veracidade das medições, estas devem passar por uma análise de consistência para encontrar possíveis falhas e, assim, fazer correções. Mais detalhes sobre estas análises podem ser encontrados em livros básicos de hidrologia como [Tucci et al. \[1993\]](#) e [Collischonn and Dornelles \[2013\]](#). Estes dados são extremamente importantes para o procedimento de MPI, sendo utilizados para a calibração e validação do modelo chuva-vazão e, às vezes, do modelo hidrodinâmico. Ainda, esses dados também são utilizados para a criação de Curvas e Equações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), empregadas para a elaboração de chuvas de projeto.

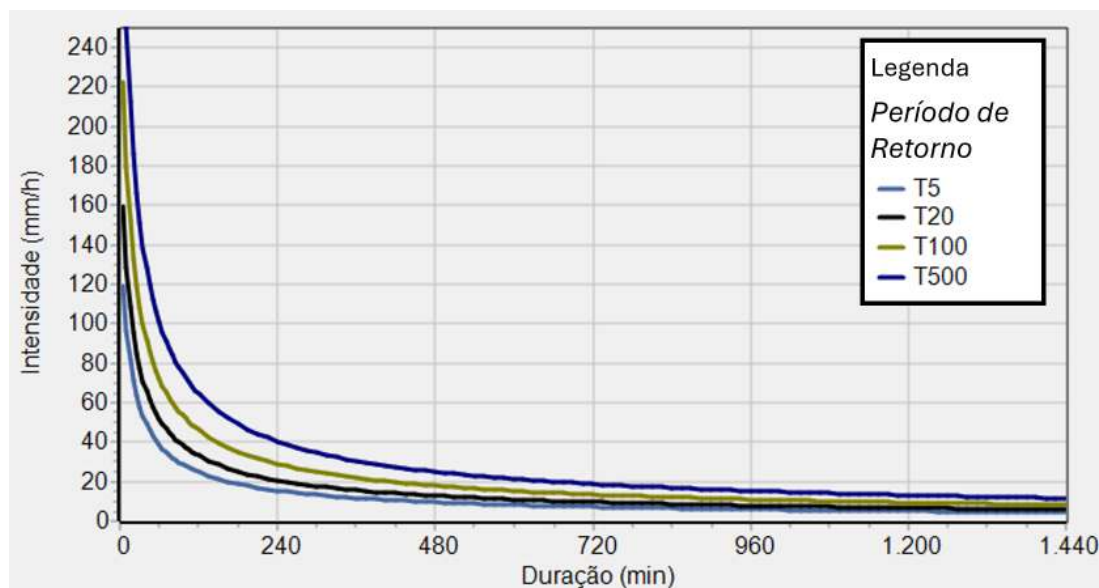
Já a **precipitação de projeto** é utilizada para se obter uma precipitação hipotética provável para realizar projetos, como de construção de sistemas de drenagem urbana, barragens e elaboração de mapas de inundação e de perigo de inundação. Estas precipitações são amplamente utilizadas, pois se pode definir o período de retorno desta precipitação. A seguir, são detalhadas as informações sobre este tipo de precipitação.

Precipitação de Projeto

A precipitação de projeto é utilizada para estimar uma precipitação hipotética provável para uma área de estudo. Para se obter esta precipitação, comumente utiliza-se: a equação IDF; alguma estratégia para estimar a distribuição temporal da precipitação, maneiras de considerar o efeito da distribuição espacial da precipitação, além do período de retorno e do tempo de duração da precipitação. Outra informação que pode auxiliar nesta tarefa é a distribuição espacial da precipitação.

Equação IDF: As equações IDF são ajustes das Curvas IDF (Figura 3.5) que são obtidas a partir de análises probabilísticas da série histórica de uma estação de precipitação, viabilizando a obtenção da relação de intensidade, duração e frequência da precipitação. São avaliadas as precipitações máximas anuais de uma série histórica suficientemente longa, usualmente, não menor do que 30 anos. Assim, as equações IDF são obtidas com o ajuste das curvas IDF, que pode ser realizado a partir do procedimento de linearização, através do uso de logaritmos e da utilização de regressão múltipla. Para mais detalhes sobre como obter uma Curva e uma equação IDF, recomenda-se o estudo em bibliografia especializada.

Figura 3.5 – Curvas IDF da Estação 02649055 (Corredeira - Rio Negrinho) obtida a partir do *software* HidroChuSC [Back, 2021].



Fonte: Os próprios autores.

As equações IDF podem ser facilmente aplicadas, normalmente na forma

$$i = \frac{k \cdot TR^m}{(t + b)^n}, \quad (3.1)$$

onde i é a intensidade (mm/h), TR é o período de retorno (*anos*), t é o tempo de precipitação (*minutos*) e k , m , b e n são coeficientes a serem determinados com base na curva IDF. Dependendo da forma como a equação IDF foi obtida, pode haver pequenas mudanças na equação 3.1, mas sempre com as variáveis independentes TR e t e com a variável dependente i . Comumente, a equação IDF possui um limite de utilização em relação ao tempo de duração do evento.

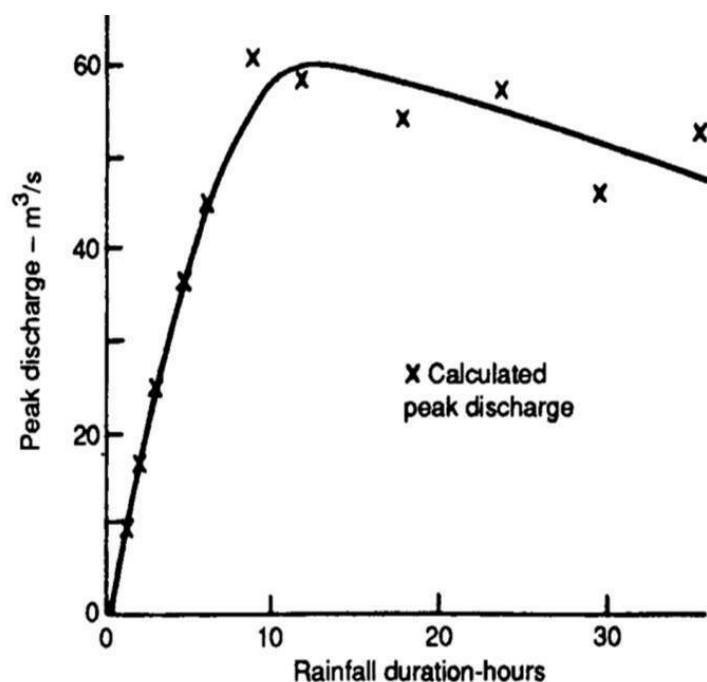
Nestas equações, a frequência é informada pelo período de retorno (ou tempo de retorno), calculado como $TR = 1/p$, onde p é a probabilidade de um fenômeno, neste caso, chuva, ocorrer ou ser superado em intensidade. Na criação do mapa de perigo, podem ser utilizados os períodos de retorno desejados, pois não existe uma metodologia padrão para tal Monteiro et al. [2021]. No caso do presente trabalho, são utilizados os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos, anos relacionados com as características do sistema de microdrenagem, macrodrenagem e segurança de construções, respectivamente Monteiro et al. [2021].

Visto que a equação IDF é um *modelo concentrado* utilizado para estimar a intensidade de uma precipitação, aconselha-se utilizar mais de uma quando se trabalha com bacias grandes e existe banco de dados para isso.

Duração Crítica: O tempo de duração da precipitação considerado na equação IDF deve ser o tempo de duração crítica, ou seja, o tempo de precipitação que causará a maior vazão de pico. Tucci et al. [1995] mencionam que, na utilização do Método Racional (modelo chuva-vazão

simplificado), adota-se como a chuva crítica de uma pequena bacia hidrográfica uma duração igual ao tempo de concentração da bacia, considerando que a precipitação efetiva tenha intensidade constante. Porém, para estudos mais detalhados, como no mapeamento de inundação, a duração crítica deve ser pesquisada aplicando-se diversos hietogramas de projeto, com durações crescentes ao modelo chuva-vazão, e analisando-se os resultados dos valores das vazões de pico e dos volumes dos hidrogramas gerados (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Duração de uma precipitação de projeto e a vazão de pico gerada.



Fonte: Maidment [1993]

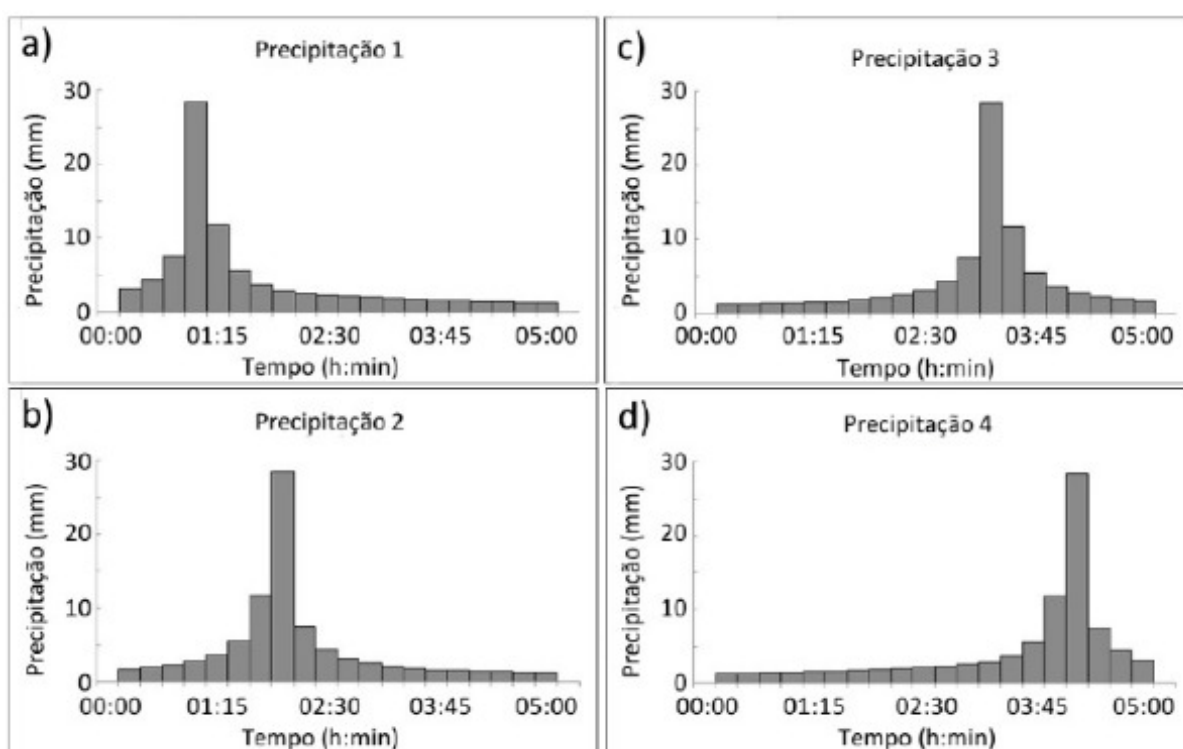
Analisando a equação 3.1, nota-se que a duração da precipitação está dividindo a equação, logo, quanto menor este tempo, maior é a intensidade. Assim, a duração crítica é o tempo ideal em que a intensidade e o volume precipitados, estimados por uma equação IDF, são grandes o suficiente para fornecer uma vazão mais drástica para um determinado período de retorno. Innocente et al. [2018] pesquisaram o tempo de duração crítica para o Campus principal da UFSC em Florianópolis/SC e apresentaram que o tempo de duração crítica foi de 3 a 4 vezes o tempo de concentração da bacia hidrográfica, mesmo sendo uma bacia pequena, evidenciando a importância da busca da duração crítica a partir de simulações hidrológicas.

Distribuição temporal e influência espacial: Como a equação IDF fornece apenas a intensidade para um evento chuvoso, é necessário também saber qual a variação temporal dessa intensidade durante o próprio evento chuvoso. Monteiro and Kobiya [2014] afirmam que quanto mais tardar a intensidade máxima do hietograma ocorrer, maior será a vazão de pico que este produzirá no modelo chuva-vazão e, conseqüentemente, maior será a importância nas inundações.

Existem diversos métodos de cálculo para realizar a distribuição temporal da precipitação de projeto a partir de uma intensidade média (fornecida pela IDF). Qualquer método pode ser utilizado, desde que seja adequado à área de estudo.

Um dos métodos mais empregados foi desenvolvido por Huff [1967], que classificou as chuvas de acordo com a maior porcentagem acumulada que ocorre em determinado período e, dessa forma, a maior intensidade, mediante quatro quadrantes, denominados "quartis" (Figura 3.7). É aconselhável utilizar o **quarto quartil** de Huff para realizar a distribuição temporal da precipitação Monteiro and Kobiyama [2014] (Figura 3.8).

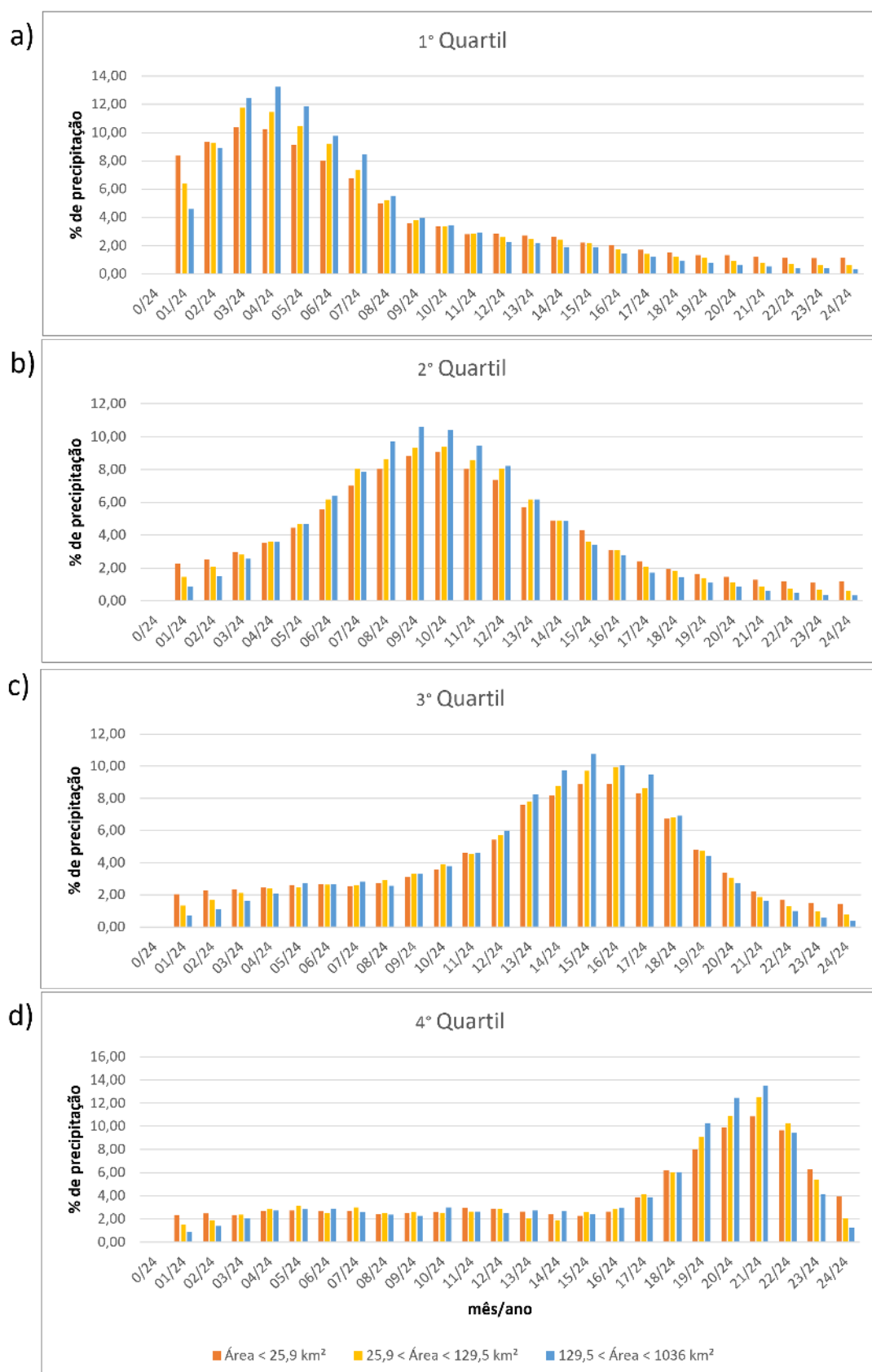
Figura 3.7 – Exemplo da distribuição temporal para o a) primeiro, b) segundo, c) terceiro e d) quarto quartil do método de Huff.



Fonte: Monteiro and Kobiyama [2014]

Huff and Angel [1989] apresentaram em seu estudo para o estado de Illinois (Estados Unidos da América) diferentes proposições de distribuição de chuva, considerando-se a área da bacia hidrográfica (tabelas no Apêndice C). Quanto maior for a bacia, maior é o valor máximo da intensidade da precipitação para todos os quartis (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Distribuição temporal de Huff [Huff and Angel, 1989] para diferentes áreas de bacia considerando a) o primeiro Quartil, b) o segundo Quartil, c) o terceiro Quartil, e d) o quarto Quartil.



Fonte: Os próprios autores.

No caso específico de se trabalhar com **dados observados** tem-se uma nova problemática, pois o processamento deste tipo de informação é diferente. No caso da **discretização temporal**, aconselha-se o uso de dados de chuva com um intervalo de medição de pelo menos um terço do tempo de concentração da bacia hidrográfica, para que o tempo de resposta do modelo seja condizente com o próprio tempo de resposta da bacia hidrográfica. De fato, isto é muito difícil de se conseguir para bacias hidrográficas pequenas, principalmente rurais, sendo aceitável o uso de dados diários para viabilizar os estudos, mas sabendo-se que o resultado pode apresentar limitações. Para considerar a distribuição espacial dos dados observados, devemos identificar a necessidade de utilizar mais de uma estação pluviométrica na análise e realizar procedimentos de espacialização da chuva². De acordo com a Organização Mundial de Meteorologia [WMO, 2008], devemos ter uma densidade de estações pluviométricas conforme a unidade fisiográfica que está sendo avaliada, para que a precipitação seja adequadamente representada (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Recomendação de densidade mínima de estações (área em km² por estação) por unidade fisiográfica. Sem gravação se refere a pluviômetros manuais, que não tem capacidade de medir intensidade e, com gravação se refere a pluviômetros automáticos.

Unidade Fisiográfica	Precipitação	
	sem gravação	com gravação
Costeiro	900	9.000
Montanhas	250	2.500
Planícies interiores	575	5.750
Montanhoso ou ondulado	575	5.750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas Urbanas	–	10–20
Polar ou Árido	10.000	100.000

Fonte: Traduzido de WMO [2008]

3.2.3 Perdas de precipitação

Ao considerar a precipitação na bacia hidrográfica, ela pode ser dividida em duas parcelas: uma que contribui para o escoamento superficial e outra que não contribui.

A parcela que contribui diretamente para o escoamento superficial é denominada "precipitação efetiva", sendo a responsável pelo escoamento superficial, salvo em casos de adição de água no sistema, como em transposição de bacia, quebra de barragem, entre outros. Quando não existem essas adições, o volume escoado superficialmente tem que ser igual ao da precipitação efetiva para um evento de chuva.

² Existem diversos métodos na literatura científica da hidrologia para tal. Entre eles, temos o Método das Isoietas, os Polígonos de Thiessen e métodos de interpolação, como o da Distância Quadrática Invertida.

A parte que não contribui para o escoamento superficial é considerada como "perda"³, e inclui a interceptação, evapotranspiração⁴, infiltração e armazenamento em depressões e detenções. Os valores de infiltração são normalmente obtidos analisando-se o uso e o tipo de solo da bacia. Certamente, este tipo de estudo pode ser complexo, necessitando o uso de imagens de satélites ou fotografias aéreas para identificar os diferentes usos e tipos de solo, além de uma análise *in loco* para melhorar a exatidão das informações. Os efeitos resultantes da modificação do uso do solo podem ser representados pelos modelos hidrológicos a partir da variação da infiltração, sendo essas ferramentas importantes para o planejamento da ocupação do solo.

Existem diversos modelos para o cálculo da precipitação efetiva, entre eles estão os modelos de *Perda inicial e taxa constante*, *Déficit e taxa constante*, *Retenção potencial máxima - SCS-CN* (*Soil Conservation Service - Curve Number*) e *Green-Ampt*. Estes modelos geralmente consideram o sistema de perdas a partir de uma perda inicial e, depois que essa perda inicial é preenchida, começa a ocorrer uma taxa de perda. Este processo depende da complexidade do modelo escolhido.

Em muitos casos, deve-se considerar diferentes tipos de interceptações, levando em conta o nível de saturação do solo. Pode-se traçar um paralelo com a bacia hidrográfica: assim como o solo, a bacia, como um todo, possui um limite de saturação, no qual as árvores, as depressões e demais elementos que retêm água já atingiram sua capacidade máxima de armazenamento. Em estudos de inundação, aconselha-se considerar que o solo já esteja úmido, próximo da saturação.

No presente trabalho, utilizaremos o modelo de Retenção Potencial Máxima - SCS CN, apresentado a seguir. Este modelo se tornou bastante popular, principalmente devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação. Caso haja interesse em representar melhor este processo, aconselha-se o uso de modelos mais completos.

O CN representa os valores de Número de Deflúvio⁵ no modelo por um parâmetro empírico que representa a porcentagem de impermeabilidade do solo. Ele assume que a infiltração do solo ocorre de maneira não-linear e que há uma perda inicial antes que o escoamento superficial seja gerado. Para obtê-los, é possível utilizar o método de classificação americana, descrito abaixo, mas também podem ser utilizados os dados presentes na Agência Nacional de Águas (ANA), conforme a tabela apresentada posteriormente.

A equação básica deste método é

$$P_{ef} = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3.2)$$

onde P_{ef} é a precipitação efetiva (mm), P é a precipitação total (mm), I_a é a perda inicial (mm) e S é o armazenamento potencial máximo do solo (mm), sendo calculado como

$$S = \frac{25400}{CN} - 254. \quad (3.3)$$

³ Assim, o seu processo é denominado de perda ou abstração.

⁴ Como não modelaremos a evapotranspiração diretamente, os seus efeitos acabam se recaiando às perdas.

⁵ Consideramos a tradução de CN, *Curve Number*, como Número de Deflúvio, ao invés de Número Curva, pelo significado físico que este agrega.

As perdas iniciais podem ser obtidas por diferentes métodos. Geralmente, considera-se para bacias hidrográficas rurais como $Ia = \frac{S}{5}$, entretanto, para bacias urbanas este valor pode ser considerado como $Ia = \frac{S}{20}$ [Woodward et al., 2003] [Baltas et al., 2007], levando à compreensão de que não existe uma regra geral para a obtenção deste valor.

Em teoria, a precipitação total menos a perda inicial (Ia) terá a capacidade de gerar o escoamento superficial de uma bacia. Sendo assim, estas equações apresentadas são válidas para $P > Ia$. Quando $P < Ia$, $P_{ef} = 0$ e não ocorrerá o escoamento superficial, pois não existe precipitação efetiva.

Para se obter o valor de CN, podemos utilizar os valores tabelados na Tabela 3.4. Os solos são classificados de acordo com os grupos:

- **Grupo A:** Solos com taxa de infiltração alta, como areias com boa drenagem e pedregulhos, como solos arenosos e profundos;
- **Grupo B:** Solos com taxa de infiltração intermediária, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa, por exemplo, solos menos arenosos e profundos;
- **Grupo C:** Solos com taxa de infiltração lenta, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa, mas com camadas que dificultam a infiltração, como solos argilosos;
- **Grupo D:** Solos com taxa de infiltração muito lenta, como os solos muito argilosos e rasos sobre algum material impenetrável.

Tabela 3.4 – Número de Deflúvio conforme os tipos de solo A, B, C ou D e seus usos.

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras, estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas, de baixa transpiração	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: [Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico \(ANA\) \[2025\]](#).

As seguintes condições servem como auxílio para identificar o nível de saturação do solo/-bacia:

- **Condição I** - Solos Secos: As chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassaram 15 mm;
- **Condição II** - Situação Média na Época de Cheia: As chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40 mm;
- **Condição III** - Solo Úmido (próximo à saturação): As chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40 mm.

Ao se utilizar o método de Retenção Potencial Máxima, o valor do número de Deflúvio, CN, é considerado como estando na **Condição II** e as correções para a **Condição I** ou **Condição III** seguem as seguintes equações

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)} \quad \text{ou} \quad CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,013 \cdot CN(II)}. \quad (3.4)$$

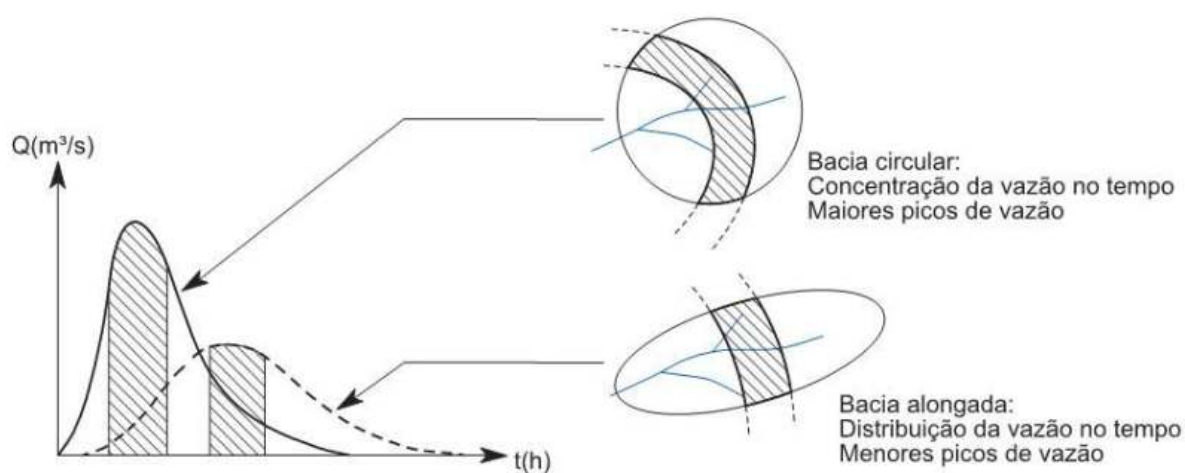
No nosso caso de mapeamento de perigo de inundação, utilizaremos a **Condição III**.

3.2.4 Transformada em escoamento superficial

O escoamento superficial de uma bacia é exclusivamente a descarga superficial resultante da precipitação efetiva que origina o hidrograma de cheias. Devido à complexidade dos elementos que influenciam o escoamento superficial, sua medição é aproximada, principalmente por sua íntima relação com o escoamento de base. No entanto, existem diversos métodos para estimá-lo.

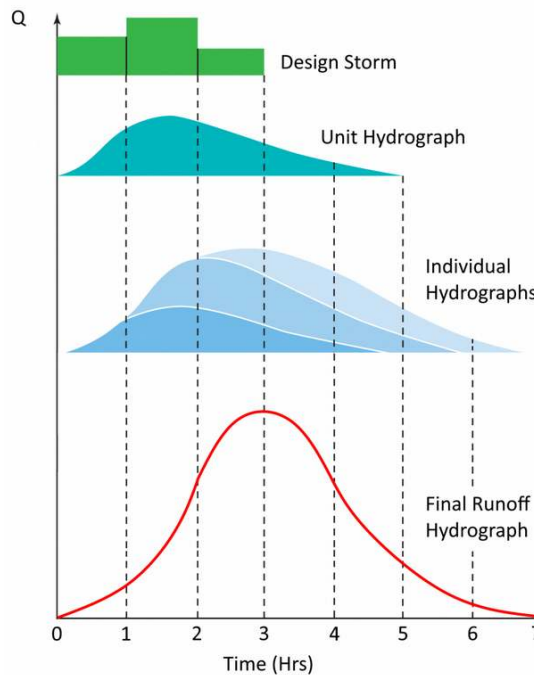
A maneira mais usual de transformar matematicamente a precipitação efetiva em escoamento superficial é aplicar um hidrograma unitário (HU), o qual relaciona uma vazão escoada superficialmente na bacia a uma precipitação efetiva unitária. É importante destacar que o hidrograma unitário depende principalmente das características de cada bacia (Figura 3.9). Neste procedimento, a chuva a ser representada na modelagem é dividida em um número definido de precipitações unitárias que ocorrem em um determinado intervalo de tempo. Assim, a partir de um procedimento de convolução e adição do hidrograma unitário (formato da vazão que a distribuição da precipitação efetiva efetuará na bacia), obtém-se o hidrograma do escoamento superficial (Figura 3.10). Para compreender melhor como este procedimento funciona, é aconselhada a consulta de literatura de livros básicos de Hidrologia.

Figura 3.9 – Procedimento de criação de um hidrograma de escoamento superficial a partir de hidrograma unitário.



Fonte: Collischonn and Dornelles [2013]

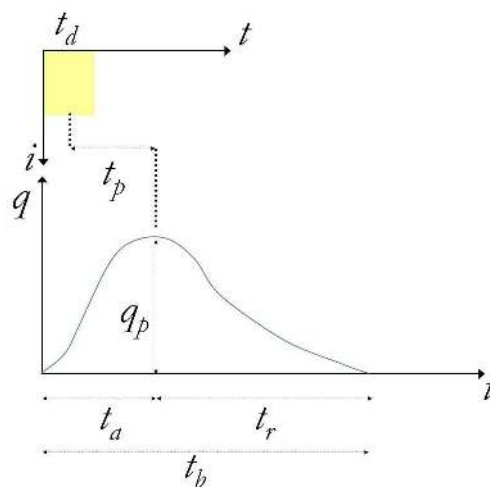
Figura 3.10 – Parâmetros do Hidrograma Unitário.



Fonte: [Hydrology Studio \[2025\]](#)

O hidrograma unitário pode ser compreendido a partir de características padrão, sendo que: t_d é o tempo de duração da precipitação, t_p é a diferença entre os tempos de pico do HU e do hietograma, q_p é a vazão de pico do HU, t_a é o tempo de ascensão do HU, t_r é o tempo de recessão do HU e t_b é o tempo de base do HU (Figura 3.11). Assim, os diferentes métodos atuam modificando essas características do hidrograma unitário conforme a bacia hidrográfica que está sendo representada.

Figura 3.11 – Parâmetros do Hidrograma Unitário.



Fonte: Anotações de aula do professor Augusto Cezar Pompêo.

Os métodos concentrados para a modelagem do escoamento superficial mais usuais são: *HU de Snyder*, *HU de Clark* e *HU do SCS*. Estes métodos dependem de características das bacias, como área, tempo de concentração, entre outros. A diferença básica desses métodos é o formato base do hidrograma unitário.

3.2.5 Escoamento de base

O escoamento superficial, o escoamento subsuperficial e o escoamento básico são os elementos que formam o hidrograma. Existem diversos métodos para separar o escoamento superficial do escoamento básico, porém é difícil de se estimar qual é a contribuição do escoamento subsuperficial. Por este motivo, este deve ser considerado como parte do superficial e do básico. Esta consideração deve ser feita dependendo do método de escoamento superficial e básico utilizados na modelagem.

Neste contexto, o escoamento básico é resultado do armazenamento temporário de parte da precipitação percolada na bacia, do escoamento subsuperficial e das águas presentes em lençóis freáticos ou em outras formas de armazenamento, ou fluxo subterrâneo que representam as condições antecedentes ao evento chuvoso. O escoamento básico apresenta valores com poucas variações ao longo de um curto intervalo de tempo. Já o escoamento superficial é um resultado direto da chuva, levando a alterações mais rápidas na vazão dos cursos de água. Assim, é aceitável que, para simulações de eventos curtos (algumas horas ou poucos dias), considere-se que o escoamento de base seja constante.

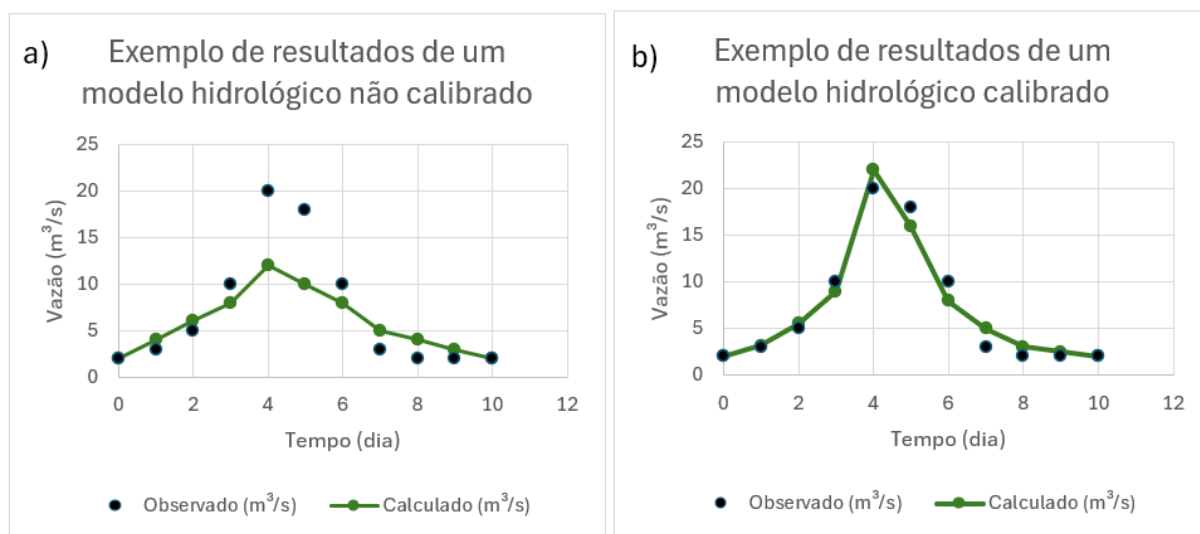
3.2.6 Escoamento em rios

Diversos modelos chuva-vazão possuem modelos que calculam o escoamento em rios. Em sua totalidade, estes modelos são simplificados, não sendo apropriados para o cálculo do escoamento na *área inundável*, entretanto, é indicado o uso para fazer as ligações entre bacias em um sistema de modelos concentrados, dividido por sub-bacias.

3.3 CALIBRAÇÃO

A calibração é uma etapa fundamental na aplicação de modelos chuva-vazão. Esse processo consiste em ajustar os parâmetros menos confiáveis do modelo até que o hidrograma calculado se aproxime do hidrograma observado (Figura 3.12). No entanto, é essencial que essas modificações sejam feitas com cautela para evitar que os parâmetros percam sua representatividade e deixem de refletir as condições reais da bacia hidrográfica simulada. A calibração pode ser realizada manualmente ou de forma automática.

Figura 3.12 – Comparação entre os resultados de um modelo chuva-vazão a) sem calibração e b) com calibração.



Fonte: Os próprios autores.

A calibração manual é vantajosa para o usuário compreender o funcionamento do modelo. No entanto, quando o processo se torna repetitivo e demorado, pode levar à fadiga do operador. Por outro lado, a calibração automática, baseada em algoritmos de otimização, é mais rápida, mas pode resultar em parâmetros inconsistentes se o usuário não possuir experiência suficiente em modelagem hidrológica. Para reduzir esses problemas, recomenda-se restringir os intervalos de variação dos parâmetros calibráveis, garantindo que os valores obtidos sejam compatíveis com as condições físicas reais.

3.3.1 Otimização de Parâmetros

Segundo Tucci [1998], a otimização consiste na busca pelo melhor valor de uma ou mais variáveis (também chamadas de parâmetros) de modo a maximizar ou minimizar uma função objetivo, respeitando as restrições previamente definidas.

As variáveis são otimizadas minimizando ou maximizando uma função objetivo, definida genericamente como

$$y = F(x_i) \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.5)$$

onde x_i são variáveis independentes, n é o número de variáveis independentes e y é a variável dependente. Para o modelo hidrológico, x_i são os parâmetros a serem calibrados no processo de otimização e y é a variável dependente que representa a função objetivo.

A otimização pode ser classificada conforme as características da função objetivo:

- **Otimização sem restrição:** as variáveis não têm limitação de variação.
- **Otimização com restrição:** as variáveis têm restrições nos métodos de otimização.

As técnicas de otimização podem ser classificadas segundo diferentes critérios, como ponto de partida, direção de pesquisa, espaçamento das tentativas e critérios de parada. As técnicas iterativas são amplamente utilizadas, pois automatizam a busca pelos melhores parâmetros, reduzindo o tempo de calibração. No entanto, exigem uma avaliação e ajustes finais para garantir a qualidade dos resultados.

Apesar de tudo, as técnicas iterativas não bastam para a obtenção do mínimo local da função, por conta dos problemas com vários mínimos locais. Para isso, existem técnicas de otimização global utilizadas na busca de modelos hidrológicos de precipitação-vazão, que podem ser técnicas aleatórias de pesquisa e algoritmos genéticos.

Para variar as vazões calculadas em busca do valor ótimo da função objetivo, deve-se escolher parâmetros que variarão (o x_i) na busca deste valor ótimo. Apenas os parâmetros que se têm menos confiança devem ser modificados em busca da otimização. De uma forma geral, os *dados de campo* não devem ser modificados, enquanto os *dados calculados*, que normalmente são os mais incertos, possuem prioridade para serem os parâmetros modificados para a otimização. Deve-se tomar cuidado para não avaliar valores de parâmetros irreais ou que não representem a bacia ou o fenômeno que se está analisando.

3.3.2 Função Objetivo

A calibração automática é feita utilizando um modelo de otimização, que é constituído por uma **função objetivo** da qual se pretende encontrar um ponto ótimo, maximizando-a ou minimizando-a. A calibração manual também pode se basear nestas funções. A **função objetivo** é uma medida de desempenho da capacidade do modelo em representar as vazões observadas, logo, ela dita quais são as diferenças entre os hidrogramas calculados e os observados que se quer minimizar.

Exemplos de *funções objetivo* são apresentados a seguir:

- Raiz do Erro Médio Quadrático - *Root Mean Square Error (RMSE)*

$$FO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{NT}} \quad (3.6)$$

- Desvio Quadrático Inverso

$$FO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Qo_i} - \frac{1}{Qc_i} \right)^2}{NT}} \quad (3.7)$$

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe - *Nash-Sutcliffe Efficiency - NSE*

$$FO = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - Qc_i)^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Qo_i - \bar{Q})^2} \quad (3.8)$$

- Erro Relativo Médio Absoluto - *Mean Absolute Relative Error (MARE)*

$$FO = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{|Qo_i - Qc_i|}{Qo_i}}{NT} \quad (3.9)$$

- Erro Médio Relativo - *Relative Bias*

$$FO = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Qc_i - \sum_{i=1}^{NT} Qo_i}{\sum_{i=1}^{NT} Qo_i} \quad (3.10)$$

onde FO é o valor da *função objetivo*, Qo_i é a vazão observada no intervalo de tempo i , Qc_i é a vazão calculada no intervalo de tempo i , $\bar{Q}$ é a vazão média da série e NT é o número de intervalos de tempo da série de dados. A equação 3.6 avalia a dispersão entre valores observados e calculados em relação à média e ao desvio padrão. A equação 3.7 é utilizada para o ajuste de vazões mínimas. A equação 3.8 é utilizada para se obter um *melhor ajuste para as cheias*. A equação 3.9 tem a tendência de um *melhor ajuste das vazões mínimas e médias*. Por fim, a equação 3.10 é comumente utilizada para *avaliar o desvio geral do volume*, ou seja, através dela é possível perceber a diferença entre o volume simulado e o observado, indicando, assim, se as equações presentes no modelo conseguem representar eficazmente o escoamento na bacia.

3.4 VALIDAÇÃO

A validação na modelagem hidrológica é um processo fundamental para verificar a capacidade do modelo calibrado de representar eventos distintos daqueles usados na calibração. A validação deve ser feita com outro evento que não seja o utilizado para a calibração. O procedimento para a validação é muito parecido com o da calibração, com a diferença de que não se modifica nenhum parâmetro do modelo, pois o objetivo não é encontrar o valor ótimo da função objetivo, mas sim avaliar a capacidade do modelo de reproduzir os dados observados de forma independente. Dessa forma, a validação assegura que o modelo calibrado pode representar adequadamente diferentes condições hidrológicas, aumentando sua confiabilidade e aplicabilidade.

Essa etapa é essencial para demonstrar a robustez e a generalização do modelo, ou seja, sua capacidade de representar eventos que não foram usados diretamente no ajuste dos parâmetros. Além disso, a validação permite identificar os tipos de eventos que o modelo consegue abranger com determinada calibração, evitando extrapolações inadequadas. Não é porque um modelo está calibrado que ele pode ser utilizado para qualquer evento que ocorra em determinada bacia, sendo necessário verificar suas limitações e adequação para diferentes condições hidrológicas.

3.5 COMENTÁRIOS

A modelagem hidrológica deve ser aplicada somente por pessoas que já tenham estudado hidrologia anteriormente. Caso contrário, os autores deste trabalho indicam fortemente que

o usuário do modelo hidrológico estude os conceitos básicos de hidrologia. O entendimento de diversos métodos aqui utilizados deve ser aprofundado, pois na modelagem hidrológica, muitas vezes, é necessário o bom senso do usuário, que deve ser baseado em conhecimentos de hidrologia.

Existem diversas possibilidades de melhoria na modelagem hidrológica. Uma delas diz respeito a consideração da chuva no modelo. Como muitas vezes os intervalos de medição são bastante grandes se comparados com o tempo de resposta da bacia, algumas estratégias estatísticas podem ser utilizadas para aperfeiçoar as informações existentes.

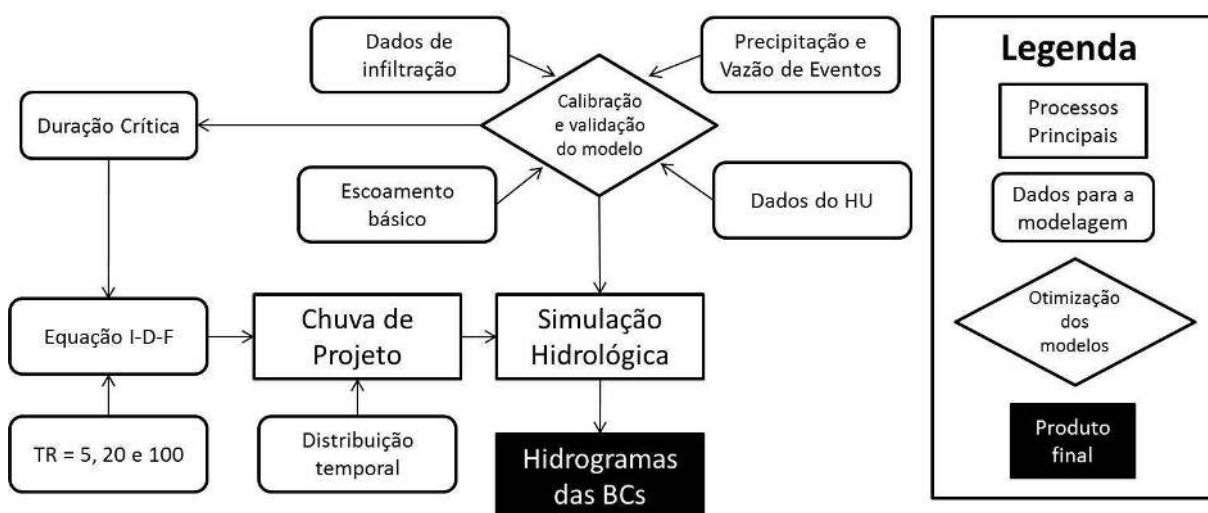
O mesmo ocorre para os dados de vazão, que são utilizados para calibração e validação dos modelos. Nesse aspecto, pode-se utilizar a Vazão Instantânea, apresentada por Fuller (1914) [Fuller, 1914] que apresentou fatores de correção para se obter a maior vazão do escoamento que ocorreu em qualquer intervalo de tempo a partir de dados diários. Este estudo foi avançado no Brasil por Silva and Tucci [1998], que apresentou coeficientes calculados para situações no país.

3.6 APLICAÇÃO: MODELAGEM HIDROLÓGICA COM HEC-HMS ESTUDO DE CASO: MPI PARA A ÁREA URBANA DE RIO NEGRINHO-SC

3.6.1 Introdução

O exemplo prático de modelagem chuva-vazão segue o organograma apresentado na Figura 3.13. Inicialmente, realiza-se a calibração e validação do modelo, depois encontra-se a precipitação crítica, para só então calcular os hidrogramas para os diferentes períodos de retorno. O programa HEC-HMS 4.12⁶ será utilizado para realizar as simulações e está gratuitamente disponível em "<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>".

Figura 3.13 – Fluxograma detalhado da modelagem chuva-vazão.



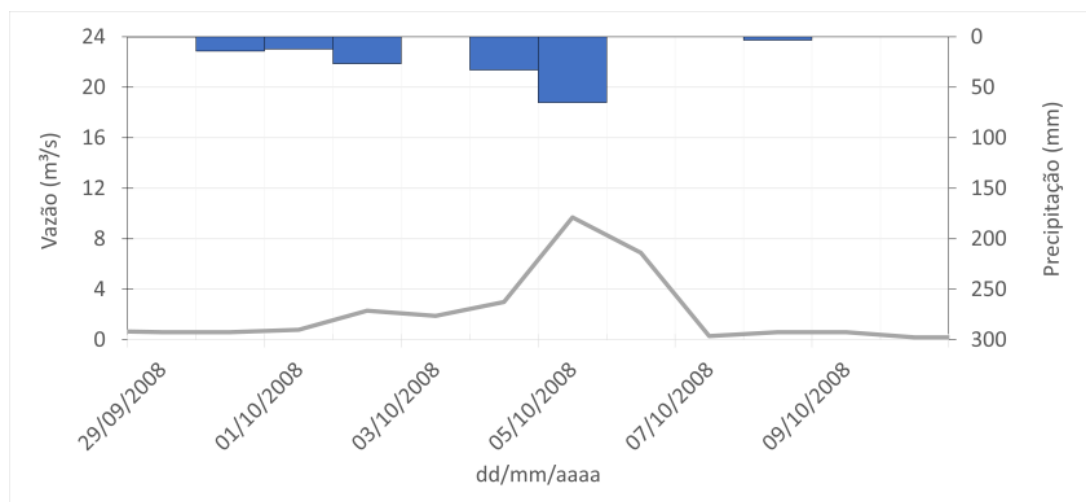
Fonte: Adaptado de Monteiro and Kobiyama [2013]

3.6.2 Calibração e Validação

Para montar o modelo hidrológico, são necessárias **diversas informações da bacia hidrográfica (dados do HU, infiltração e escoamento básico) e ao menos dois eventos de chuva**, um para a calibração do modelo e outro para a validação do evento. Entende-se como evento de chuva um período contínuo de chuva ou com breves pausas (Figura 3.14). Não é aconselhável utilizar eventos com mais de um pico, gerados por chuvas descontínuas (Figura 3.15). Tanto os dados de chuva quanto os dados de vazão para esses eventos observados devem ser obtidos para a calibração e validação.

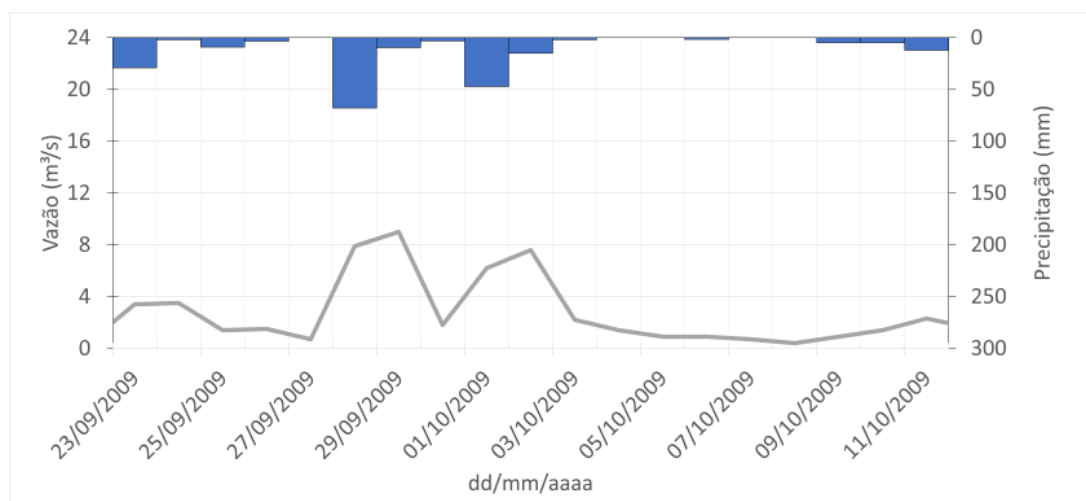
⁶ Dê preferência às versões mais estáveis, denominadas de "Current Version".

Figura 3.14 – Evento a ser considerado.



Fonte: Próprios autores.

Figura 3.15 – Evento com muitos picos.



Fonte: Próprios autores.

A discretização temporal destas observações está altamente relacionada ao tamanho da bacia, onde, para bacias pequenas, uma discretização mais refinada se torna necessária. Recomenda-se que se escolha eventos que possuam apenas um pico e que sejam gerados por um volume considerável de precipitação. Perceba que, caso a bacia hidrográfica seja muito grande, existe a necessidade de se utilizar mais estações para representar a chuva, como apresentado na Tabela 3.3. Já, a estação de vazão deve estar o mais próxima possível do exutório da área de estudo.

A seguir, serão apresentadas duas formas de se obter os dados de precipitação e vazão disponibilizados pela Agência Nacional de Águas. Posteriormente, o modelo HEC-HMS será aplicado com a explicação das fontes de informações para o alimentar.

Diversos dados pluviométricos e fluviométricos de todo o Brasil estão disponíveis no Portal "<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>". Caso o portal não forneça as informações neces-

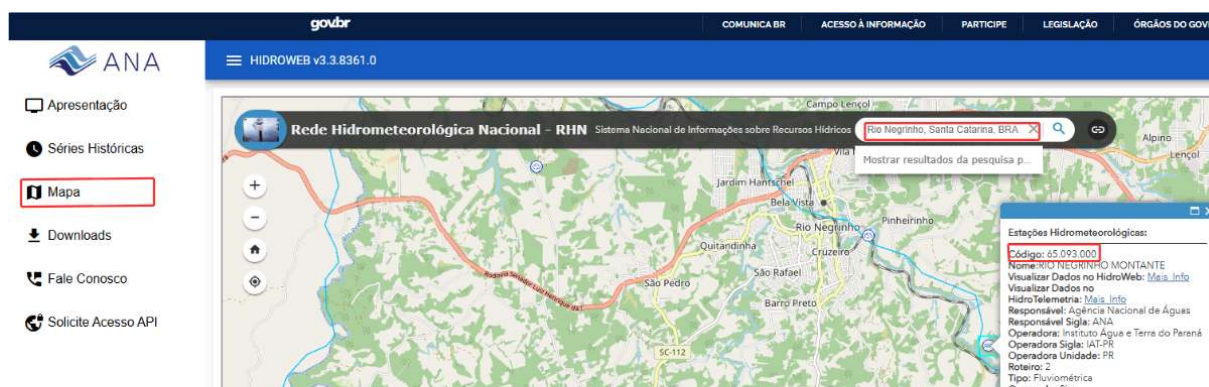
sárias, recomenda-se recorrer a outras instituições, como universidades, ao Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e às prefeituras.

Para a presente aplicação, utilizaremos a estação fluviométrica com código 65093000 e as estações pluviométricas com códigos 2649016 e 2649055 da ANA⁷.

3.6.2.1 Método 1 - Acesso direto ao site Hidroweb (procedimento não utilizado no presente documento)

No primeiro método, deve-se acessar o *site* pelo *link* acima. Depois, na seção de "Mapas" vá até o local de interesse para procurar a estação fluviométrica (Figura 3.16) e pluviométrica (análogo ao anterior). Ao selecionar a estação, um tópico "Tipo" na aba aberta estará mostrando a que tipo de dado esta se refere.

Figura 3.16 – Encontrando a estação fluviométrica no *Hidroweb*.



Fonte: Próprios autores.

Na parte superior da aba aberta, encontra-se o código da estação. deve-se copiá-lo, ir à seção "Séries Históricas" e lá colocar o código da estação (sem ponto e nem vírgula) no item "Código de Estação" (Figura 3.17). Clicando em "consulta" aparecerá uma aba abaixo onde se pode selecionar o tipo de arquivo com os dados desejados para *download*. O mesmo procedimento pode ser realizado para se ter acesso tanto aos dados de precipitação quanto aos dados de vazão. Recomenda-se baixar os arquivos em formato de texto.

Na planilha eletrônica, os arquivos de texto são transformados em arquivos **.xlsx** (Figura 3.18). Para isso, no Excel, por exemplo, pode-se seguir o seguinte passo:

- "Dados" na barra superior » "Obter dados externos" » "De Arquivos" » "De texto" » "Importar arquivo de texto" » Selecione o arquivo » Verifique se a opção "Ponto e virgula" está selecionada acima » Conclua (Figura 3.19).

⁷ O tema de interpolação de precipitações é estudado na disciplina de hidrologia, nos cursos de engenharia, e utilizaremos o software HEC-HMS para realizar este procedimento

Os dados obtidos por este método seguem o padrão de apresentação de dados da ANA, onde em cada linha estão os dados referentes a um mês do ano. Note que, para os dados fluviométricos, existem diversos arquivos atrelados a esta estação. Para o presente documento, apenas os dados de "Vazoes" serão utilizados, mas para outros estudos hidrológicos, os outros dados podem ser extremamente importantes.

3.6.2.2 Método 2 - Acesso pelo QGIS (procedimento utilizado no presente documento)

Existem plugins específicos para realizar o download dos dados da ANA pelo QGIS. Entretanto, plugins como o "Hidroweb Downloader" não é mais atualizado, podendo facilmente ter erros por incompatibilidade, mesmo em versões antigas do QGIS.

O plugin "Ana Data Acquisition" desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, tem sido um dos mais estáveis. Existem diversos tutoriais na internet para a aplicação deste método. Faça uma procura e utilize o que mais lhe agradou.

3.6.2.3 Dados de calibração e validação

Independentemente do método utilizado para o *download* dos dados de precipitação e vazão da série histórica, é importante organizá-los. Os dados selecionados para calibração e validação não devem apresentar falhas ou ausência de dados. Para o presente estudo de caso, foi escolhido o período do dia 03/09/2009 até 12/10/2009 para o procedimento de calibração e do dia 21/07/2009 até 16/08/2009 para o procedimento de validação (Figura 3.20).

Figura 3.20 – Organização das informações de calibração e validação do modelo no Excel.

CALIBRAÇÃO				VALIDAÇÃO			
Data	chuva 1	chuva 2	vazão	Data	chuva1	chuva2	vazão
03/09/09	0	0	2	21/07/09	0	0	1.7
04/09/09	7.3	23.2	4.3	22/07/09	0	1.9	1.7
05/09/09	0	0	2.6	23/07/09	9.3	8	3.3
06/09/09	0	0	2.4	24/07/09	0.5	8.5	4.8
07/09/09	0	3.7	2.1	25/07/09	0	4.1	3.9
08/09/09	48.7	8.4	11.2	26/07/09	0	3	3.4
09/09/09	8.2	41	22.5	27/07/09	2.7	10.2	2.7
10/09/09	0	7.1	22.9	28/07/09	0	12.4	7.2
11/09/09	0	20	21.6	29/07/09	0	16.9	9.2
12/09/09	0	4	17.7	30/07/09	0.8	9.7	7.2
13/09/09	0	3.1	13	31/07/09	16.2	10.7	6.0
14/09/09	0	0	7.1	01/08/09	68.9	22.8	18.4
15/09/09	0	1.4	6.7	02/08/09	10	20.8	27.9
16/09/09	0	1.6	5.8	03/08/09	0	4.1	28.0
17/09/09	0	0	5	04/08/09	0	0	22.4
18/09/09	0	0	4.7	05/08/09	0	0	14.3
19/09/09	12.3	43.3	8.2	06/08/09	3.2	0	6.0
20/09/09	21.5	0	6.4	07/08/09	0	0	5.2
21/09/09	1.2	0	5.3	08/08/09	0	0	4.3
22/09/09	0	0	5	09/08/09	9.3	0	4.2
23/09/09	0	62.3	15.7	10/08/09	0.5	9.8	4.2
24/09/09	0	4.2	17.9	11/08/09	23	0	3.8
25/09/09	17.4	0	14.6	12/08/09	0.3	0	2.6
26/09/09	0.9	6.3	14.7	13/08/09	0	0	2.5
27/09/09	0	0	14.3	14/08/09	0	0	2.3
28/09/09	47.6	91.1	23.1	15/08/09	0	0	2.6
29/09/09	0.2	20.3	43	16/08/09	0	0	2.3
30/09/09	0.4	6.3	29.6				
01/10/09	0.2	3.3	27.5				
02/10/09	0	1.7	18.4				
03/10/09	0	5.1	12.8				
04/10/09	12.6	3.4	9.4				
05/10/09	0	2.8	7.2				
06/10/09	9	7.9	7.2				
07/10/09	0	4.2	7				
08/10/09	0	0	5.3				
09/10/09	17.2	0	4.9				
10/10/09	7.4	0	4.5				
11/10/09	0	0	4.2				
12/10/09	2.1	34.4	10.3				

Fonte: Próprios autores.

3.6.3 HEC-HMS

Para o funcionamento adequado do programa, pode-se manter o computador com o idioma Português (Brasil), entretanto, é interessante que se faça com que o ponto ('.') seja símbolo decimal e vírgula (',') seja o separador de milhar. Para realizar as alterações: acesse as configurações de região e idioma do computador » "Painel de Controle" » "Relógio e Região" » "Região" » Configure o formato para "Português (Brasil)" » selecione "Configurações adicionais" » selecione **ponto** ('.') como símbolo decimal e **vírgula** (',') como separador de milhar. Por fim, aplique as alterações.

A utilização do HEC-HMS será feita a partir da criação das bacias hidrográficas pelo próprio HEC-HMS, semelhante ao procedimento realizado no QGIS. Este procedimento é opcional, entretanto, ele facilita a utilização do modelo para funcionar a partir de um conjunto de bacias concentradas, em vez de uma única bacia concentrada. Estas informações podem ser adicionadas manualmente, utilizando os dados do QGIS.

3.6.3.1 Procedimentos iniciais

Utilize sempre a versão mais recente do programa, que seja "Current Version". Como o programa a ser utilizado nesta etapa apresenta uma grande frequência de atualizações, certas etapas apresentadas a seguir podem ser alteradas ou se tornarem obsoletas. Por este motivo, ou para sanar possíveis dúvidas sobre o código, recomenda-se o acesso ao link do manual do próprio **HEC-HMS**, no qual este é <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>.

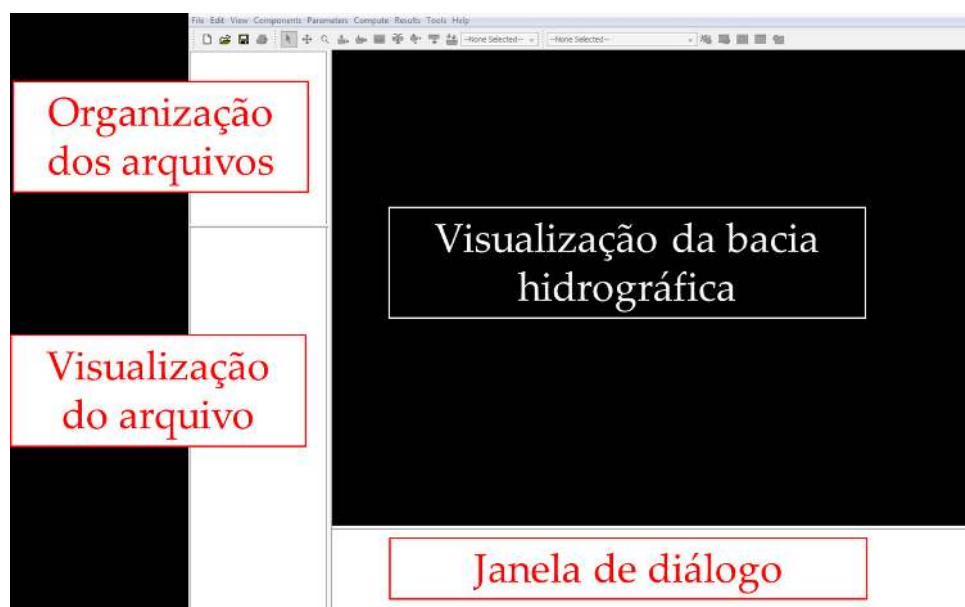
Iniciando o HEC-HMS (Figura 3.21), deve-se definir quais os modelos a serem utilizados:

- *Tools » Program Settings » Defaults* (Figura 3.22).

Definir modelos a serem utilizados (*Defaults*):

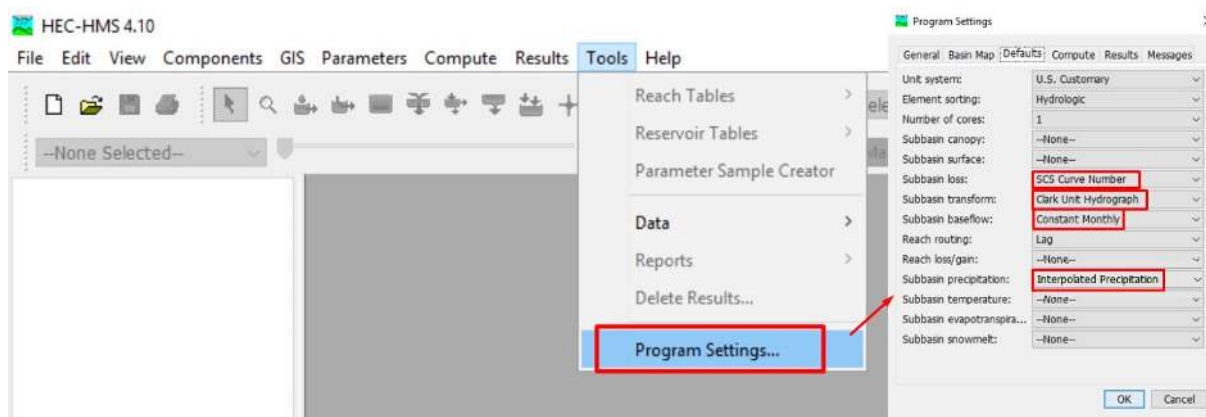
- *Subbasin loss: SCS Curve Number*
- *Subbasin transform: Clark Unit Hydrograph*
- *Subbasin baseflow: Constant Monthly*
- *Subbasin precipitation: Interpolated Precipitation*

Figura 3.21 – Janela inicial do HEC-HMS.



Fonte: Próprios autores.

Figura 3.22 – Definição dos modelos.



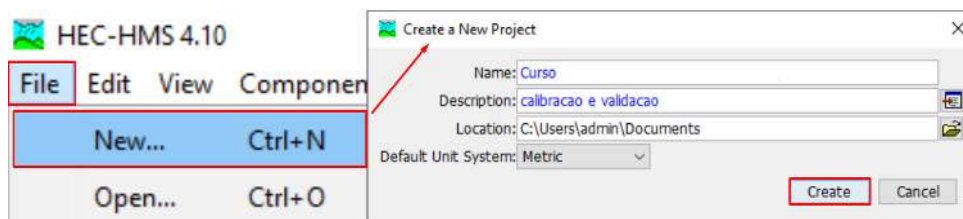
Fonte: Próprios autores.

3.6.3.2 Novo projeto

Para iniciar um novo projeto:

- *File » New* (Figura 3.23): Evite salvar o arquivo em pastas com espaços ou acentos, em todo o caminho, ou seja, não é recomendado salvar o programa em uma pasta com o caminho "C:\Usuários\Área de Trabalho\HEC HMS" e sim em uma pasta com o caminho: "C:\Usuarios\Area_de_Trabalho\HEC_HMS" ou simplesmente "C:\HEC_HMS".

Figura 3.23 – Criação do novo projeto.

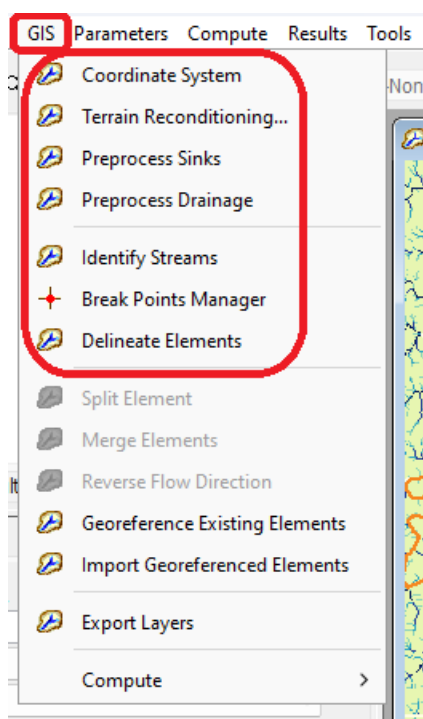


Fonte: Próprios autores.

3.6.3.3 Criação de bacia

Para criar a bacia e o conjunto de sub-bacias a serem modelados utiliza-se os *shapes* da hidrografia, do exutório e o MDT, deve-se acessar a aba GIS (Figura 3.24), de acordo com o procedimento a seguir:

Figura 3.24 – Aba de componentes utilizados.



Fonte: Próprios autores.

- Primeiramente, deve-se fazer verificações antes de realmente se iniciar a criação da bacia. Analise no **QGIS** se os *Shapes* da hidrografia e o ponto do "exutório" estão projetados em "**EPSG:31982 - SIRGAS 2000 / UTM zone 22S**", feito isso verifique se o **MDT** da região está com a mesma projeção, caso algum desses esteja projetado incorretamente, reprojete para o correto.⁸

⁸ Para reprojeter o **MDT** vá em *raster* » "Projeção" » "Definir Projeção, para os *Shapes*" » "Caixa de Ferramentas" » Pesquise por "reprojetar" » "Vetor Geral" » "Definir Projeção".

- Para adicionar o terreno, referente ao **MDT**, acesse: *Components » Terrain Data Manager » Nomeie seu Terreno » Selecione o arquivo do seu "MDT".tif* ou similar. Note que neste momento, o MDT adicionado pode não aparecer na janela de "Visualização da bacia hidrográfica".
- Para adicionar a bacia vá em: *Components » "Basin Model Manager" » "New"* Nomeie a Bacia. Ao selecionar a bacia, aparecerá um novo item em "Visualização do arquivo" com várias opções. Selecione a opção *"Terrain Data"* » Selecione o seu "Terreno" para ser assimilado à sua "Bacia".
- Para definir as coordenadas do sistema acesse: *GIS » Coordinate System » Browse » Selecione o Shape no formato ".prj" do seu "Exutório" » Set » Salve o arquivo.*
- Deve-se pré-processar o terreno antes de utilizá-lo para a delimitação de bacia do HEC-HMS. Este é um procedimento que modifica o MDT para esta atividade, forçando de forma virtual o reconhecimento da hidrografia pelo MDT e a característica de drenagem, retirando características como armazenamento provocado por convergências no MDT. Para efetuar o pré-processamento deve-se
 - Selecionar a opção *GIS » Terrain Reconditioning » Next » Em Burn Streams Filename*, selecione o *Shape* da hidrografia » Nas três abas abaixo digite "1"⁹ em cada uma delas » *Next*.
 - Acessar *GIS » Process Sinks*, para retirar virtualmente as regiões de convergência de água (empoçamento).
 - Acessar *GIS » Process Drainage*, para que se force a existencia de uma drenagem, ou seja, que a água que caia na bacia vá para o exutório.
- Agora será realizado o reconhecimento dos rios pelo programa. Acessar *GIS » Identify Streams* » Nesta opção, escolha o tamanho que for necessário ou para se ter uma discretização adequada dos rios da bacia¹⁰. Como primeira tentativa, digite "20" » "OK".
- Deve-se definir o exutório da bacia utilizando a ferramenta *GIS » Break Point Manager*.¹¹
- Para nomear as subbacias, acesse: *GIS » Delineate Elements » Subbasin Prefix* e coloque "B"(ou qualquer nomenclatura de interesse) » *Delineate*.
- Caso seja necessário alterar o tamanho da divisão da bacia, repita os passos de *"Identify Streams"* e *"Delineate Elements"*.

⁹ ainda não temos clareza das interferências de utilizar outros números

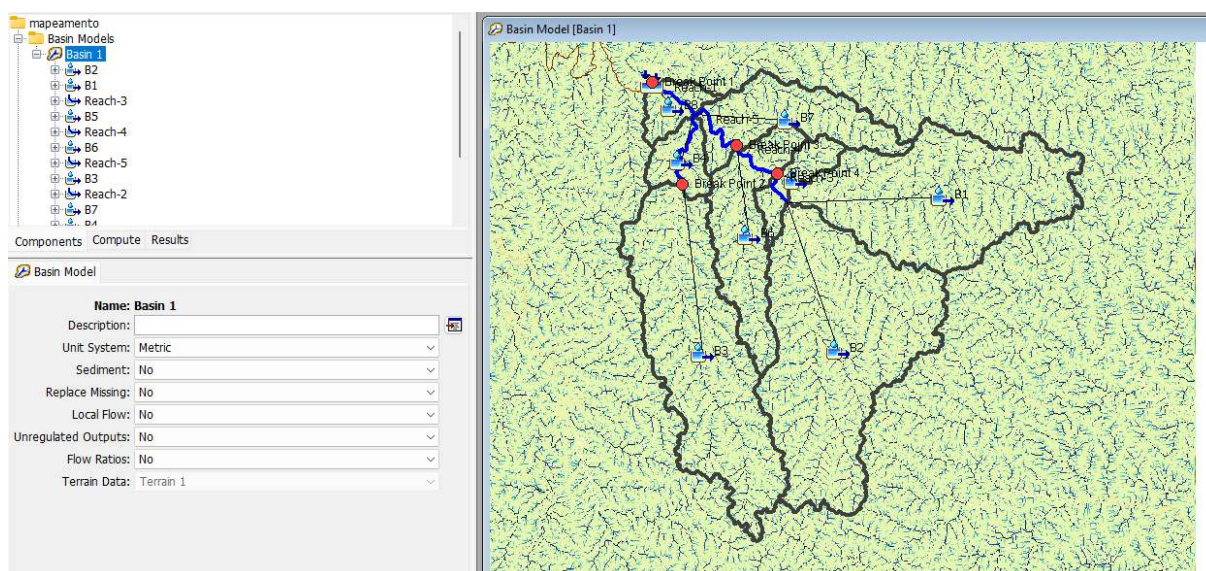
¹⁰ Entende-se como discretização adequada o interesse do usuário. Caso queira apenas criar uma subbacia dentro da bacia, então apenas o rio principal deve ser criado. Caso se tenha interesse em apresentar 30 bacias, para se ter uma boa discretização, mas mais trabalho, deve se ter um número equivalente de rios tributários

¹¹ É muito comum ter problemas nesta etapa para a demarcação do ponto, caso a referência dos arquivos de entrada não esteja em "SIRGAS 2000 / UTM zone 22S".

Assim, o HEC-HMS irá criar o sistema de subbacias concentradas, com as informações das subbacias (Figura 3.25). Ao conferir os subtópicos de "Bacia" no **HEC-HMS**, vemos que cada sub-bacia já tem sua área calculada, longitudes e latitudes dadas, junto às ligações representadas como canais que compõem o sistema de subbacias.

No presente estudo, é interessante que estas subbacias estejam relacionadas com as bacias de contribuição para a área inundável. Assim, temos que a B1 representa o Rio dos Bugres, a B2 e B3 juntas representam o Rio Negrinho a montante da zona urbana, e o B4 representa o Rio Serrinha. Assim, as vazões destes rios, que serão utilizadas na simulação hidrodinâmica, podem ser obtidas diretamente deste modelo concentrado em sistemas. É possível definir com mais precisão estas subbacias, delimitando melhor a área inundável (onde o modelo hidrodinâmico será aplicado) e utilizando a ferramenta "Break Point" para definir o exutório de cada uma dessas subbacias.

Figura 3.25 – Mapa da bacia finalizado.



Fonte: Próprios autores.

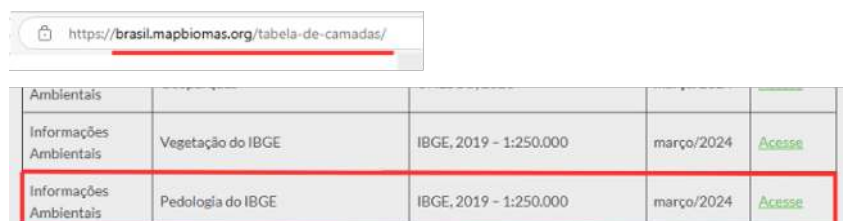
3.6.3.4 Definição dos parâmetros de entrada do modelo

Agora serão definidos os parâmetros referentes às perdas, à transformação e ao escoamento básico.

Configuração do Número de Deflúvio (Curve Number-CN)

Um modo de se obter o CN de cada sub-bacia é a partir de *shapes* de Pedologia e Uso da Terra da região que está sendo estudada. No site "[MapBiomias - Tabela de Camadas](#)" é possível obter o *shape* de pedologia, acessando "Informações Ambientais Pedologia do IBGE | Pedologia do IBGE" » Acesse » Versão 2023 (ou o ano de preferência) » "pedo area.zip" (Figuras 3.26 e 3.27).

Figura 3.26 – MapBiomias.



Ambientais				
Informações Ambientais	Vegetação do IBGE	IBGE, 2019 - 1:250.000	março/2024	Acesse
Informações Ambientais	Pedologia do IBGE	IBGE, 2019 - 1:250.000	março/2024	Acesse

Fonte: Próprios autores.

Figura 3.27 – Shape de Pedologia.



Name	Last modified
Parent Directory	
Atributos do tema Pe...>	2023-11-06 09:19
Atualizações do te...>	2023-11-06 09:19
pedo_area.zip	2023-11-06 09:19
pedo_ponto.zip	2023-11-06 09:19
pedo_tabelas.zip	2023-11-06 09:19
simbologia_pedo_area...>	2023-11-06 09:19

Fonte: Próprios autores.

Para obter as informações de Uso da Terra pode-se acessar o site do "[IBGE - Cobertura e Uso da Terra do Brasil](#)" onde em Vetores » Brasil, é possível obter o *shape*. Para entender o que significa cada célula, será necessário acessar a informação em "Simbologia"(Figura 3.28).

Figura 3.28 – Site do IBGE para se obter o uso da terra.



IBGE
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Geociências > Informações ambientais > Cobertura e uso da terra > Monitoramento da Cobertura e

Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra

O que é

Edições

2020

Sobre a publicação

Acesso ao produto

Acesso ao produto - 2020

Vetores

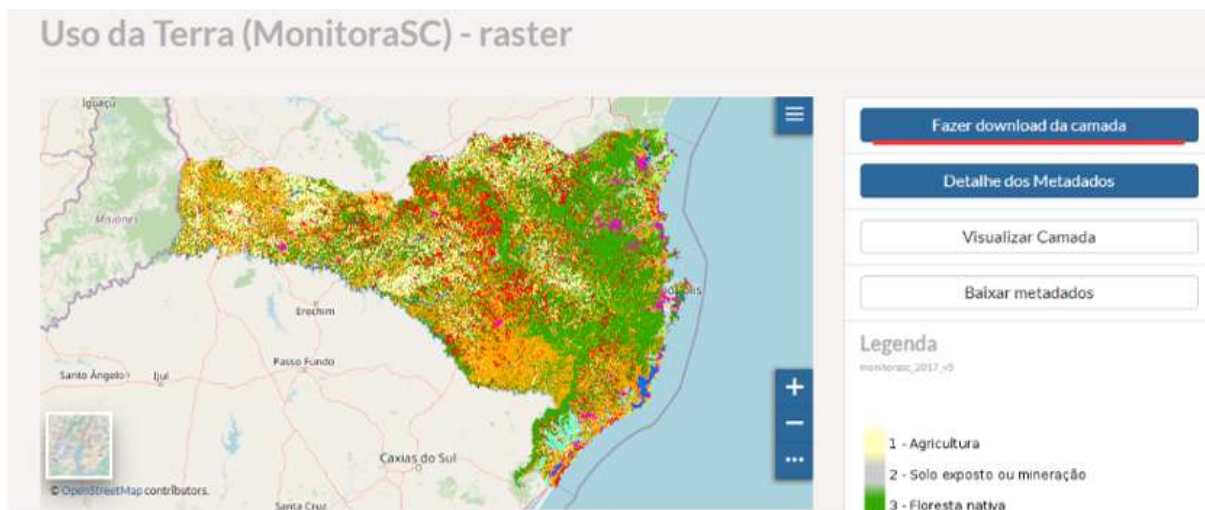
- [Brasil](#)
- [Unidades da Federação](#) - atualizado em 18/7/2024
- [Simbologia](#)

Fonte: Próprios autores.

Caso a região de estudo seja de Santa Catarina, também se aconselha acessar o site "[Moni-toraSC Uso da Terra - raster](#)". Nesse site, é necessário criar uma conta para conseguir baixar

a camada (Figura 3.29). As informações deste site são mais precisas do que as do MapBio-mas/IBGE.

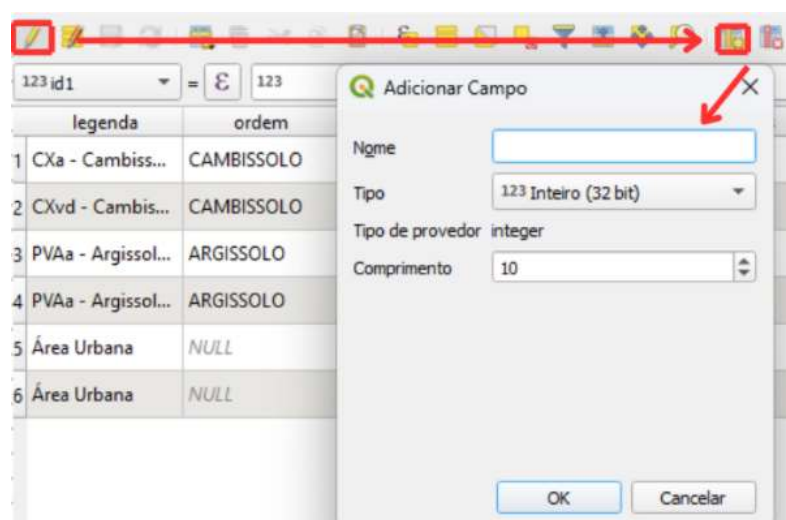
Figura 3.29 – Site MonitoraSC.



Fonte: Próprios autores.

Agora devemos unir estes dois *shapes* em um único, convertendo a informação para CN, para que seja possível adicionar a informação no HEC-HMS. Para seguir com o processamento da informação, deve-se acessar os dois *shapes* pelo QGIS, ir à tabela de atributos do *shape* de pedologia e criar uma nova coluna (Figura 3.30). Como sugestão de nome para a coluna, pode-se usar "tipo_solo", onde se deve ordenar cada tipo de solo de 100 em 100, como no exemplo a seguir na Figura 3.31.

Figura 3.30 – Criando nova coluna.



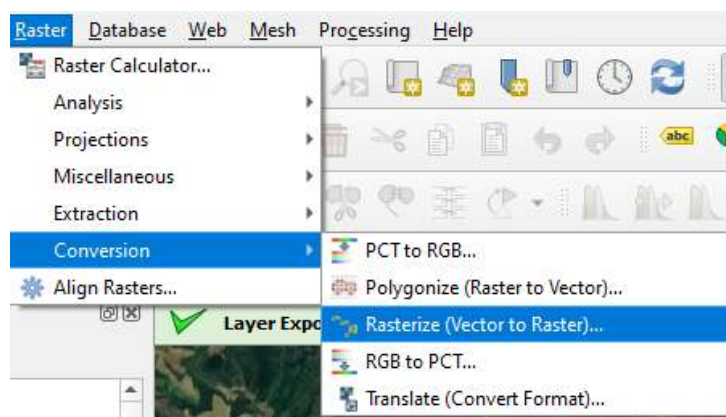
Fonte: Próprios autores.

Figura 3.31 – Nova coluna criada.

	legenda	leg_ordem	legenda_2	grande_gru	subgrupos	textura	horizonte	tipo_solo
1	CXa - Cambiss...	CAMBISSOLO	CAMBISSOLO ...	Alumínico	típico	argilosa e média	A proeminente	100
2	CXvd - Cambis...	CAMBISSOLO	CAMBISSOLO ...	Ta Distrófico	típico	argilosa	A proeminente	100
3	PVAa - Argissol...	ARGISSOLO	ARGISSOLO VE...	Alumínico	abrupto	arenosa/argilos...	A moderado	200
4	PVAa - Argissol...	ARGISSOLO	ARGISSOLO VE...	Alumínico	abrupto	arenosa/argilos...	A moderado	200
5	Área Urbana	OUTROS	ÁREA URBANA	NULL	NULL	NULL	NULL	300
6	Área Urbana	OUTROS	ÁREA URBANA	NULL	NULL	NULL	NULL	300

Fonte: Próprios autores.

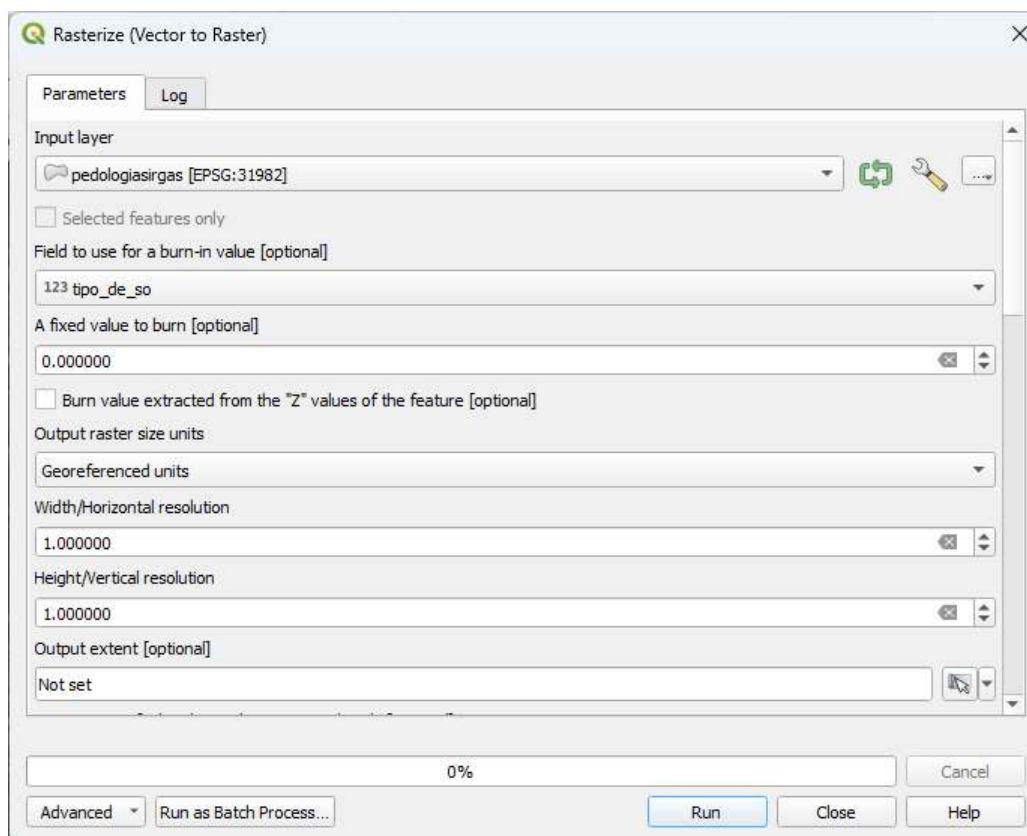
Agora, com os dois *shapes* no QGIS será necessário transformá-los em *raster*. Para isso, acesse *Raster » Conversion » Rasterize (Vector to Raster)...* (Figura 3.32, feito isso abrirá um painel).

Figura 3.32 – Rasterizando os *shapes*.

Fonte: Próprios autores.

Neste painel em *Input layer* seleciona-se o *shape* de pedologia e, posteriormente, do uso da terra. Caso esteja usando o de pedologia em "*Field to use for a burn-in value*" deve-se selecionar a coluna que foi criada, mas se for o do uso da terra deve-se selecionar a coluna que esteja enumerado cada tipo do uso da terra. Em "*Output raster size units*" seleciona-se "*Georeferenced units*" e tanto em "*Width/Horizontal resolution*" quanto "*Height/Horizontal resolution*" será usado 1 (Figura 3.33).¹²

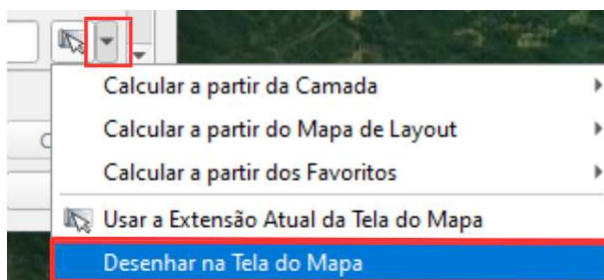
¹² Para bacias hidrográficas muito grandes, pode se considerar utilizar valores maiores do que 1, para viabilizar o seu processamento.

Figura 3.33 – Rasterizando o *shape* de pedologia.

Fonte: Próprios autores.

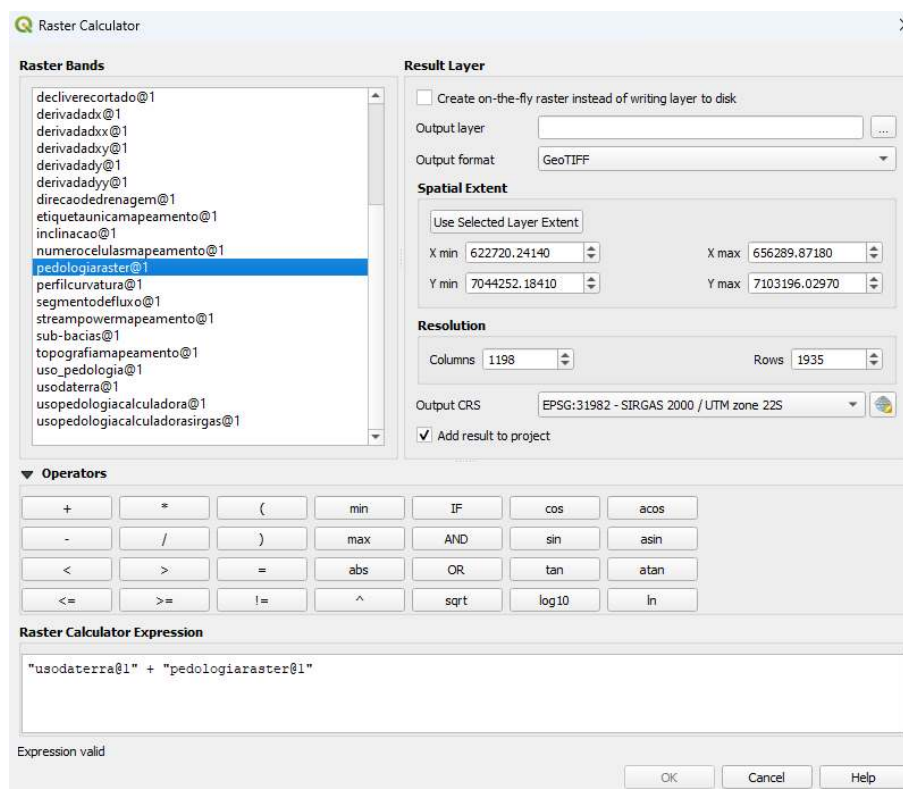
Recomenda-se também usar a ferramenta "*Draw on Map Canvas*" para delimitar somente a área que estamos usando para o estudo. Para isso, deve-se acessar "*Output Extent [optional]*" e clicar na seta para baixo onde irá aparecer a opção "*Draw on Map Canvas*"/Desenhar na Tela do Mapa (Figura 3.34) e assim, reduzirá consideravelmente a área a ser trabalhada.

Figura 3.34 – Selecionando só a área de estudos desejada.



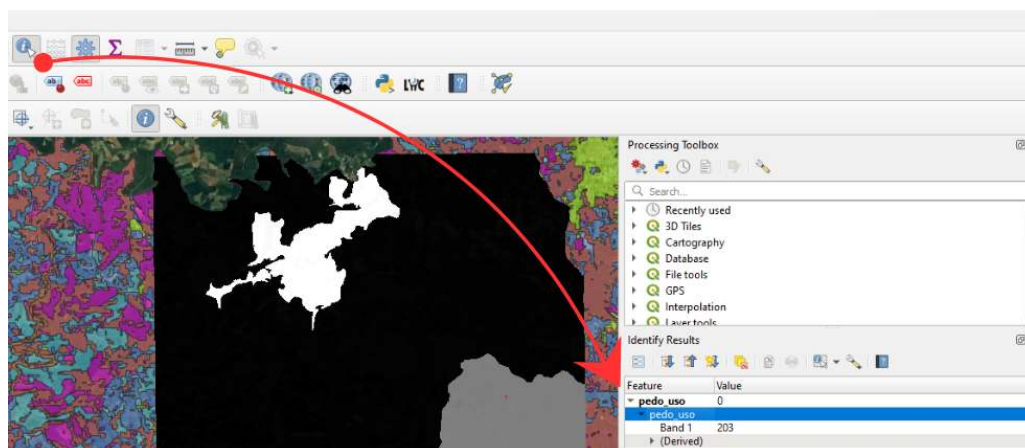
Fonte: Próprios autores.

Com os dois *raster* prontos, deve acessar o *Raster Calculator* e somar os dois *rasters* criados. Para isso, deve-se: seguir em *Output layer* e salvar o *raster* que será criado; na aba esquerda em *Raster Bands* deve-se encontrar os *rasters* com maior facilidade, sendo necessário clicar duas vezes. Na caixa "*Raster Calculator Expression*", deve-se somar os dois *rasters* (Figura 3.35).

Figura 3.35 – Somando os *rasters*.

Fonte: Próprios autores.

Após criar o novo *raster* pela calculadora, deve-se usar a ferramenta *Identify Features* para analisar alguns pontos, como na Figura 3.36, e irá perceber que, por exemplo, esse ponto que tem valor 203 significará que naquele ponto o solo é 200 (que é o valor que nós atribuímos para aquele tipo de solo) e o 3 é o uso do solo que poderá ser conferido na tabela "Simbologia" como dito anteriormente (caso esteja usando o do IBGE), ou se estiver usando o do MonitoraSC na tabela de atributos do *shape* no próprio QGIS.

Figura 3.36 – Exemplo da junção dos *rasters*.

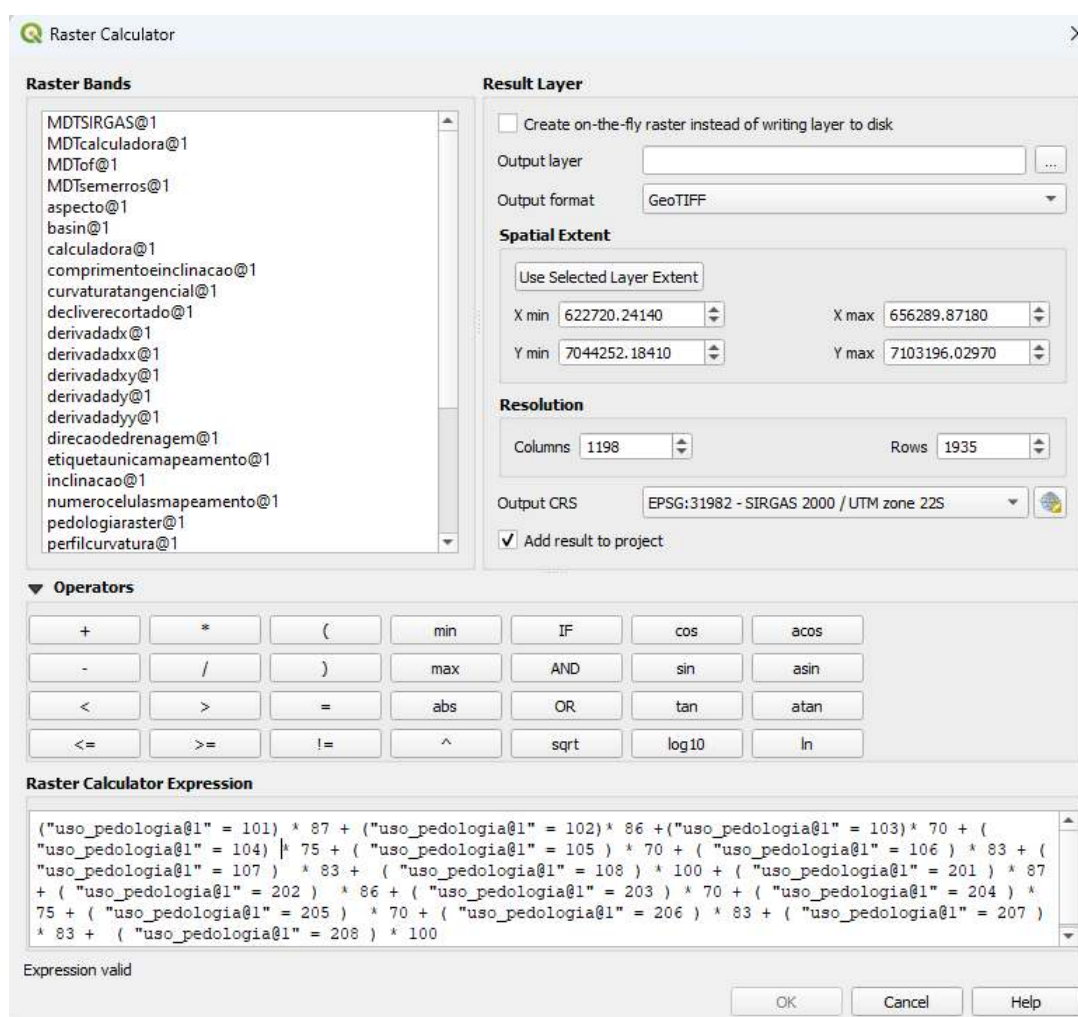
Fonte: Próprios autores.

Com essas informações prontas, irá novamente em *Raster Calculator*, porém agora deve-se converter as informações de pedologia e uso do solo em CN. Assim, deve-se escrever

"('uso.pedologia'=110)*CN₁ + ... + ('uso.pedologia'=i)*CN_i) + ... ",

onde "uso.pedologia" será o nome do arquivo que foi feito anteriormente na calculadora (Figura 3.37), e "i" é o valor de alguma célula criada pela calculadora anteriormente, sendo 110 um exemplo de valor, e o CN será o valor que será atribuído para 110 (ou outros valores) usando a Tabela 3.4.

Figura 3.37 – Calculando os CNs



Fonte: Próprios autores.

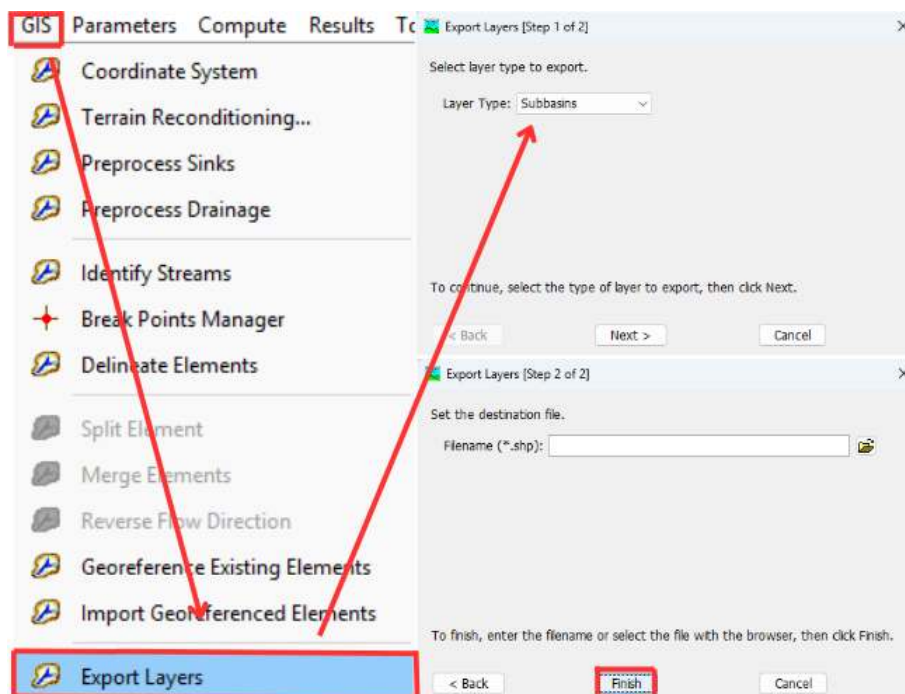
Outra opção para obter o CN, seria pelo *raster* disponibilizado pela ANA, no qual, temos um detalhamento de 30 m referente ao ano de 2022 (clicando em *raster* automaticamente já irá baixar os dados). Esse *raster* tem dados referentes ao Brasil todo.

Os próximos passos apresentados se referem à adequação dos dados do QGIS para serem adicionados posteriormente no HEC-HMS.¹³ Assim, será necessário importar as sub-bacias

¹³ No presente documento, optou-se por não utilizar o HEC-HMS com modelo distribuído por ainda apresentar

criadas no HEC-HMS para o QGIS. No HEC-HMS, vá em *Gis* » *Export Layers* » *Subbasins* » *Next* (Figura 3.38), nomeie sua bacia e depois clique em *Finish*.

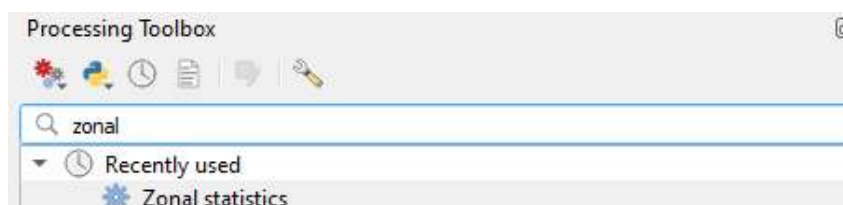
Figura 3.38 – Exportando as sub-bacias.



Fonte: Próprios autores.

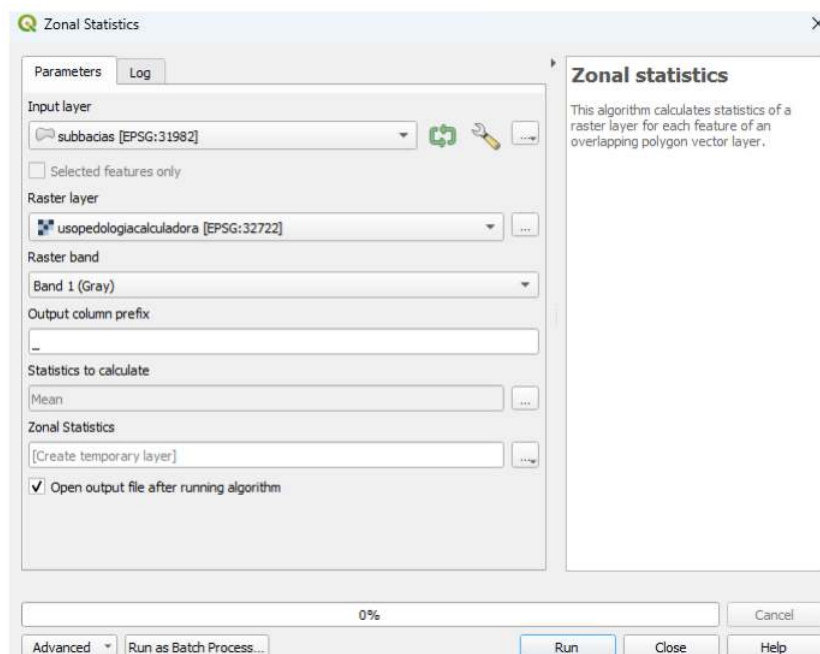
Adicione o *shape* da bacia no QGIS, e depois vá na caixa de ferramentas e pesquise por *Zonal statistics* (Figura 3.39). Em *Zonal statistics*, selecione o *shape* das sub-bacias em *Input layer*, em *Raster layer* irá selecionar o *Raster* com seu CN, em *Statistics to calculate* será somente usado *Mean* (Figura 3.40). Ao se executar o procedimento, a média do CN em cada sub-bacia será fornecida no novo *shape* criado. Pode-se conferir olhando na tabela de atributos do novo *shape* criado.

Figura 3.39 – *Zonal Statistics* na Caixa de Ferramentas.



Fonte: Próprios autores.

muitos *bugs*. Tal decisão pode ser alterada dependendo do desenvolvimento do HEC-HMS, e o raster de CN será importado diretamente no HEC-HMS.

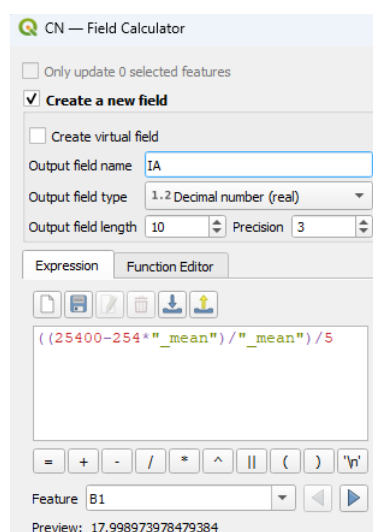
Figura 3.40 – Fazendo a média dos CNs de cada sub-bacia usando *Zonal statistics*.

Fonte: Próprios autores.

Para se obter o *Initial Abstraction* pelo QGIS deve-se acessar a tabela de atributos, depois na calculadora em "Create a new field" deve-se utilizar a equação

$$((25400 - 254 * \text{"_mean"}) / \text{"_mean"}) / 5,$$

onde *"_mean"* será o nome da coluna que foi criada para a média do CN. Em *Output field type* deve-se escolher *Decimal number (real)* e *Output file name*, sugere-se o nome "IA" (Figura 3.41). Depois, será possível verificar os valores na tabela de atributos (Figura 3.42).

Figura 3.41 – Fazendo o *Initial Abstraction*.

Fonte: Próprios autores.

Figura 3.42 – Observando os valores criados na tabela de atributos.

name	centroid_x	centroid_y	area_sqkm	latitude	longitude	basinid	_count	_sum	_mean	IA
B1	659356,0899480...	7091961,456477...	66,27890853353...	-26,2832765918...	-49,4039545551...	0	66280239,00000...	4962386442,000...	74,86977290471...	17,051
B2	654096,2828889...	7084249,154257...	88,08445323152...	-26,3534652392...	-49,4556960473...	1	88084483,00000...	6381585515,000...	72,44846422042...	19,319
B3	647330,8352309...	7084131,038411...	70,51507741062...	-26,3552461892...	-49,5234652252...	2	70514003,00000...	5179685011,000...	73,45611921932...	18,357
B4	646282,5484587...	7093752,397122...	8,721876045912...	-26,2685068531...	-49,5350610400...	3	8721415,000000...	710820387,0000...	81,50287390291...	11,529
B5	651981,2942648...	7092754,591940...	8,256982790093...	-26,2769198163...	-49,4778895606...	4	8256180,000000...	603445192,0000...	73,09012061268...	18,703
B6	649666,1084780...	7090014,554426...	28,15937072203...	-26,3018964385...	-49,5007519945...	5	28159431,00000...	2099038636,000...	74,54123046733...	17,350
B7	651669,5785528...	7095784,939829...	24,90340876484...	-26,2495999164...	-49,4813664854...	6	24902985,00000...	1991623139,000...	79,97527762234...	12,720
B8	645835,2021306...	7096413,432790...	6,978526336562...	-26,2445323981...	-49,5398402311...	7	6978157,000000...	539606735,0000...	77,32797284440...	14,894

Fonte: Próprios autores.

Com os valores das médias do CN de cada sub-bacia mais o *Initial Abstraction* é possível calcular e efetivar o modelo de perdas de chuva no HEC-HMS. Assim, continuam-se os procedimentos no HEC-HMS. Em "Components » Loss", é possível adicionar o valor do CN e no IA (Figura 3.43). Outra forma mais simples de fazer isso é acessar a aba "Parameters » Loss > SCS Curve Number" e inserir as informações por sub-bacia.

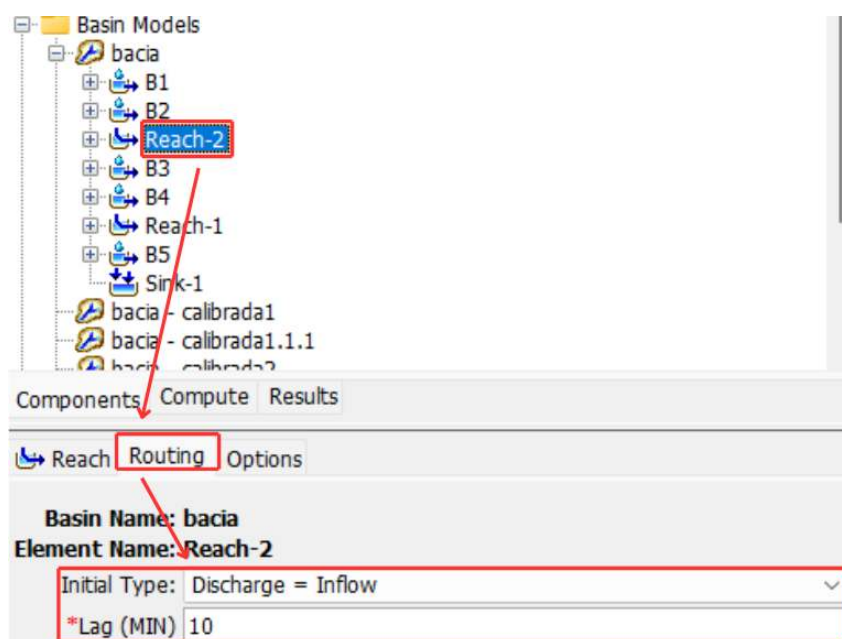
Figura 3.43 – Transferindo os valores para o HEC-HMS.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
B1	17.051	74.87	0.0
B2	19.319	72.45	0.0
B3	18.357	73.46	0.0
B4	11.529	81.50	0.0
B5	18.703	73.09	0.0
B6	17.350	74.54	0.0
B7	12.720	79.97	0.0
B8	14.894	77.32	0.0

Fonte: Próprios autores.

Para este caso, foram utilizados 10 minutos para ambos os Reachs 3.44. Para definir o tempo do trecho com maior precisão, podemos considerar que $t = L/V$, onde t é o tempo em segundos, L é o comprimento do trecho em metros e V é a velocidade em metros por segundo. Assim, para se obter a velocidade do escoamento, podemos verificar a disponibilidade desta informação em alguma estação fluviométrica nas proximidades ou, ainda, podemos utilizar equações de escoamento normal, como a Equação de Manning.

Figura 3.44 – Adicionando os valores sem Reach-2.



Fonte: Próprios autores.

Tempos de Concentração e Coeficientes de Armazenamento

No cálculo do tempo de concentração, utilizou-se a Fórmula do tempo de concentração dada por *Ven Te Chow* Chow et al. [1962]:

$$tc = 0,160L^{0,64}S^{-0,32} \quad (3.11)$$

em que tc é o tempo de concentração (horas); L é o comprimento do curso de água principal (km); e S é a declividade do curso de água principal (m/m).

Já para o coeficiente de armazenamento, considerou-se a fórmula dada por:

$$K = 80,7A^{0,23}S^{-0,70}, \quad (3.12)$$

em que K é o coeficiente de armazenamento (horas); A é a área da bacia hidrográfica (km²); e S é a declividade do curso de água principal (m/m) multiplicado por dez mil.

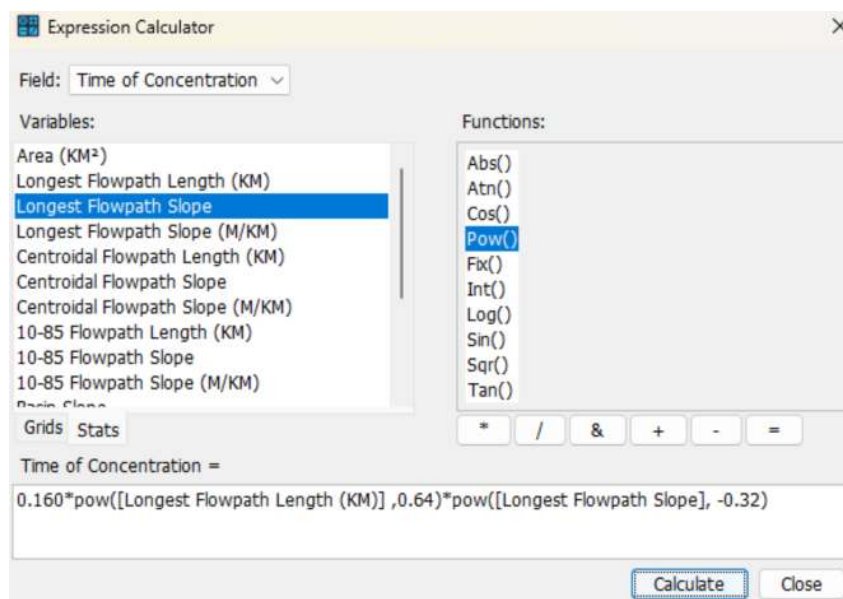
Inicialmente, para se adquirir os valores tempo de concentração e coeficiente de armazenamento, deve-se ir em *Parameters » Transform » Clark Unit Hydrograph*.

Ao se deparar com a tabela, pressione a opção *Calculator »* Selecione *Field Time of Concentration »* usando a fórmula de Chow et al. [1962] 3.11 para o cálculo do "Tempo de Concentração" na qual reescrita na calculadora digital se dá por

"0.160*pow([Longest Flowpath Length (KM)], 0.64)*pow([Longest Flowpath Slope], -0.32)"

que se encontra na Figura 3.45 » Pressione o botão *Calculate »* a tabela com os valores está em cor azul, e isso significa que os dados não estão salvos. Para salvá-los, é necessário apertar o botão *Apply*.

Figura 3.45 – Calculadora HEC-HMS para o Tempo de Concentração.



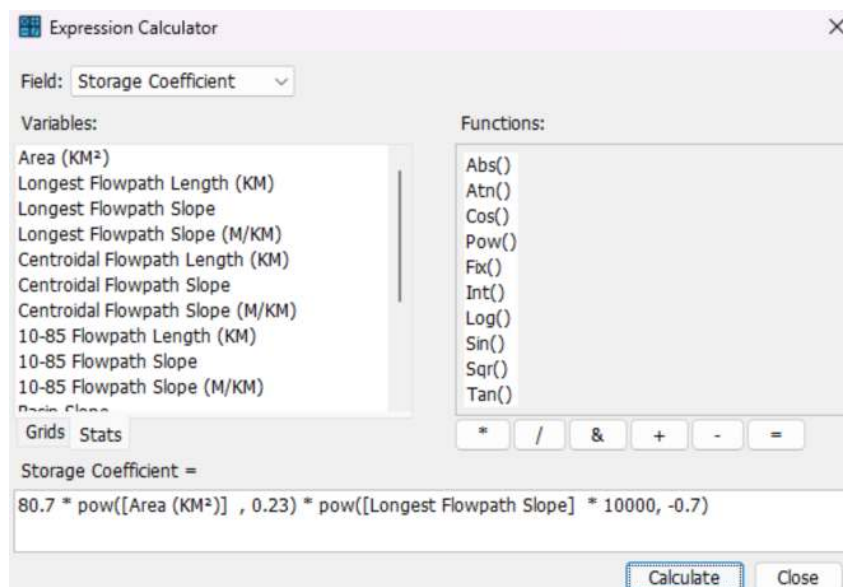
Fonte: Próprios autores.

Para o coeficiente de armazenamento, pressione novamente a opção *Calculator* » Selecione *Field Storage Coefficient* » utilize a fórmula 3.12 que, na sua forma digitada, é dada por

$$"80.7 * \text{pow}([\text{Area (KM}^2\text{)}], 0.23) * \text{pow}([\text{Longest Flowpath Slope}] * 10000, -0.7)"$$

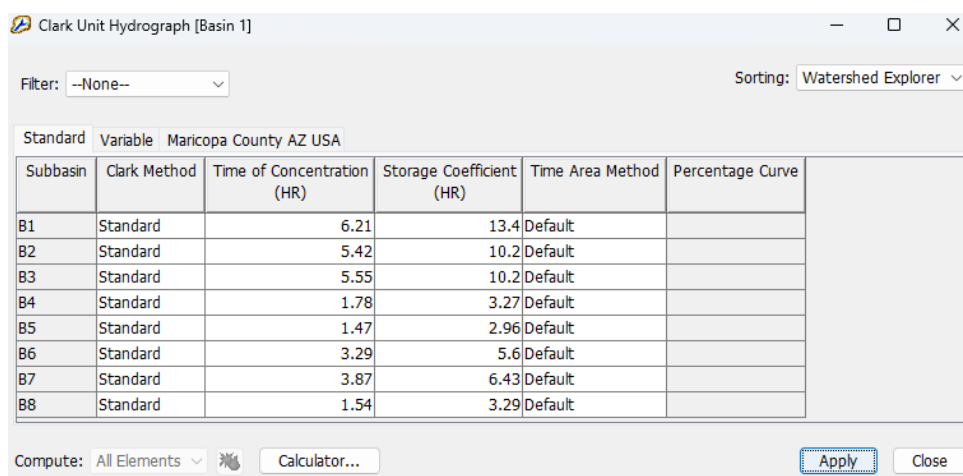
como é mostrado na Figura 3.46. Por fim, os dados para o modelo de perdas estarão preenchidos, conforme a Figura 3.47.

Figura 3.46 – Calculadora HEC-HMS para o coeficiente de armazenamento.



Fonte: Próprios autores.

Figura 3.47 – Tabela final.



Subbasin	Clark Method	Time of Concentration (HR)	Storage Coefficient (HR)	Time Area Method	Percentage Curve
B1	Standard	6.21	13.4	Default	
B2	Standard	5.42	10.2	Default	
B3	Standard	5.55	10.2	Default	
B4	Standard	1.78	3.27	Default	
B5	Standard	1.47	2.96	Default	
B6	Standard	3.29	5.6	Default	
B7	Standard	3.87	6.43	Default	
B8	Standard	1.54	3.29	Default	

Fonte: Próprios autores.

Escoamento base

Acerca do escoamento de base (*Baseflow*), que é a parte do escoamento presente no rio sempre, mesmo entre eventos de precipitação-vazão, há um mantimento deste pela água subterrânea. Para determiná-lo, deve-se conhecer o comportamento do rio quando não há presença de chuva. Uma forma aproximada e simples de se obter o valor do escoamento de base é a partir dos dados provenientes de estações de fluviometria e pluviometria encontrados dentro da bacia-hidrográfica.

O próprio *HEC-HMS* possui as suas próprias maneiras de calcular o escoamento base de uma região, e uma das maneiras mais simples é utilizando o método da Recessão ("*Recession*"), derivado das equações propostas por [Chow et al. \[1962\]](#) utilizando a equação 3.13

$$Q_t = Q_0 K^t, \quad (3.13)$$

onde Q_0 é o fluxo do escoamento base em m^3/s , já K é a constante de recessão, que nunca será maior ou igual a um, e t é o tempo em segundos. De acordo com o manual do *HEC-HMS* [[USACE-HEC, 2021](#)], podemos ter valores distintos para diferentes tipos de escoamento (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Relação entre constante de recessão e componente do escoamento.

Componente do Escoamento	Coefficiente de Recessão, K
Escoamento subterrâneo	0.95
Escoamento subsuperficial	0.8 - 0.9
Escoamento superficial	0.3 - 0.8

Fonte: Traduzido de [USACE-HEC \[2021\]](#).

O processo explicado a seguir é uma forma simplificada para se obter as informações para o Método da Recessão, e outros métodos podem ser aplicados para este objetivo. Neste caso,

queremos obter o Coeficiente de Recessão voltado para o escoamento de base, que pode possuir características de escoamento subsuperficial, já que este não é modelado diretamente pela presente metodologia.

A partir de um evento chuvoso, será verificado como ocorre a recessão do escoamento base. Para iniciar o processo, deve-se organizar os dados de uma estação fluviométrica e uma pluviométrica representativas da bacia. Com os dados de ambas as estações, deve-se:

Após o pico da vazão, selecione o trecho do hidrograma onde a vazão decresce suavemente e aparentemente de forma exponencial — esse é o trecho de recessão.

Esse trecho é controlado, em sua maior parte, pelo escoamento de base.

- Escolha um evento isolado de cheia no hidrograma. Deve-se avaliar os dias logo após a chuva do evento até o último dia de recessão aonde volta a chover;
- Compare os dias sem chuvas e o escoamento do rio. Marque o dia em que notar a diminuição gradual do escoamento, o que indica a pouca influência do escoamento superficial. Esse será o primeiro dia de recessão.¹⁴
- A partir do segundo dia de recessão, deve-se fazer a razão das vazões entre este dia e o dia anterior ($K_1 = vaz_1/vaz_2$) e, subsequentemente, entre os próximos pares de células.
- Faça a média dessas variações durante o período de recessão, temos a constante de ($K = \frac{\sum_{i=n}^1 K_i}{n}$, onde n é o número de pares de dias de recessão). O valor da recessão precisa ser maior do que 1;
- Também, faz-se necessário obter o valor da vazão unitária do rio inicial nos dias de recessão. Para isso, divida a vazão do primeiro dia de recessão pela área de drenagem da seção considerada em km^2 . A informação da área de drenagem pode ser obtida nas características da própria estação fluviométrica;
- A última informação necessária para o método é o *Ratio To Peak* que nada mais é a variação até o pico mínimo, esse valor demonstra ser muito genérico, sendo assim, possível atribuir-lhe o valor de 0,7 para que a vazão de base não fique com um valor final muito baixo.

Deve-se inserir os dados no HEC-HMS acessando *Parameters » Baseflow » Recession »* Inserir os dados de cada coluna utilizando a calculadora e os valores serão inseridos nas devidas colunas (Figura 3.48). Caso não esteja habilitada a opção *recession*, apenas troque a opção em *Parameters » Baseflow » Change Method... » Yes » None » Recession » Change*. Quando abrir a aba (Figura 3.48) possivelmente em *Initial Type* estará *Discharge*, mas usaremos *Discharge Per Area*, para mudar só será necessário dar um duplo clique em cada linha onde tenha *Discharge*.

¹⁴ Isso ocorre de forma clara para bacias com tempo de concentração menor do que um dia.

Figura 3.48 – Agregando valores ao *Recession*.

Subbasin	Initial Type	Initial Discharge (M3/S /KM2)	Initial Discharge (M3/S)	Recession Constant	Threshold Type	Threshold Flow (M3/S)	Ratio to Peak
B1	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B2	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B3	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B4	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B5	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B6	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B7	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7
B8	Discharge Per Area	0.02		0.9	Ratio to Peak		0.7

Fonte: Próprios autores.

3.6.4 Calibração do modelo hidrológico

Com os dados de perdas, transformação e escoamento base definidos nos programas, agora podemos prosseguir com o processo de calibração. Para isso, será necessário inserir as informações de chuva e vazão do evento escolhido para tanto.

3.6.4.1 Inserção dos hietograma observado

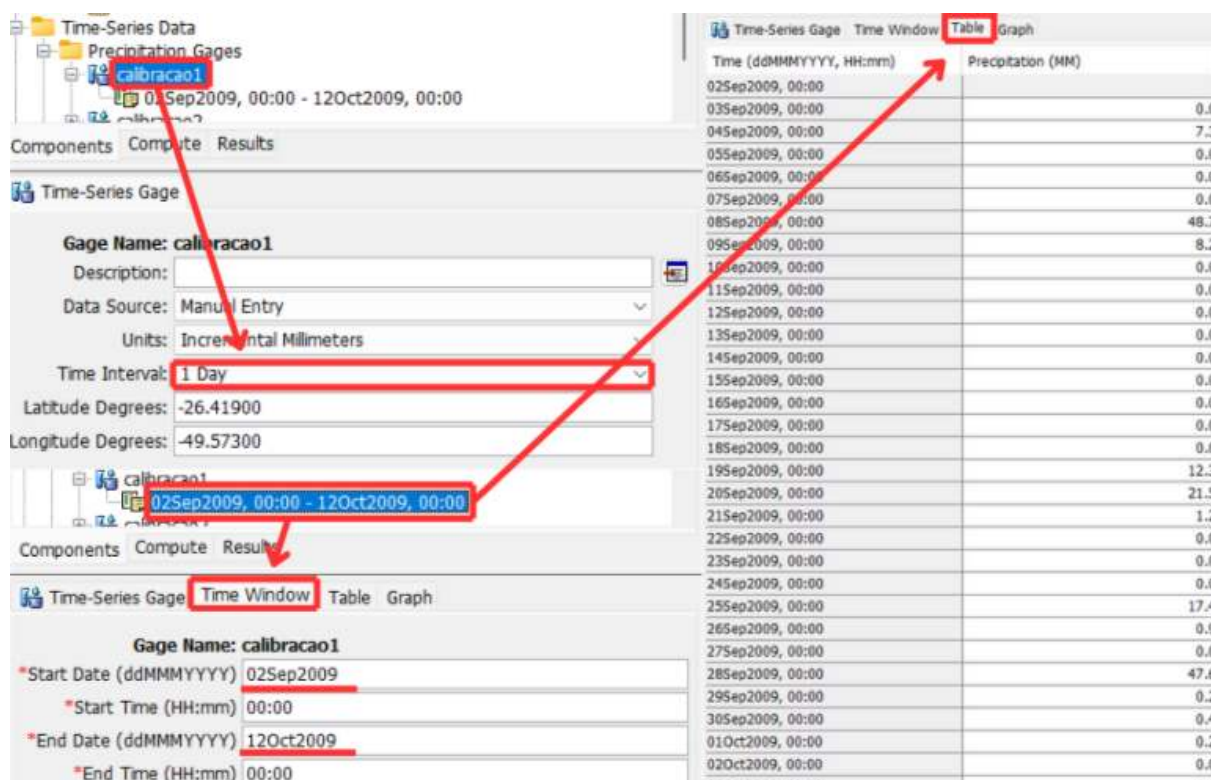
Para se inserir as precipitações no programa, deve-se criar as séries temporais com:

- *Components » Time-Series Data Manager » Data Type: » Precipitation Gages » New » Gage 1;*

Todas as informações sobre a precipitação devem ser inseridas em "*Precipitation Gages*". Dessa forma, pode-se renomear o "*Gage 1*" para "Calibração 1" (ou outro nome de preferência) e inserem-se os dados no programa (Figura 3.49), conforme os dados fornecidos pela ANA. Como temos duas estações a serem consideradas, crie também a estação "Calibração 2" pelo mesmo procedimento. É importante definir a estação como

- Data source: Manual Entry
- Units: Incremental Milimeters
- Time Interval: 1 Day
- Latitude Degrees: De acordo com estação
- Longitude Degrees: De acordo com estação

Figura 3.49 – Criação das precipitações.

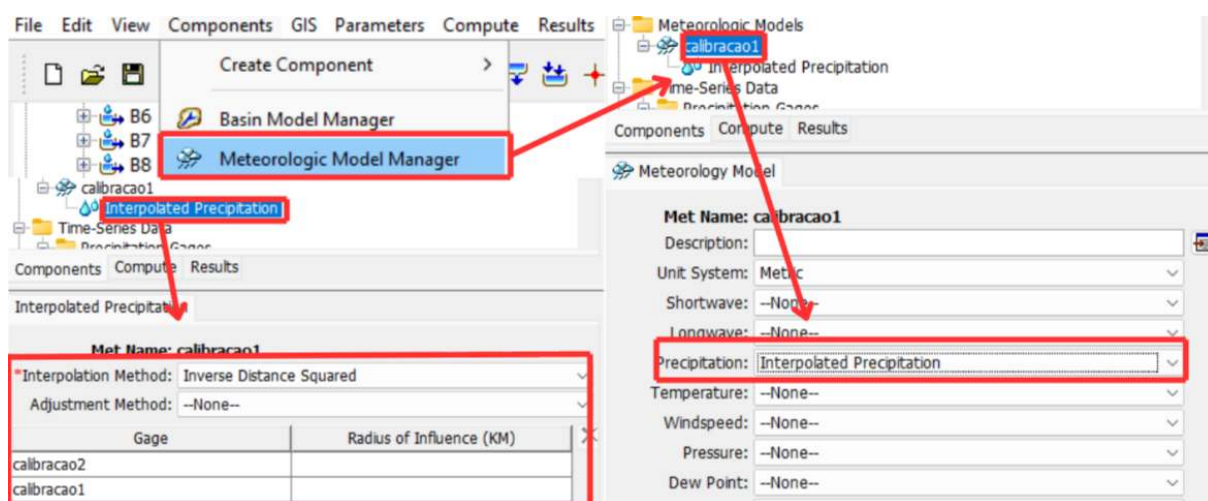


Fonte: Próprios autores.

Para se definir a qual subbacia as precipitações serão relacionadas e por quais métodos, deve-se criar um "Meteorologic Model Manager". No presente exemplo, utilizaremos o método de precipitações interpoladas pelo Método das Distâncias Quadráticas Invertidas, seguindo

- *Components » Meteorologic Model Manager » Met 1 » Precipitation » Interpolated Precipitations.* (Figura 3.50).
- *Interpolated Precipitation » Interpolation Method » Inverse Distance Squared.*
- *Gage » Calibração 1 e 2.*
- Consideramos o Raio de Influência de 1000 km, para que ambas as estações sejam consideradas independente da distância, para a nossa bacia que possui um tamanho menor. Caso se tenha efeitos orográficos intensos, a definição de um Raio de Influência menor pode ser importante para limitar a abrangência das estações pluviométricas.

Figura 3.50 – Configuração das precipitações e modelo meteorológico.



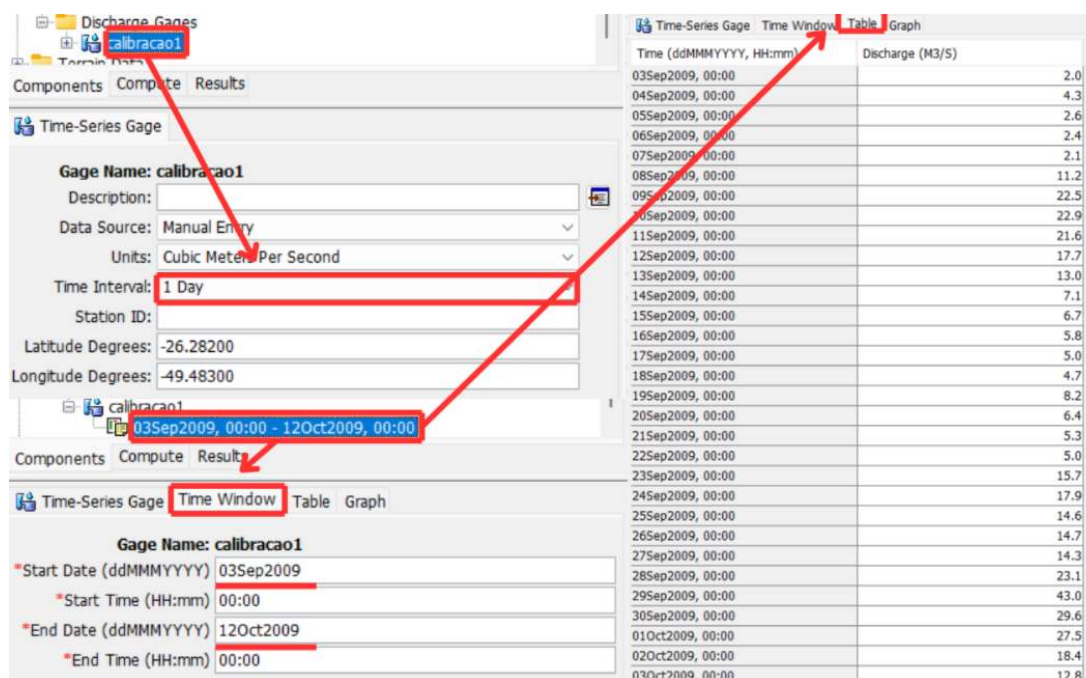
Fonte: Próprios autores.

3.6.4.2 Inserção do hidrograma de saída observado

Todas as informações sobre o hidrograma devem ser inseridas em "Discharge Gages".

- Em *Discharge Gages*, coloca-se os dados de vazão da calibração, da mesma forma que foi feito para as precipitações (Figura 3.51). Os dados considerados estão no mesmo documento utilizado para preencher os valores de chuva. As *units* consideradas são "Cubic Meters Per Second" e o *Time Interval* é "1 day".

Figura 3.51 – Criação das vazões a fim de calibrar o modelo.



Fonte: Próprios autores.

Para inserir o hidrograma de saída para calibração e validação e definir em qual região da bacia este está atribuído, deve-se:

- *Basin Model » bacia » Reach-3 » Options » Observed Flow » "Calibracao"* (Figura 3.52);

Note que foi optado por colocar os valores observados em *Reach-3*, pois este item é onde se encontra fisicamente a estação fluviométrica utilizada no presente projeto.

Figura 3.52 – Inserindo parte das configurações para calibrar o modelo.



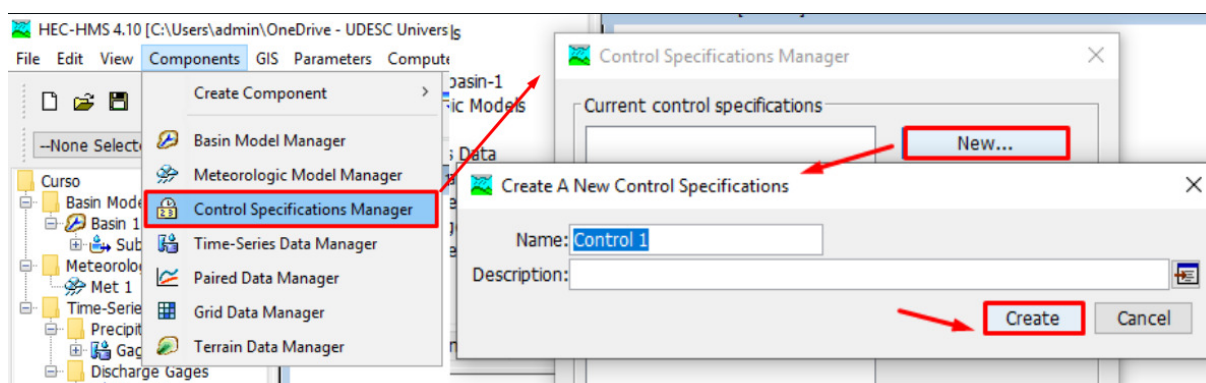
Fonte: Próprios autores.

3.6.4.3 Criação do Controle de especificações

Antes de se efetivar a calibrar, validar ou rodar o modelo, cria-se o "*Control Specifications Manager*" em:

- *Components » Control Specifications Manager* (Figura 3.53).

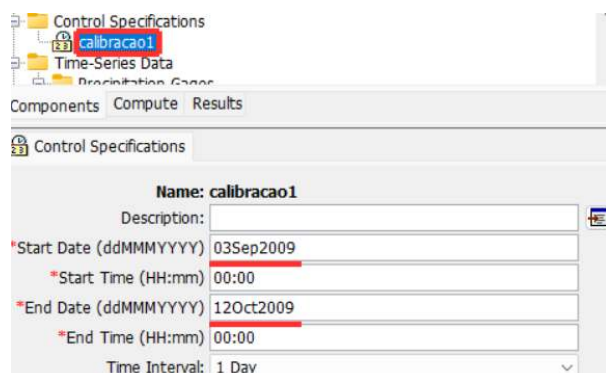
Figura 3.53 – Inserindo a outra parte das configurações para calibrar o modelo.



Fonte: Próprios autores.

Neste componente, deve-se definir qual o tempo de simulação, o dia e hora que começa e termina a simulação, conforme a Figura 3.54. É importante que a data definida neste gerenciador seja compatível com as datas das precipitações e vazões fornecidas anteriormente. Mantenha o "Time Interval" como "1 Day". Nota-se que este valor pode ser menor do que as discretizações das estações pluviométrica e fluviométrica.

Figura 3.54 – Inserindo a outra parte das configurações para calibrar o modelo.



Fonte: Próprios autores.

3.6.4.4 Rodando a simulação

A seguir, é apresentado como é realizada uma rodada da simulação, independentemente do seu objetivo, seja para rodar um cenário, calibrar ou validar um modelo. Assim, para rodar o modelo, deve-se acessar:

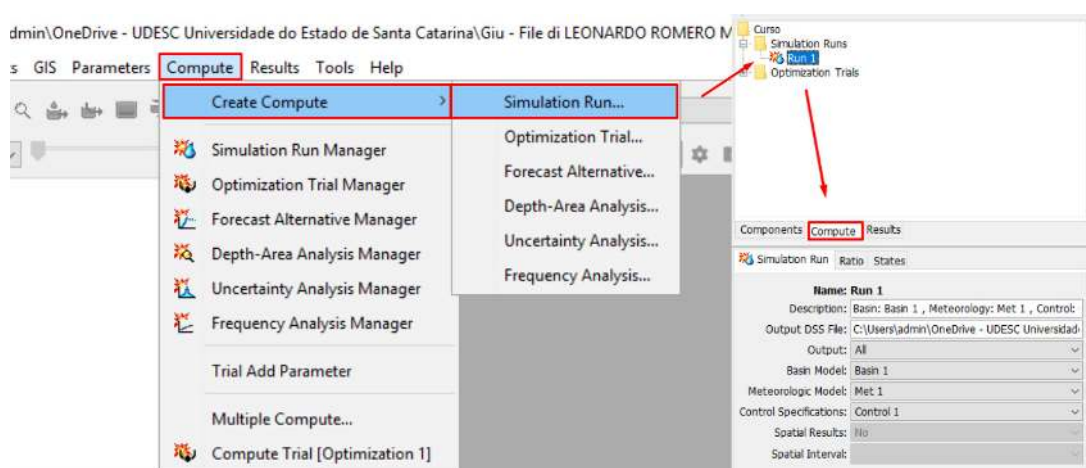
- *Compute » Create Compute » Simulation Run... » Run 1 (Next) » Basin Model (Next) » Meteorological Model (Next) » Control Specifications (Finish).*

Como definimos apenas um modelo de bacia, meteorológico e especificações de controle, teremos apenas uma opção de escolha para cada item;

- *Botão direito no Run 1 localizado na aba inferior Compute » Compute.*

Isso rodará efetivamente o modelo. (Figura 3.55).

Figura 3.55 – Rodando o modelo.



Fonte: Próprios autores.

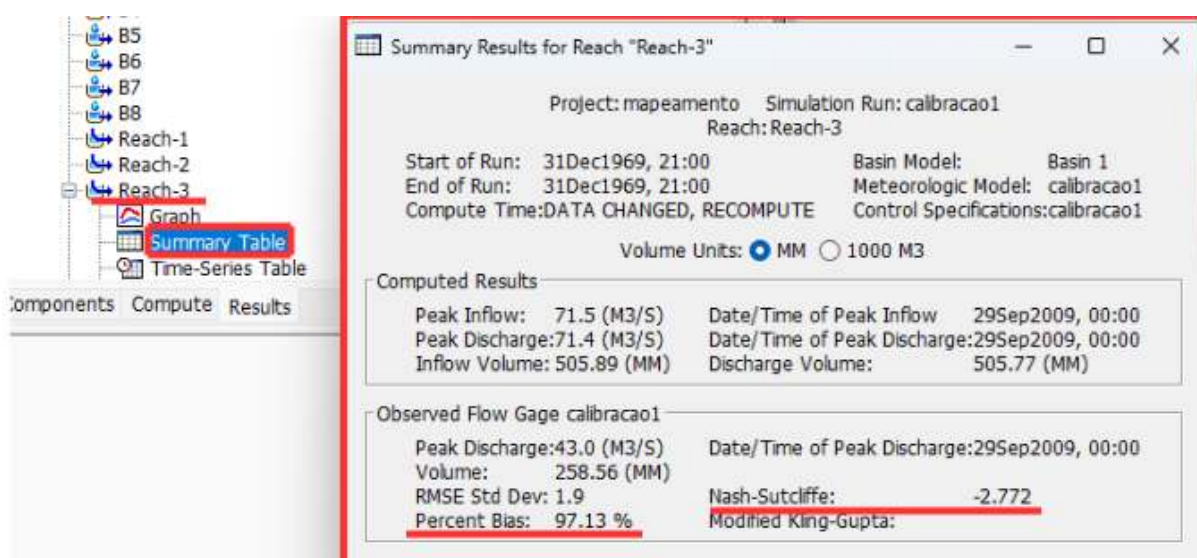
Uma janela com uma barra cinza aparecerá e, quando esta barra se tornar azul, a simulação terá terminado. Caso o usuário tenha cometido algum erro durante o preenchimento das informações para a modelagem, o programa indicará qual é o problema na janela de informações

com um texto em vermelho. Neste caso, deve-se interpretar qual foi o problema encontrado e tentar resolvê-lo.

Feito isso, é importante analisar os resultados. A princípio, analisamos os dados gerais da simulação e o número de Nash, que varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores próximos a 1 indicam um ajuste ótimo e, quanto menor, pior é a comparação dos dados simulados com os observados. Como se pode observar pela Figura 3.56, o procedimento para verificar os resultados é

- *Results (aba inferior) » Simulation Runs » Run 1 » Reach-3 » Summary Table* (Figura 3.56).

Figura 3.56 – Analisando os resultados simulados da calibração.



Fonte: Próprios autores.

Verifica-se a adequação do modelo pelo *Reach-3* que foi o local onde a estação fluviométrica foi considerada. Este número ficou negativo, isto é, pode-se afirmar que a simulação não foi boa. Também observa-se que o valor *Percent Bias* está alto. Para identificar se os valores das métricas de desempenho, *Nash-Sutcliffe* e *Percent Bias*, são satisfatórios, aconselha-se compará-las com valores apresentados em Moriasi et al. [2007]. No presente caso, é evidente a necessidade de calibrar o modelo.

Tabela 3.6 – Classificação das medidas de desempenho para modelos hidrológicos de chuva-vazão (NSE e PBIAS).

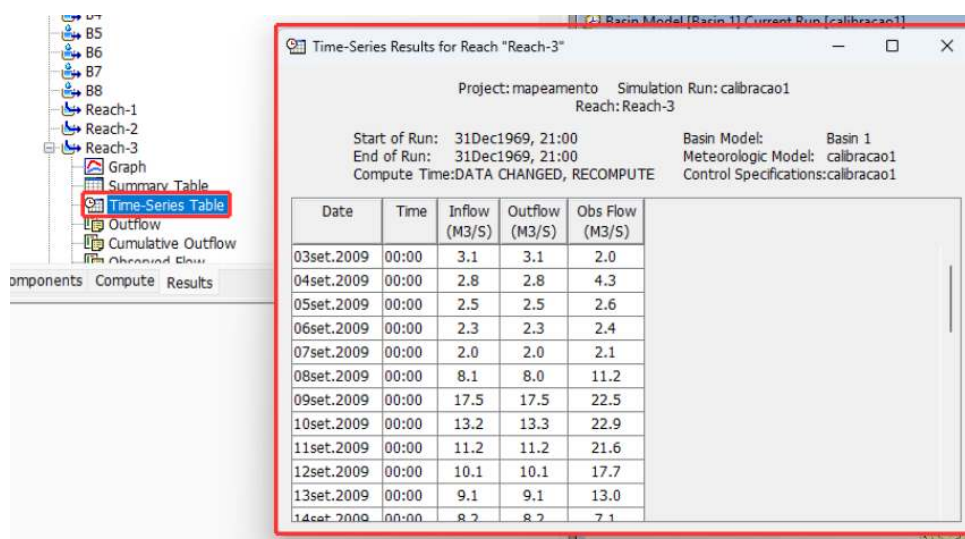
Medida	Muito bom	Bom	Satisfatório	Não satisfatório
NSE	$NSE > 0.80$	$0.70 \leq NSE < 0.80$	$0.50 \leq NSE < 0.70$	$NSE \leq 0.50$
PBIAS	$PBIAS < \pm 5$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$PBIAS \geq \pm 15$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. [2007].

Outro resultado interessante que pode ser visto é a tabela de séries temporais, acessadas por:

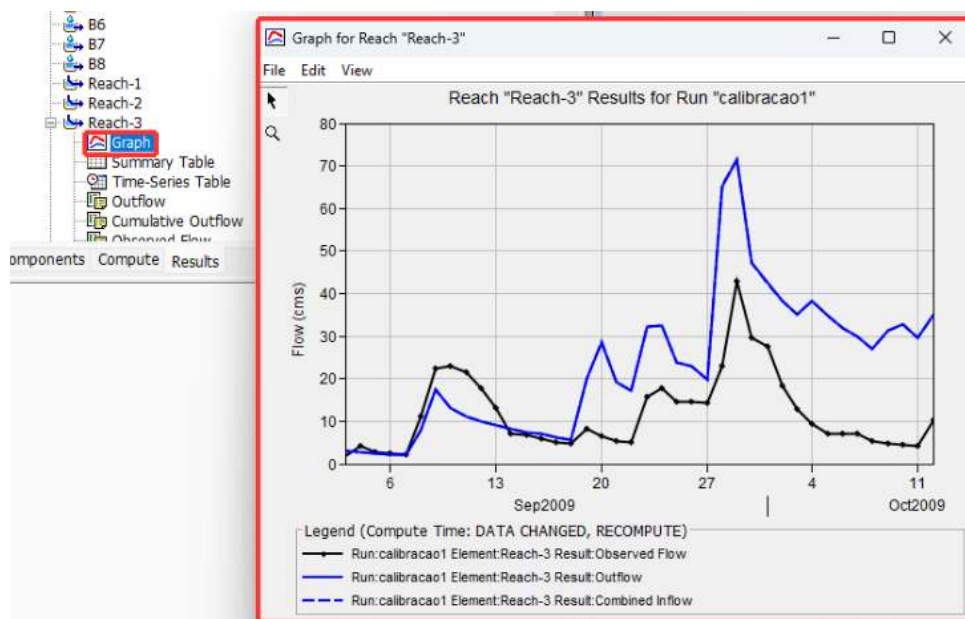
- *Results » Simulation Runs » Run 1 » Reach-3 » Time-Series Table* (Figura 3.57); Assim, é possível identificar os valores da vazão do evento calculado e do observado.
- *Results » Simulation Runs » Run 1 » Reach-3 » Graph* (Figura 3.58); Agora, pode-se identificar, de forma gráfica, a aderência entre os resultados.

Figura 3.57 – Analisando as séries temporais da calibração.



Fonte: Próprios autores.

Figura 3.58 – Analisando o gráfico para a calibração.



Fonte: Próprios autores.

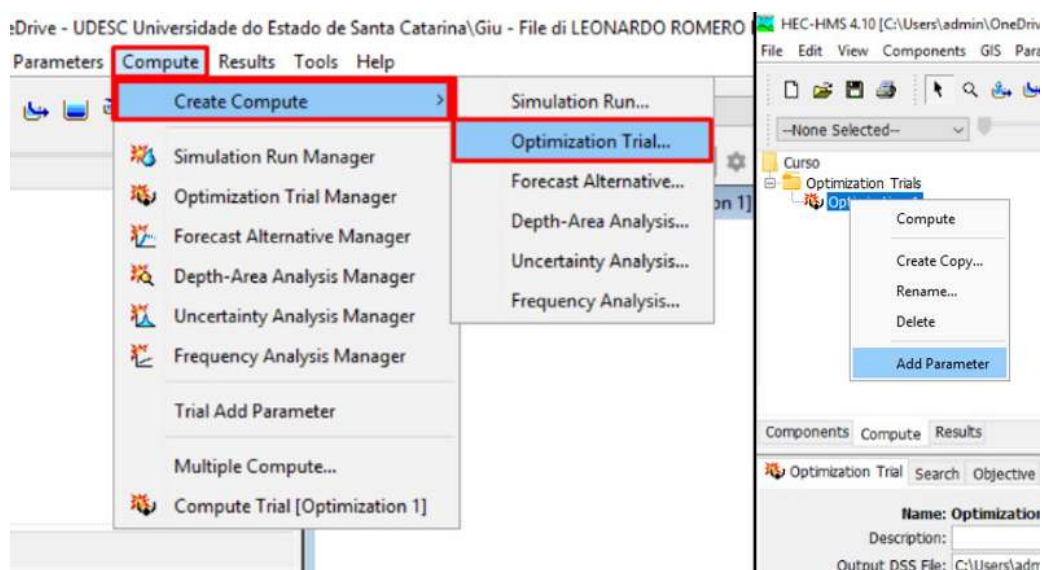
3.6.4.5 Calibração por Otimização

Nota-se que há uma discrepância considerável entre os valores calculados e os observados. Uma das possíveis soluções para reduzir essa diferença pode ser diminuir o valor do CN na aba "Loss", em *Components*, na parte do *SCS Curve Number*. Pode-se realizar essas mudanças manualmente e verificar a nova diferença entre os resultados.

No presente exemplo, utilizaremos o procedimento de calibração automática por otimização. Para isso, deve-se acessar:

- *Compute (aba) » Create Compute » Optimization Trial... » Optimiztion 1 (Next) » Basin Model (Next) » Meteorological Model (Finish)*
 - *Botão direito em Optimiztion 1 localizado na aba inferior Compute » Add Parameter.*
- Assim, pode-se adicionar o parâmetro a ser calibrado. Caso haja interesse em calibrar mais de um parâmetro ao mesmo tempo, deve-se repetir este último passo (Figura 3.59).

Figura 3.59 – Inserindo a outra parte das configurações para calibrar o modelo.



Fonte: Próprios autores.

Deve-se definir quais são os parâmetros a serem calibrados e quais as variações permitidas a estes, assim como a função-busca e a função-objetivo a ser utilizada na calibração automática. Essas representam as funções nas quais serão definidos os métodos numéricos de otimização a serem utilizados.

As principais funções de busca no HEC-HMS são:

- *Método da Evolução Diferencial (Differential Evolution)*: este método define um número de amostras (Population Size) que o programa distribui em diferentes posições dentro dos limites estabelecidos pelos parâmetros. A escolha dessas posições iniciais é guiada por um valor de semente (*Seed Value*), que influencia a aleatoriedade do processo (quanto

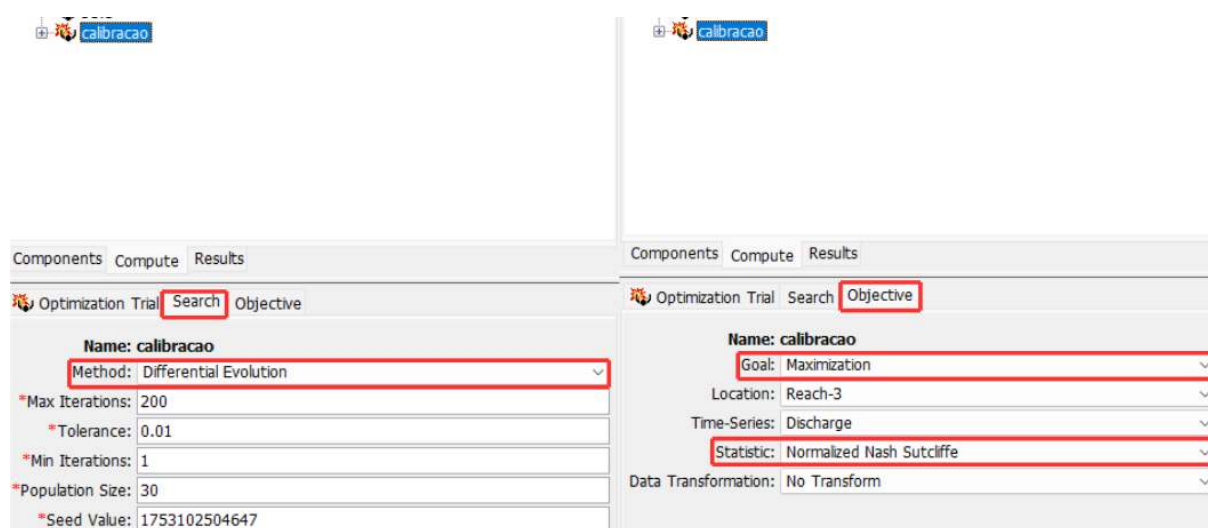
maior esse valor, maior a diversidade das amostras geradas). Essa variabilidade contribui para uma busca mais eficiente por soluções próximas do ótimo global, tornando o método robusto para problemas complexos de otimização.

- Método Simplex: geralmente menos preciso do que a Evolução Diferencial, o Simplex realiza a busca por soluções ao longo de um caminho que segue a trajetória mais direta entre os parâmetros definidos. Por sua abordagem mais simplificada, é mais suscetível a ficar preso em ótimos locais, o que pode comprometer a qualidade da otimização em problemas com múltiplos mínimos ou superfícies de resposta complexas.

Já na função-objetivo, deve-se utilizar a métrica que mais se adequa ao problema em questão. Neste exemplo, utilizaremos a métrica Nash-Sutcliffe normalizada. Esta estatística deve ser utilizada para a maximização (Figura 3.60). Para ter acesso aos métodos de função de busca e à função objetivo, deve-se acessar:

- *Optimization Trials » "Calibração" » Compute » Search;*
- *Optimization Trials » "Calibração" » Compute » Objective.*

Figura 3.60 – Configurando a Otimização do modelo.



Fonte: Próprios autores.

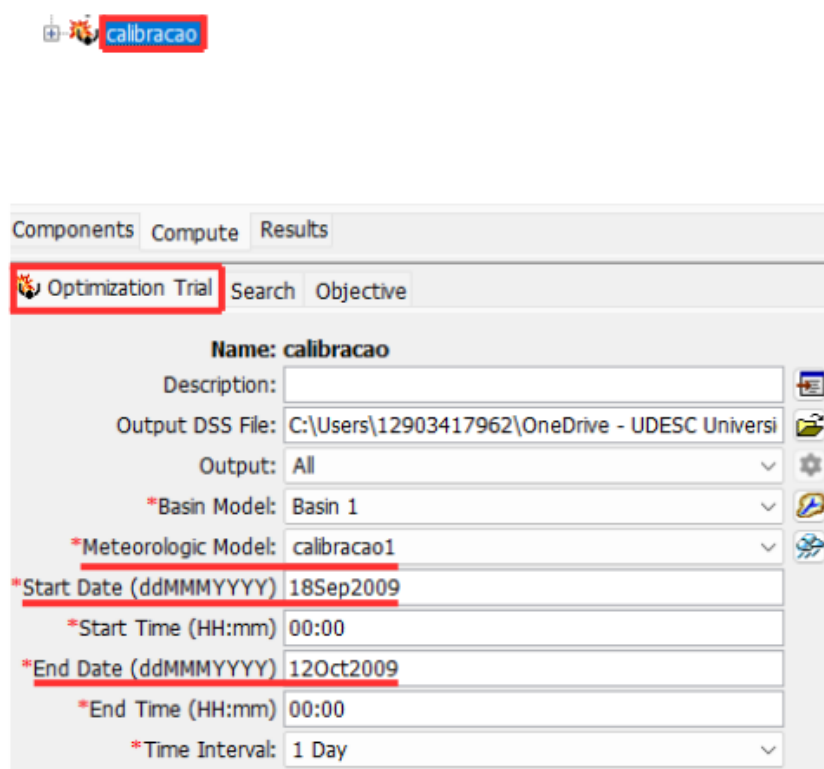
Além disso, é necessário definir quais parâmetros serão variáveis na calibração do modelo. Os limites de variação desses parâmetros (valores máximos e mínimos) devem refletir as características reais da bacia hidrográfica, evitando a adoção de valores irreais ou fisicamente incoerentes. A calibração deve focar nos parâmetros sobre os quais o usuário tem menor grau de confiança.

No presente exemplo, optou-se por calibrar quatro parâmetros: Tempo de Concentração para todas as subbacias; Coeficiente de Armazenamento para todas as subbacias; Recessão Constante para Bacia 1; Recessão Constante para a Bacia 2 e o tempo *Lag-Lag* para o *Reach-3*.

Para rodar a calibração, configuram-se as datas na parte inicial do "*Optimization Trial*" e acessa-se, conforme mostrado na Figura 3.61. Depois, com o botão direito em Optimization 1, clique em Compute.

Uma janela com uma barra cinza aparecerá imediatamente na tela. Quando esta barra se tornar azul, a calibração terá finalizado. Caso o usuário encontre algum erro durante o preenchimento das informações para a modelagem, o programa indicará qual problema ocorreu na janela de informações com um texto em vermelho. O usuário deve resolver os problemas apontados até a rodada ser bem sucedida.

Figura 3.61 – Calibrando o modelo.



Fonte: Próprios autores.

3.6.4.6 Resultados da otimização da calibração

Feita a otimização, vá à aba de Resultados (*Results*) e compare os dados obtidos em *Summary Table*, verifique se os números de *Nash-Sutcliffe* e *Percent Bias* foram coerentes com a Tabela 3.6. É possível verificar a aderência dos hidrogramas visualmente também pelo ícone "Graph" (Figura 3.62). Caso as métricas não estejam adequadas, será necessário refazer a otimização, mudando ou acrescentando parâmetros, alterando o método, modificando os limites de variação dos parâmetros calibrados, entre outras coisas.

Figura 3.62 – Finalizando a etapa de otimização do modelo.



Fonte: Próprios autores.

Prossiga em *Optimized Parameter* para encontrar os valores otimizados (*Optimized Value*) (Figura 3.63). O apresentado são as razões de variação dos parâmetros, isto é, como exemplo, temos que o Tempo de Concentração variou 5,0 vezes para cada subbacia, e o Coeficiente de Armazenamento foi menor, em uma razão de 2,1337. No passo da validação, esses novos valores dos parâmetros calibrados serão considerados na simulação.

Figura 3.63 – Parâmetros da Otimização.

Optimized Parameter Results for Trial "calibracao"

Project:mapeamento Optimization Trial:calibracao

Start of Trial: 18Sep2009, 00:00 Basin Model: Basin 1

End of Trial: 12Oct2009, 00:00 Meteorologic Model:calibracao1

Compute Time:05Aug2025, 09:13:48

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Reach-3	Lag - Lag	MIN	10	89.484
All Subbasins	Clark Unit Hydrograph - Storag...		1.00	2.1337
B1	Recession - Recession Constant		0.9	0.75884
All Subbasins	Clark Unit Hydrograph - Time of...		1.00	5.0000
B2	Recession - Recession Constant		0.9	0.71374

Fonte: Próprios autores.

3.6.5 Validação do modelo hidrológico

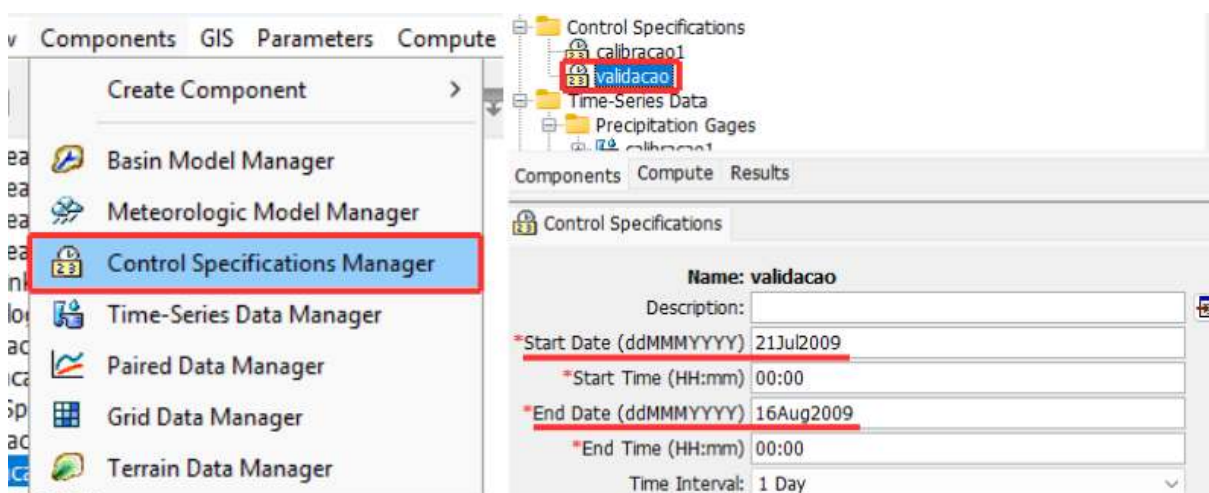
Completada a calibração do modelo, repetem-se os mesmos passos para a validação, porém com um novo evento, a fim de identificar se os parâmetros calibrados são representativos da bacia para outros eventos além do calibrado.

Assim, em síntese, cria-se um novo "Control Specification", adicionam-se as novas chuvas e a nova vazão, alteram-se os parâmetros das subbacia para os valores calibrados, e roda-se o modelo.

Iniciando pelo "Control Specification", temos:

- *Components » Control Specifications Manager » New » "Validacao"* (Figura 3.64); Considere os tempos do evento de validação, iniciando em 21/07/2009 e finalizando em 16/08/2009.

Figura 3.64 – Configurando o *Control Specifications Manager* para validação.



Fonte: Próprios autores.

3.6.5.1 Inserção de dados de precipitação

Para a etapa de precipitação com os novos dados (Figura 3.65):

- *Components » Time-Series Data Manager » Precipitation Gages » Gage 1 »* Renomeia-se para "Validação 1" ou "Validação 2" (consideramos que temos duas estações pluviométricas);
- *Precipitation Gages » "Validação 1" ou "Validação 2" » Components » Time-Series Gage »* Preenchem-se os dados;
- *"Validação 1" ou "Validação 2" » "+" » Time Window »* Preenchem-se os dados;

- "Validação 1" ou "Validação 2" » "+" » *Table* » Preenchem-se os dados de precipitação retirados do Excel, por meio das informações fornecidas pelo *site* da ANA;

Figura 3.65 – Inserindo valores de precipitação para validação do modelo.

VALIDAÇÃO			
Data	chuva1	chuva2	vazão
7/21/2009 0:00	0	0	1.7
7/22/2009 0:00	0	1.9	1.7
7/23/2009 0:00	9.3	8	3.3
7/24/2009 0:00	0.5	8.5	4.8
7/25/2009 0:00	0	4.1	3.9
7/26/2009 0:00	0	3	3.4
7/27/2009 0:00	2.7	10.2	2.7
7/28/2009 0:00	0	12.4	7.2
7/29/2009 0:00	0	16.9	9.2
7/30/2009 0:00	0.8	9.7	7.2
7/31/2009 0:00	16.2	10.7	6.0
8/1/2009 0:00	68.9	22.8	18.4
8/2/2009 0:00	10	20.8	27.9
8/3/2009 0:00	0	4.1	28.0
8/4/2009 0:00	0	0	22.4
8/5/2009 0:00	0	0	14.3
8/6/2009 0:00	3.2	0	6.0
8/7/2009 0:00	0	0	5.2
8/8/2009 0:00	0	0	4.3
8/9/2009 0:00	9.3	0	4.2
8/10/2009 0:00	0.5	9.8	4.2
8/11/2009 0:00	23	0	3.8
8/12/2009 0:00	0.3	0	2.6
8/13/2009 0:00	0	0	2.5
8/14/2009 0:00	0	0	2.3
8/15/2009 0:00	0	0	2.6
8/16/2009 0:00	0	0	2.3

Fonte: Próprios autores.

3.6.5.2 Inserção de dados de vazão

Para a etapa de vazão com os novos dados (Figura 3.66):

- *Components* » *Time-Series Data Manager* » *Discharge Gages* » *Gage 1* » Renomeia-se para "Validação";
- *Precipitation Gages* » "Validação" » *Components* » *Time-Series Gage* » Preenchem-se os dados;
- "Validação" » "+" » *Time Window* » Preenchem-se os dados;
- "Validação" » "+" » *Table* » Preenchem-se os dados de vazão retirados do Excel, com base nas informações fornecidas pelo *site* da ANA;

Figura 3.66 – Inserindo valores de vazão para validação do modelo.

The screenshot shows the HEC-HMS software interface. On the left, the 'validacao' gage is selected under 'Discharge Gages'. The 'Time-Series Gage' configuration is shown with fields for Gage Name, Description, Data Source, Units, Time Interval, Station ID, Latitude, and Longitude. The 'Table' tab is active, displaying a data table for validation.

Data	chuva1	chuva2	vazão
7/21/2009 0:00	0	0	1.7
7/22/2009 0:00	0	1.9	1.7
7/23/2009 0:00	9.3	8	3.3
7/24/2009 0:00	0.5	8.5	4.8
7/25/2009 0:00	0	4.1	3.9
7/26/2009 0:00	0	3	3.4
7/27/2009 0:00	2.7	10.2	2.7
7/28/2009 0:00	0	12.4	7.2
7/29/2009 0:00	0	16.9	9.2
7/30/2009 0:00	0.8	9.7	7.2
7/31/2009 0:00	16.2	10.7	6.0
8/1/2009 0:00	68.9	22.8	18.4
8/2/2009 0:00	10	20.8	27.9
8/3/2009 0:00	0	4.1	28.0
8/4/2009 0:00	0	0	22.4
8/5/2009 0:00	0	0	14.3
8/6/2009 0:00	3.2	0	6.0
8/7/2009 0:00	0	0	5.2
8/8/2009 0:00	0	0	4.3
8/9/2009 0:00	9.3	0	4.2
8/10/2009 0:00	0.5	9.8	4.2
8/11/2009 0:00	23	0	3.8
8/12/2009 0:00	0.3	0	2.6
8/13/2009 0:00	0	0	2.5
8/14/2009 0:00	0	0	2.3
8/15/2009 0:00	0	0	2.6
8/16/2009 0:00	0	0	2.3
20Jul2009, 00:00			
21Jul2009, 00:00			1.7
22Jul2009, 00:00			1.7
23Jul2009, 00:00			3.3
24Jul2009, 00:00			4.8
25Jul2009, 00:00			3.9
26Jul2009, 00:00			3.4
27Jul2009, 00:00			2.7
28Jul2009, 00:00			7.2
29Jul2009, 00:00			9.2
30Jul2009, 00:00			7.2
31Jul2009, 00:00			6.0
1Aug2009, 00:00			18.4
2Aug2009, 00:00			27.9
3Aug2009, 00:00			28.0
4Aug2009, 00:00			22.4
5Aug2009, 00:00			14.3
6Aug2009, 00:00			6.0
7Aug2009, 00:00			5.2
8Aug2009, 00:00			4.3
9Aug2009, 00:00			4.2
10Aug2009, 00:00			4.2

Fonte: Próprios autores.

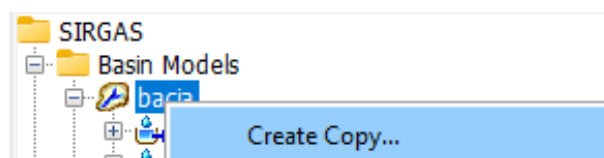
Para uma melhor visualização sem interferir nos valores anteriores da bacia, pode-se criar uma bacia copiada da anterior e mudar o referencial da bacia a partir dos comandos:

- *Create Copy » Copy* (Figura 3.67).

Agora, as informações podem ser adicionadas na cópia da bacia, para que a anterior não seja alterada. Vamos chamar esta nova bacia de "Validacao".

- Para assimilar os dados de vazão a nova bacia, deve-se acessar: *Basin Model » Validacao » Reach-3 » Options » Observed Flow » "Validação"*;
- *Meteorologic Models » Met 1 » Specified Hyetograph » Gage » "Validacao"*.

Figura 3.67 – Copiando a bacia.



Fonte: Próprios autores.

Com a nova bacia, será necessário corrigir os valores dos parâmetros a partir dos valores obtidos na calibração. Para isso, vá em *Optimized Parameters* (Figura 3.63) e, com o auxílio de uma planilha eletrônica, transponha os valores da coluna *Optimized Value*. Passe para esta planilha também os valores de cada parâmetro de cada subbacia e multiplique o coeficiente de correção pelo parâmetro antigo para obter o novo parâmetro (Figura 3.68). Sobreponha, no HEC-HMS, o valor antigo de cada parâmetro pelo novo valor encontrado. Um exemplo de como

ficará, à esquerda a bacia calibrada com os novos valores e à direita a bacia "original"(Figura 3.69).

Figura 3.68 – Exemplo da planilha.

TIME	5.000	Coefficient	2.1337	Reach 3 - Lag	89.484	B1 - recession	0.75884
6.21	31.05	13.4	28.59158	10	89.484	0.9	0.75884
5.42	27.1	10.2	21.76374			B2 - recession	0.71374
5.55	27.75	10.2	21.76374			0.9	0.71374
1.78	8.9	3.27	6.977199			Média - recession	
1.47	7.35	2.96	6.315752			0.9	0.73629
3.29	16.45	5.6	11.94872				
3.87	19.35	6.43	13.719691				
1.54	7.7	3.29	7.019873				

Valores que já se tinha
Valores criados por multiplicação ou substituição
Valores que recebemos da Otimização

Fonte: Próprios autores.

Figura 3.69 – Parâmetros da nova bacia calibrada.

Sub...	Initial Type	Initial Dis... (M3/S / K...	Initial Dis... (M3/S)	Recession ...	Threshol...	Threshol... (M3/S)	Ratio t...
B1	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B2	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B3	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B4	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B5	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B6	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B7	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7
B8	Discharge P...	0.02		0.9	Ratio to ...		0.7

Subbasin	Clark Met...	Time of Concent... (HR)	Storage Coeffi... (HR)	Time Area Me...	Percentage C...
B1	Standard	6.21	13.4	Default	
B2	Standard	5.42	10.2	Default	
B3	Standard	5.55	10.2	Default	
B4	Standard	1.78	3.27	Default	
B5	Standard	1.47	2.96	Default	
B6	Standard	3.29	5.6	Default	
B7	Standard	3.87	6.43	Default	
B8	Standard	1.54	3.29	Default	

Sub...	Initial Type	Initial Dis... (M3/S / K...	Initial Dis... (M3/S)	Recession ...	Threshol...	Threshol... (M3/S)	Ratio t...
B1	Discharge P...	0.02		0.75884	Ratio to ...		0.7
B2	Discharge P...	0.02		0.71374	Ratio to ...		0.7
B3	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7
B4	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7
B5	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7
B6	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7
B7	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7
B8	Discharge P...	0.02		0.73629	Ratio to ...		0.7

Subbasin	Clark Met...	Time of Concent... (HR)	Storage Coeffi... (HR)	Time Area Me...	Percentage C...
B1	Standard	31.05	28.59158	Default	
B2	Standard	27.1	21.76374	Default	
B3	Standard	27.75	21.76374	Default	
B4	Standard	8.9	6.977199	Default	
B5	Standard	7.35	6.315752	Default	
B6	Standard	16.45	11.94872	Default	
B7	Standard	19.35	13.719691	Default	
B8	Standard	7.7	7.019873	Default	

Fonte: Próprios autores.

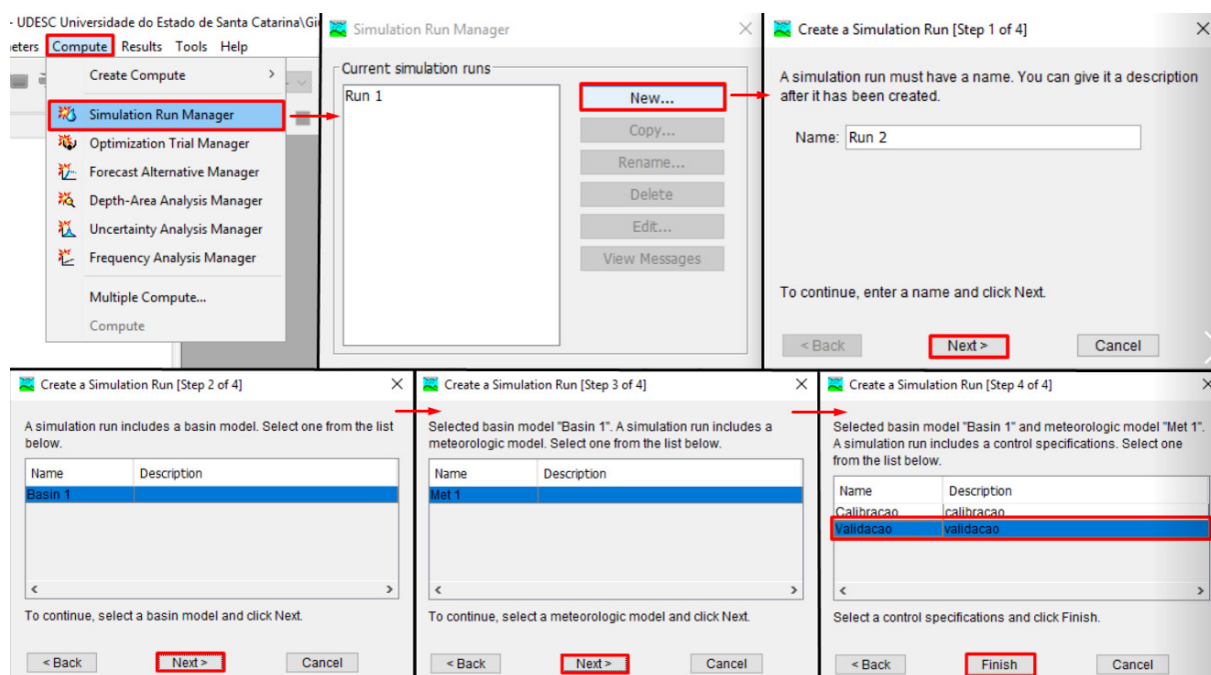
3.6.5.3 Simulação da validação

Para rodar a validação, deve-se criar um novo *Run*:

- *Compute » Create Compute » Simulation Run... » Run1 » Compute*

No novo *Run* que foi criado para a validação será necessário colocar em *Basin Model* a nova bacia que foi criada, em *Meteorologic Model* e *Control Specifications* colocará também a nova estação e o novo controle. (Figura 3.70).

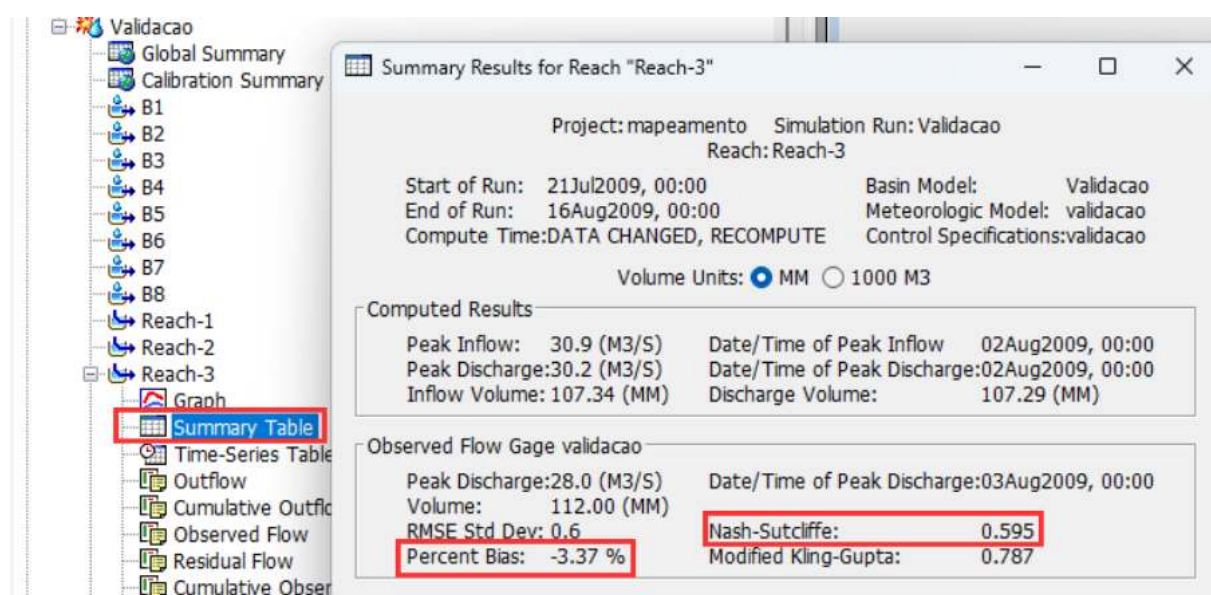
Figura 3.70 – Simulando a validação do modelo.



Fonte: Próprios autores.

Depois de rodar o *Run* da validação, vá aos resultados do parâmetro que estabeleceu e clique em *Summary Table*, como feito na Figura 3.62 (Figura 3.71). Será necessário observar, novamente, o *Nash-Sutcliffe* (NSE) e o *Percent Bias* (PBIAS) comparando com a Tabela 3.6, que já vimos anteriormente. Podemos observar que o *Nash-Sutcliffe* nos forneceu um valor satisfatório, enquanto o *Percent Bias* apresentou um valor considerado muito bom.

Figura 3.71 – Resultado da Validação.

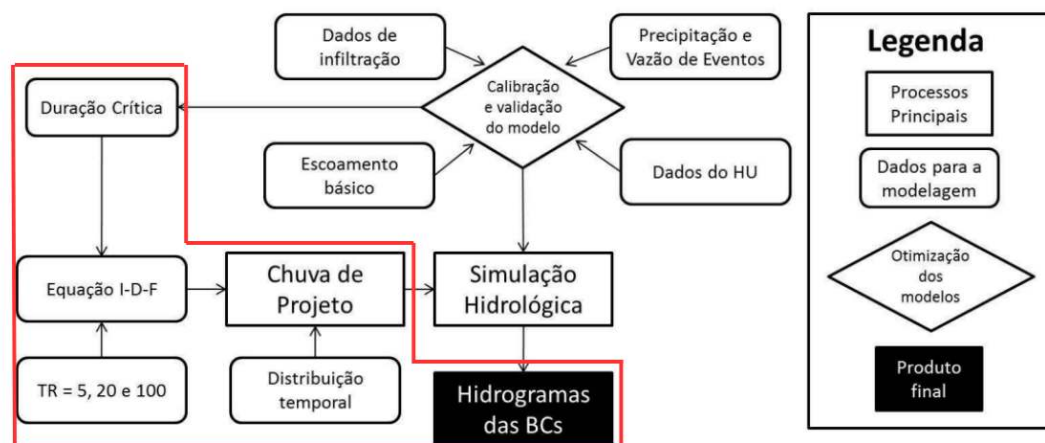


Fonte: Próprios autores.

3.6.6 Criação do Hidrograma de projeto

Com o modelo calibrado e validado, deve-se seguir para a criação dos hidrogramas de projeto, que serão posteriormente utilizados na simulação hidrodinâmica. Para isso, deve-se, a partir de uma equação IDF, criar chuvas de projeto para durações críticas¹⁵ e períodos de retorno definidos (Figura 3.72).

Figura 3.72 – Fluxograma



Fonte: Adaptado de Monteiro and Kobiyama [2013].

3.6.6.1 Equação IDF

A equação IDF relaciona a Intensidade, Duração e Frequência de uma precipitação e é obtida a partir da análise estatística de séries longas de dados de um pluviógrafo (com pelo menos 30 anos de dados). Existem diferentes formas de calcular a IDF, que não convém explicar neste trabalho. Portanto, aconselha-se utilizar uma equação já desenvolvida, caso não se tenha conhecimento para criar uma. Em seguida, apresentaremos duas formas que podem ser utilizadas para obter IDFs.

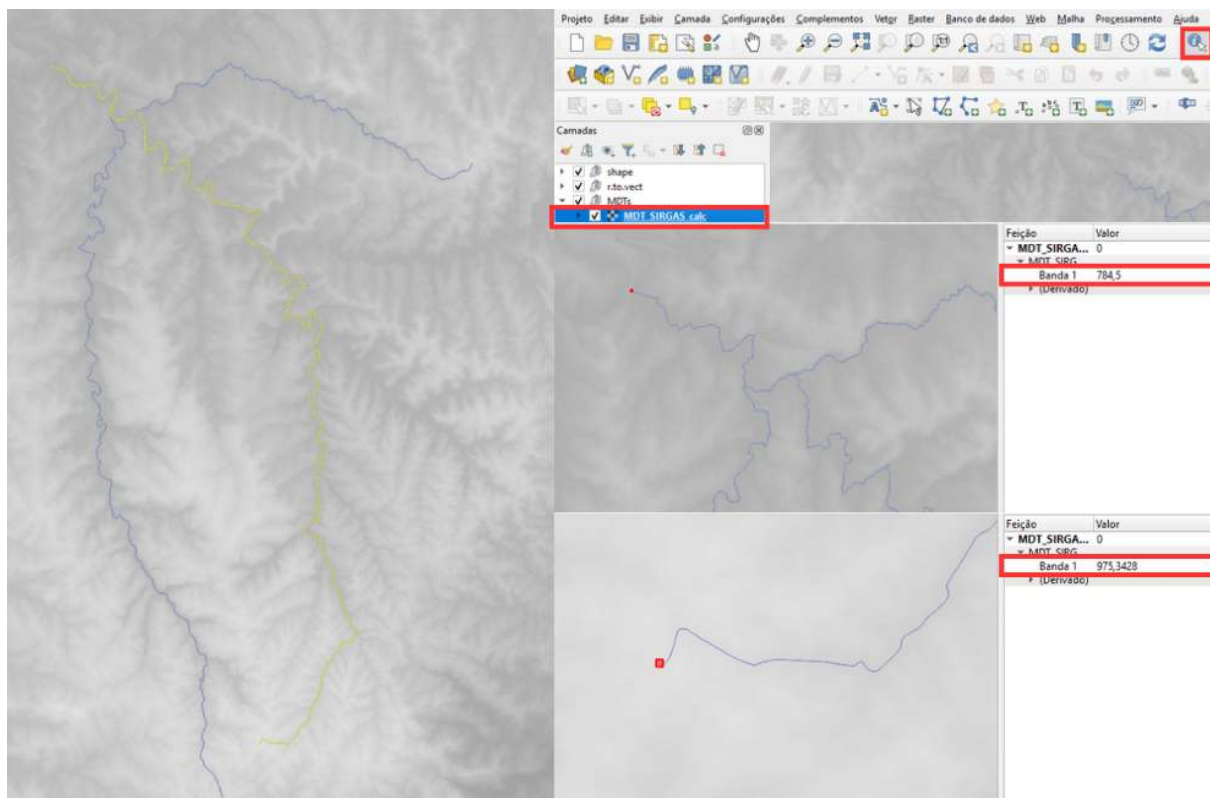
3.6.6.2 Tempo de Concentração do Rio Principal

Anteriormente, fizemos o cálculo do tempo de concentração das bacias no próprio *HEC-HMS*, mas para os próximos passos também precisamos deste tempo para o rio principal, pois utilizaremos este valor como base para o tempo de duração da nossa chuva de projeto. Portanto, calcularemos a Equação 3.11 pelo QGIS, lembrando que usaremos somente o resultado que se apresentar no rio principal (Rio Negrinho). Assim, precisamos da declividade e do comprimento do rio principal. Para obtermos a declividade, usaremos a ferramenta "Identificar

¹⁵ As chuvas com duração crítica são aquelas que fornecem a maior vazão de pico do hidrograma. Para se identificar este tempo, é necessário avaliar diversos tempos de duração a partir de modelagem hidrológica.

Feições" juntamente com o MDT selecionado, onde iremos selecionar o ponto mais alto e o mais baixo do rio, coletando esses dados (Figura 3.73).

Figura 3.73 – Declividade do Rio Principal.



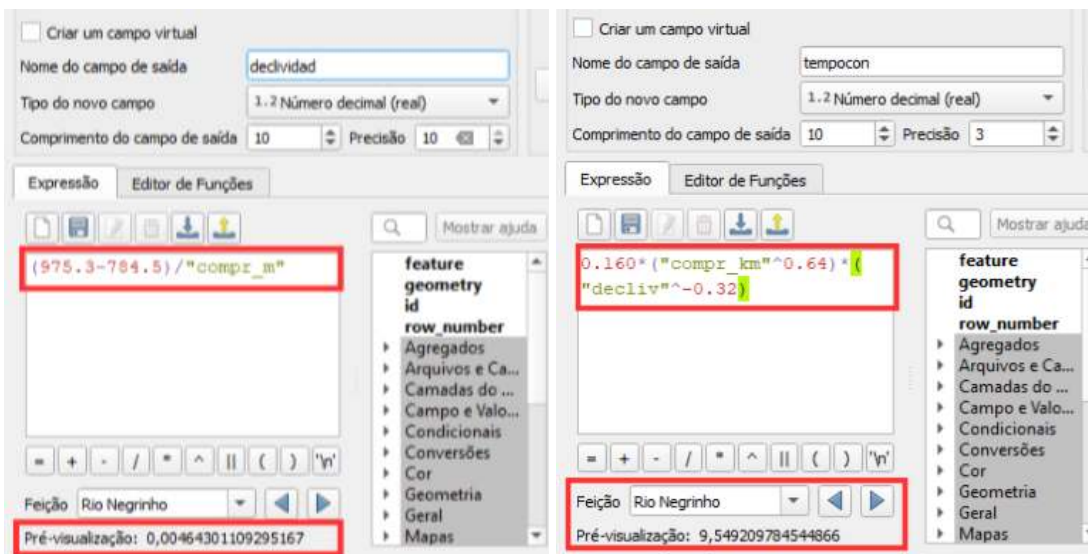
Fonte: Próprios autores.

Para o cálculo, usaremos a cota maior menos a menor, dividido pelo comprimento do rio em metros (Figura 3.74a). Posteriormente, utilizamos a Equação 3.11, como dito anteriormente, lembrando que a unidade do tempo de concentração para esta equação é horas (Figura 3.74b).

Figura 3.74 – Calculadora de Campo.

(a) Cálculo da Declividade do Rio Principal.

(b) Cálculo do Tempo de Concentração.



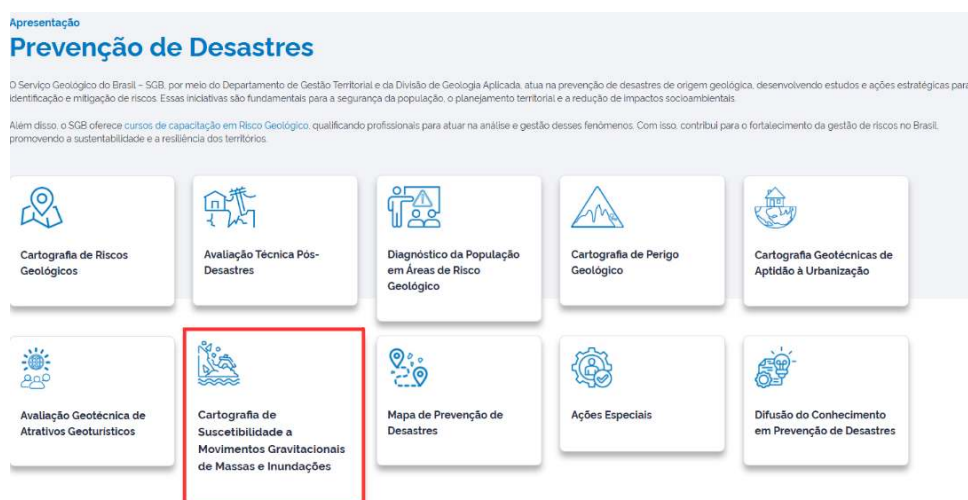
Fonte: Próprio autor.

3.6.6.3 Método 1 - Serviço Geológico Brasileiro e Planilha Eletrônica

Neste método utilizaremos o Serviço Geológico Brasileiro (SGB). Infelizmente, não é toda cidade que tem a equação IDF definida pelo SGB. Por conta disso, pode ser necessário procurar em outro lugar, como em artigos acadêmicos, planos de macrodrenagem municipal, etc.

No *site* do [SBG](#) na aba "Geocientífico" pode-se encontrar em "[Prevenção de Desastres](#)" as "Cartas de Suscetibilidade" (Figura 3.75), que direciona para a parte de "[Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações](#)", onde é possível acessar a primeira opção "[Produtos por Estado](#)" (Figura 3.76).

Figura 3.75 – Cartas de Suscetibilidade.

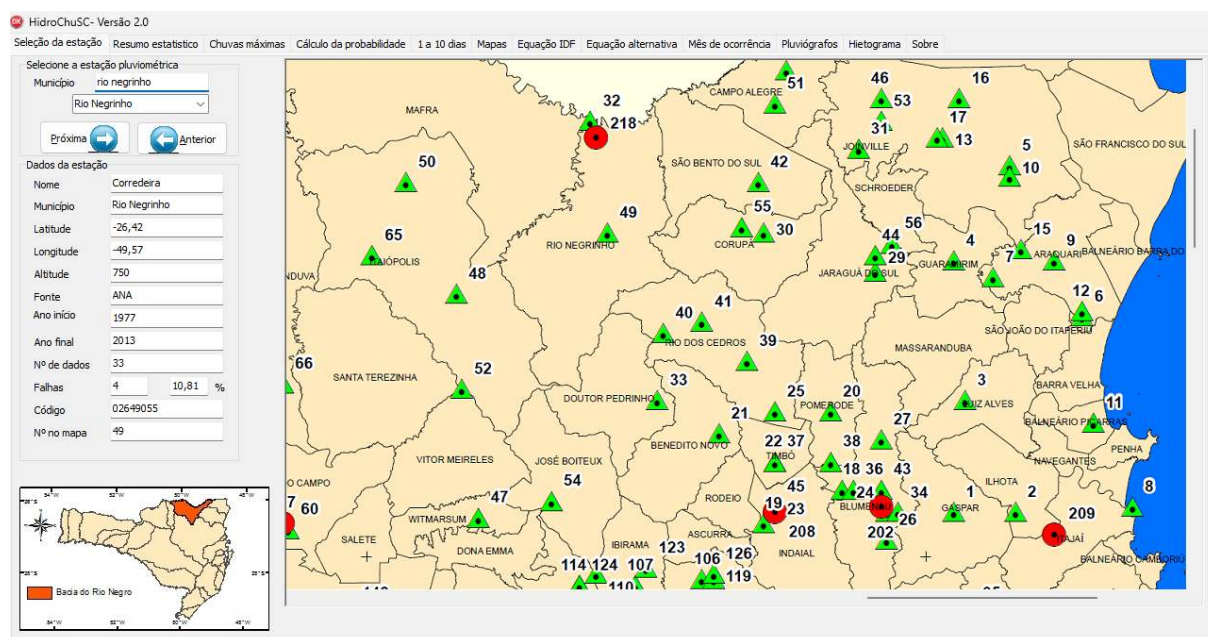


Fonte: Próprios autores.

3.6.6.4 Método 2 - HidroChuSC

Neste método, utilizaremos o programa [HidroChuSC \[Back, 2021\]](#) (disponível para *download* clicando no nome do *software*). Desenvolvido para o estado de Santa Catarina, o HidroChuSC permite obter diretamente as curvas IDF para cidades catarinenses a partir dos dados da ANA de até 2019. Mesmo que a sua cidade de estudo não esteja localizada em Santa Catarina, este programa pode ser utilizado para facilitar o processo da aplicação da IDF e a criação da chuva de projeto.

Figura 3.78 – HidroChuSC.



Fonte: Próprios autores.

No HidroChuSC, a cidade de Rio Negrinho possui duas estações disponíveis. Se, porventura, se depare com essa situação, recomenda-se optar pela estação que apresentar o maior volume de dados, preferencialmente aquela com registros superiores a 30 anos, para se ter maior confiabilidade nos resultados. No nosso caso, utilizaremos a Estação "Corredeira".

Figura 3.79 – Comparando estações.

Seleção a estação pluviométrica	
Município	rio negrinho
Rio Negrinho	
Próxima	Anterior
Dados da estação	
Nome	Corredeira
Município	Rio Negrinho
Latitude	-26,42
Longitude	-49,57
Altitude	750
Fonte	ANA
Ano início	1977
Ano final	2013
Nº de dados	33
Falhas	4 10,81 %
Código	02649055
Nº no mapa	49

Seleção a estação pluviométrica	
Município	rio negrinho
Rio Negrinho	
Próxima	Anterior
Dados da estação	
Nome	Rio Negrinho
Município	Rio Negrinho
Latitude	-26,25
Longitude	-49,59
Altitude	792
Fonte	Epagri
Ano início	1991
Ano final	2013
Nº de dados	23
Falhas	0 0,00 %
Código	0574
Nº no mapa	218

Fonte: Próprios autores.

Ao acessar a aba "Equação IDF" e escolher "Baseado nas relações médias de SC (Back, 2013)" o *software* já fornecerá os coeficientes para a equação IDF. Mas, se a sua cidade não for de Santa Catarina, ou não estiver contemplada neste *software*, pode se mudar os coeficientes da equação no programa manualmente e, assim, o processo da chuva de projeto pode ser realizado.

Figura 3.80 – Equação IDF.

HidroChuSC- Versão 2.0

Seleção da estação Resumo estatístico Chuvas máximas Cálculo da probabilidade 1 a 10 dias Mapas **Equação IDF**

$$i = \frac{KT^m}{(t+b)^n}$$

Opção para os coeficientes

☐ Baseado na relações médias do Brasil (Cetesb, 1986)

☒ Baseado nas relações médias de SC (Back, 2013)

Coeficientes da equação

K	564,21	RMEQ	2,0900
m	0,2079	R ²	0,9974
b	9,16	Nash	0,9973
n	0,7117		

Nº de valores

Nº de valores 1

Relatório *.pdf

Relatório *.txt

Intensidade (mm/h)

Fonte: Próprios autores.

3.6.6.5 Chuva de Projeto e Duração Crítica

Para o Mapeamento de Perigo de Inundação, devem-se criar precipitações de projeto para obter diferentes mapas de inundação. Para isso, serão utilizados diferentes tempos de retorno (TRs). Neste caso:

- TR de 5 anos;
- TR de 20 anos;
- TR de 100 anos.

Neste exemplo, foi adotado o quarto quartil do método de Huff para fazer a distribuição temporal da chuva, pois, com a variação das distribuições temporais de precipitação, quando o pico da precipitação se localiza ao final do evento, o valor máximo da vazão do hidrograma aumenta e sua duração é reduzida, segundo [Monteiro and Kobiyama \[2014\]](#).

Agora para utilizarmos a equação IDF, é necessário definir a duração da precipitação que gerará a pior situação de inundação, conhecida como Duração Crítica. Assim, para definir a Duração Crítica do evento de projeto, deve-se analisar a vazão de pico gerada pela precipitação, onde obtém-se a vazão máxima. Sobre isso, são levantados alguns questionamentos, como:

- Qual é o tempo crítico de duração da precipitação?
- Ou seja, qual é o tempo de precipitação que fornecerá o pior evento?
- Estudos preliminares mostram que o tempo de duração crítica é aproximadamente de 3 a 5 vezes o tempo de concentração da bacia [[Innocente et al., 2018](#)].

Como o tempo de duração da chuva será o tempo de duração crítica, deve-se buscar este valor por meio da simulação hidrológica. Adota-se o tempo de retorno de 5 anos para determinar a duração crítica da chuva que gera o maior pico de vazão.

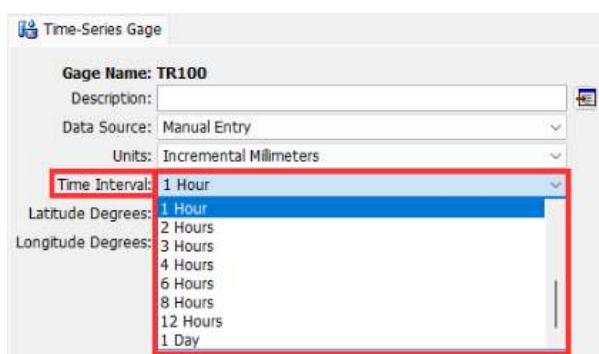
Considerando que o tempo de concentração na região avaliada é o Tempo de Concentração da B2 mais os tempos de percurso do Reach-2 e Reach 1, que é de aproximadamente 7 horas (420 minutos), podemos obter o valor de 400 minutos; os tempos testados serão de 400, 600, 1200, 2400 e 3600 minutos.

Por fim, fazemos simulações no HEC-HMS até verificarmos quais dos tempos forneceram a maior vazão no exutório da bacia (a seguir será apresentado o procedimento básico de simulação no HEC-HMS com o modelo calibrado e validado). Após isso, com a precipitação crítica encontrada, devem-se elaborar os hidrogramas de saída das BCs para os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. Para isso, utilizam-se os valores encontrados de precipitação do modelo, substituindo-os no programa.

3.6.6.6 Aplicação no HidroChuSC

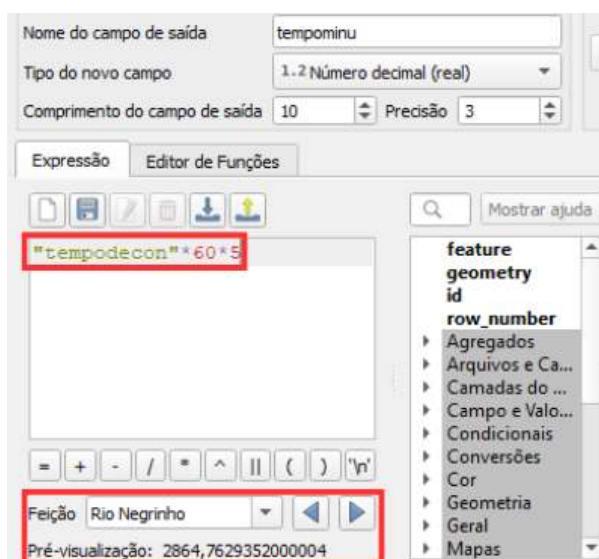
Como o tempo de concentração que obtivemos no QGIS é em horas, mudaremos para minutos e também multiplicaremos por 5, como já explicado anteriormente. Porém, como depois iremos repassar esses valores para o HEC-HMS devemos ter um valor que seja múltiplo de um possível intervalo que o programa aceita (Figura 3.81), portanto, usaremos a partir daqui 2880. O 2880 é por ser um número próximo de 2865 (Figura 3.82) e quando dividido por 60 nos dá um valor inteiro.

Figura 3.81 – Intervalos HEC-HMS



Fonte: Próprios autores.

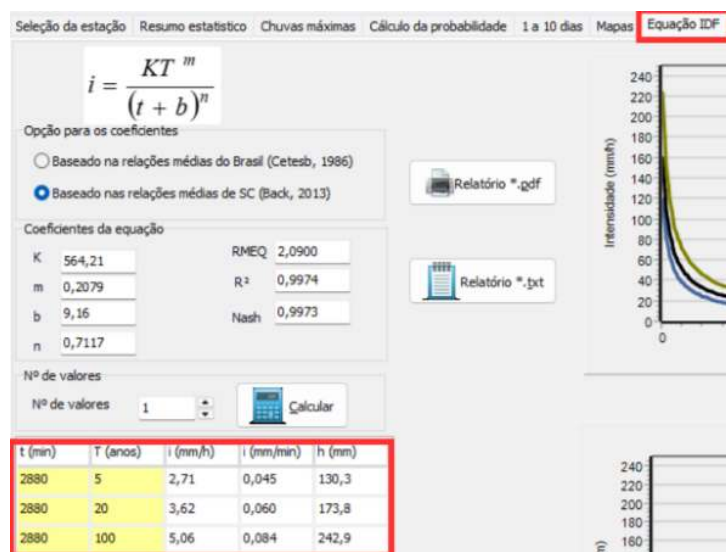
Figura 3.82 – Tempo de Concentração para o HidroChuSC.



Fonte: Próprios autores.

No Hidrochu, iremos inserir este valor no campo "t (min)" e em "T (anos)" utilizaremos os períodos de retorno citados acima. Concluídos ambos os passos, agora podemos realizar os cálculos (Figura 3.83), referentes à intensidade em *mm/h* e em *mm/min* e à precipitação total em *mm*.

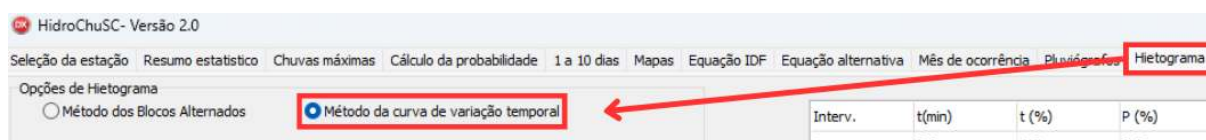
Figura 3.83 – Colocando as informações.



Fonte: Próprios autores.

Após isso, iremos em "Hietograma" e em "Opções de Hietograma" selecionaremos "Método da curva de variação temporal".

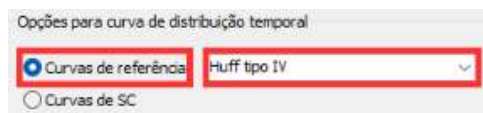
Figura 3.84 – Hietograma no HidroChuSC.



Fonte: Próprios autores.

Em "Opções para curva de distribuição temporal" usaremos "Curvas de referência" e usaremos para a distribuição "Huff tipo IV".

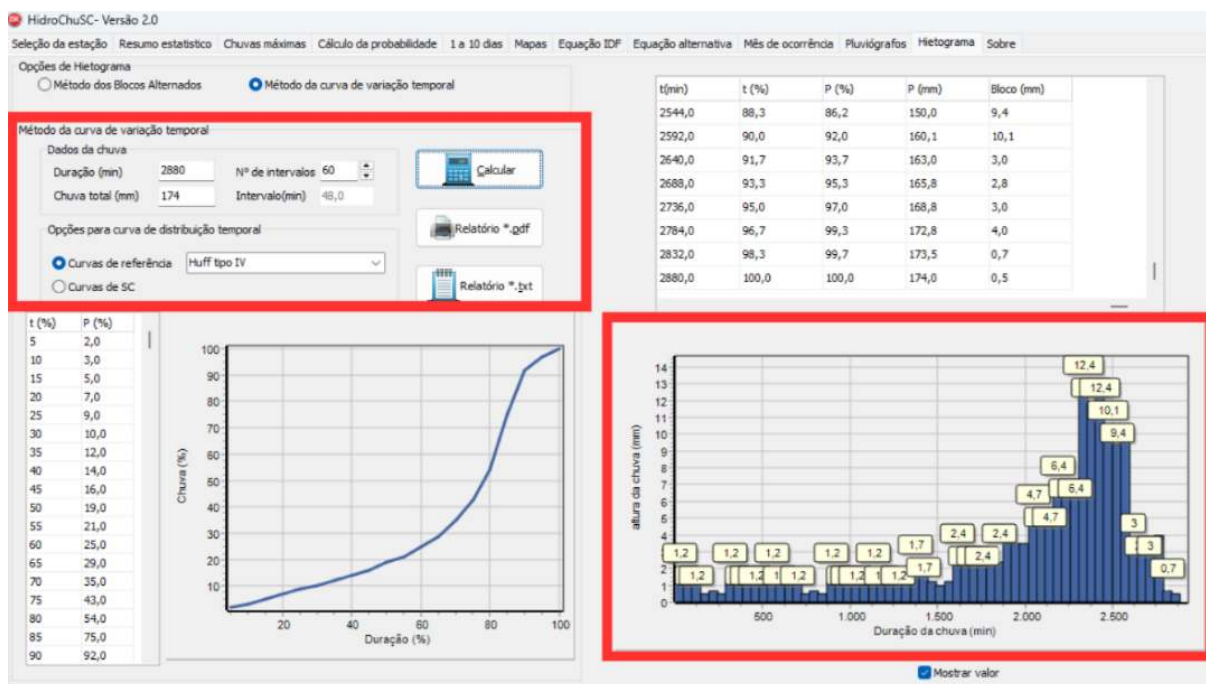
Figura 3.85 – Opções para curva.



Fonte: Próprios autores.

Agora, para obter o hietograma adicionamos os valores de "Duração(min)", "Chuva total(mm)" e "Nº de intervalos". Aconselha-se utilizar o valor do número de intervalos para que cada intervalo fique com um número inteiro, capaz de ser colocado no HEC-HMS sem maiores problemas. Podemos utilizar planilhas eletrônicas para nos organizar e facilitar o processo.

Figura 3.86 – Hietograma.



Fonte: Próprios autores.

3.6.6.7 Aplicação no HEC-HMS

Nota-se que o processo de calibração, validação e busca da precipitação crítica é geralmente realizado para a bacia inteira. Como foi utilizado um sistema de subbacias, podemos entender que cada subbacia simulada é uma subbacia de nosso interesse para a posterior modelagem hidrodinâmica. No presente caso, B3 representa o Rio dos Bugres, B1, B2, B5, B6, Reach 3 e Reach 4 juntos representam o Rio Negrinho a montante da zona urbana e B7 representa o Rio Serrinha. Assim, as vazões destes rios, que serão utilizadas na simulação hidrodinâmica podem ser obtidas diretamente deste modelo concentrado em sistemas.

Para realizar a substituição de dados de chuva do programa, seguem-se os seguintes caminhos (Figura ??):

- *Components » Control Specifications Manager » New » "TR";*
- *Components » Time-Series Data Manager » Discharge Gages » Gage 1 » Renomeia-se para "TR5" (para o tempo de retorno de 5 anos);*
- *Precipitation Gages » "TR5" » Components » Time-Series Gage » Preenchem-se os dados;*
- *"TR5" » "+" » Time Window » Preenchem-se os dados;*
- *"TR5" » "+" » Table » Preenchem-se os dados de vazão retirados do Excel, por meio das precipitações encontradas, além disso, preenchem-se com "0" os valores que sobram;*

dado que a série tem que possuir 3 a 5 vezes mais valores, como no exemplo da Figura 3.87;

Figura 3.87 – Alterando a tabela de chuva conforme o TR.

Time (ddMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (MM)
1Jan2000, 00:00	1.2
1Jan2000, 01:00	1.0
1Jan2000, 02:00	1.2
1Jan2000, 03:00	0.5
1Jan2000, 04:00	0.7
1Jan2000, 05:00	0.5
1Jan2000, 06:00	1.2
1Jan2000, 07:00	1.0
1Jan2000, 08:00	1.2
1Jan2000, 09:00	1.2
1Jan2000, 10:00	1.2
1Jan2000, 11:00	1.0

Fonte: Próprios autores.

- Copia-se o "TR5" criado em *Precipitation Gages* com o botão direito do mouse e cola-se duas vezes na mesma aba, feito isso, renomeiam-se para TR20 e TR100;

Figura 3.88 – Resumo dos procedimentos para configurar a substituição dos dados no programa.

Valores adicionados para os TRs, conforme o valor de 2880 minutos obtidos anteriormente

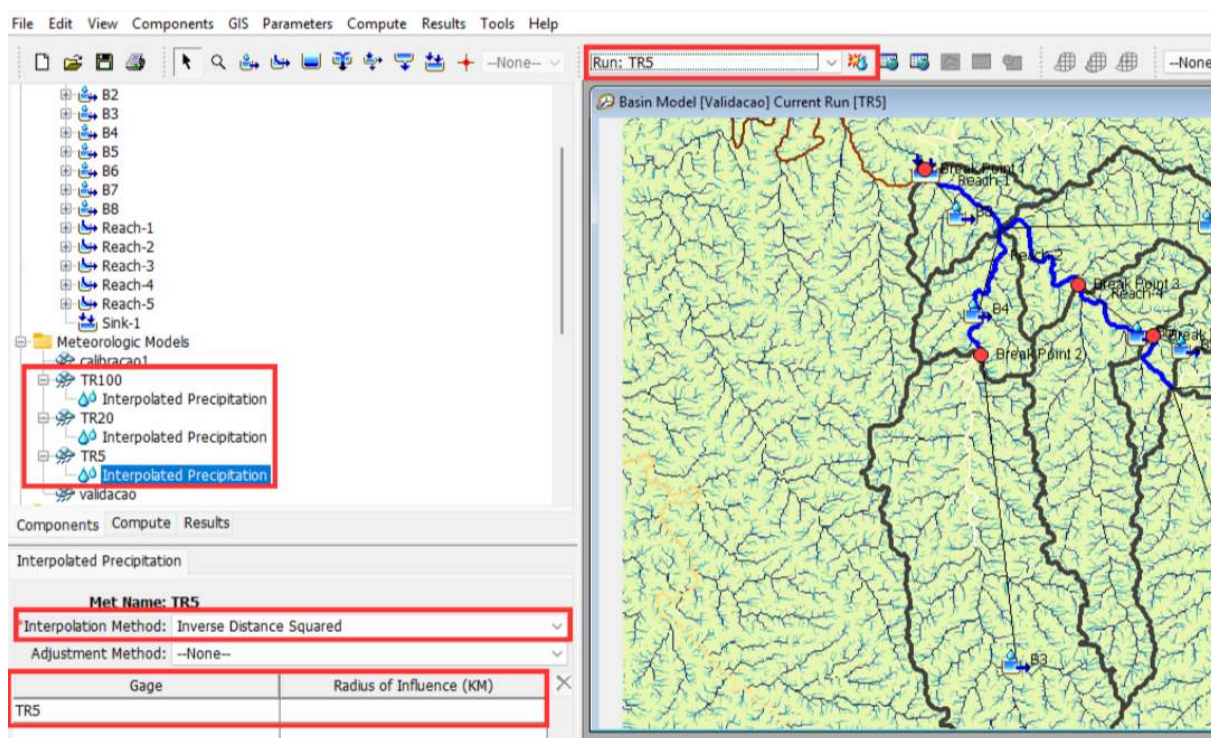
Nesse caso, o evento terminaria dia 03/01/2000 às 12:00, mas terminou dia 07/01/2000 às 12:00

Gage Name: TR20	
*Start Date (ddMMYYYY)	01Jan.2000
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	07Jan.2000
*End Time (HH:mm)	12:00

Fonte: Próprios autores.

- Nos itens "TR20" e "TR100" » "+" » *Table* » Preenchem-se os dados de vazão retirados do Excel, por meio das precipitações encontradas;
- Além disso, altera-se a precipitação considerada em *Meteorologic Models* » *Met 1* » *Specified Hyetograph* » *Gage* » "TR20" para rodar o TR de 20 anos, e assim por diante (Figura 3.89);

Figura 3.89 – Alterando a precipitação para descobrir as vazões da área AI.



Fonte: Próprios autores.

- Por fim, em *Compute* » *Create Compute* » *Simulation Run...* » Nomeia-se como *TR5* » *Compute* (repete-se o passo para criar uma simulação para TR20 e TR100);
- *Results* » *Simulation Runs* » *TR5* » *B3* » *Time-Series Table*;
- *Results* » *Simulation Runs* » *TR5* » *B7* » *Time-Series Table*;
- *Results* » *Simulation Runs* » *TR5* » *Reach-5* » *Time-Series Table*;
- Os passos anteriores repete-se para observar os dados de TR20 e TR100;
- Copiam-se os valores do "*Total Flow*" para as bacias e "*Outflow*" para *Reach-5* e, assim, eles são colados na planilha eletrônica.

Figura 3.90 – Planilha eletrônica com os dados organizados.

TR5			TR20			TR100		
B3-Total Flow	B7-Total Flow	Reach-5	B3-Total Flow	B7-Total Flow	Reach-5	B3-Total Flow	B7-Total Flow	Reach-5
1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8
1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8
1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8	1.4	0.5	3.8
1.4	0.5	3.7	1.4	0.5	3.7	1.4	0.5	3.7
1.3	0.5	3.7	1.3	0.5	3.7	1.3	0.5	3.7
1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6
1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6
1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6	1.3	0.5	3.6
1.3	0.4	3.5	1.3	0.4	3.5	1.3	0.4	3.5
1.3	0.4	3.5	1.3	0.4	3.5	1.3	0.4	3.5
1.2	0.4	3.4	1.2	0.4	3.4	1.2	0.4	3.4
1.2	0.4	3.4	1.2	0.4	3.4	1.2	0.4	3.4
1.2	0.4	3.3	1.2	0.4	3.3	1.2	0.4	3.3
1.2	0.4	3.3	1.2	0.4	3.3	1.2	0.4	3.3
1.2	0.4	3.2	1.2	0.4	3.2	1.2	0.4	3.2
1.2	0.4	3.2	1.2	0.4	3.2	1.2	0.4	3.2
1.1	0.4	3.2	1.1	0.4	3.2	1.2	0.5	3.2
1.1	0.4	3.1	1.1	0.4	3.1	1.1	0.5	3.2
1.1	0.4	3.1	1.1	0.4	3.1	1.1	0.5	3.2
1.1	0.4	3	1.1	0.4	3	1.1	0.5	3.2
1.1	0.4	3	1.1	0.4	3	1.1	0.6	3.3
1.1	0.4	3	1.1	0.4	3	1.1	0.6	3.4
1.1	0.4	2.9	1.1	0.4	2.9	1.1	0.7	3.5
1.1	0.4	2.9	1.1	0.4	2.9	1.2	0.8	3.7
1	0.4	2.9	1	0.5	2.9	1.2	0.8	3.9
1	0.4	2.8	1	0.5	2.9	1.2	0.9	4.2
1	0.4	2.8	1	0.5	3	1.3	1.1	4.6
1	0.4	2.8	1	0.6	3.1	1.3	1.2	5
1	0.4	2.7	1	0.6	3.2	1.4	1.3	5.5
1	0.4	2.7	1	0.7	3.3	1.5	1.5	6
1	0.5	2.8	1.1	0.8	3.5	1.6	1.7	6.6
1	0.5	2.8	1.1	0.8	3.8	1.8	1.9	7.3
1	0.5	2.9	1.1	0.9	4.1	1.9	2.1	8.1
1	0.6	3	1.2	1	4.4	2.1	2.3	8.9

Fonte: Próprios autores.

4 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

JOÃO LUIZ DA ROCHA BORIN

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

Objetivo do capítulo: apresentar conceitos básicos e aplicações voltadas à modelagem hidrodinâmica para o MPI.

Na hidrodinâmica, estuda-se o movimento da água, sua interação com o meio físico e suas propriedades químicas. Diferente da hidrologia, que muitas vezes está interessada em um comportamento mais geral da água em uma parte do ciclo hidrológico, a hidrodinâmica está interessada no comportamento específico, com mais detalhamento e, normalmente, em uma escala de espaço e tempo menores. Nesta apostila, serão explicados com mais detalhes os procedimentos para utilizar o *HEC-RAS*, tanto o módulo *1D* (Apêndice) quanto o módulo *2D*.

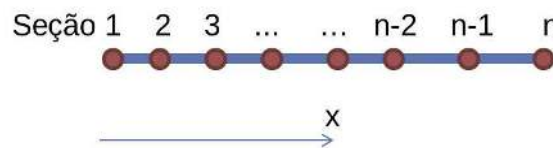
4.1 CLASSIFICAÇÃO

As simulações hidrodinâmicas utilizam métodos numéricos para resolver as equações diferenciais do escoamento (Equação do Movimento e da Continuidade). Em hidrodinâmica, o método das *Diferenças Finitas* é um dos mais utilizados. Este método reduz um problema de sistemas de equações e fornece uma solução em pontos (nós) discretizados no interior do domínio do problema. Além disso, as simulações hidrodinâmicas podem possuir 0, 1, 2 ou 3 dimensões.

0D - Semelhante a um modelo concentrado em hidrologia, porém na hidrodinâmica é muito pouco utilizada. Geralmente, é aplicada para verificar parâmetros relacionados à qualidade da água em pequenos lagos ou reservatórios.

1D - Representa o corpo de água por uma linha (Figura 4.1). Artifícios matemáticos podem fazer com que esta linha não se comporte como uma reta, podendo representar curvas. Este tipo de modelagem é, ainda hoje, muito utilizada em diversos âmbitos da hidrodinâmica, porém está perdendo espaço para os modelos bidimensionais, principalmente por causa do aprimoramento do processamento computacional.

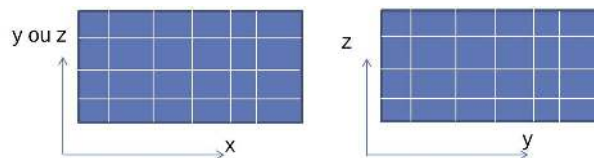
Figura 4.1 – Domínio unidimensional.



Fonte: Próprios autores.

2D - Representa áreas transversais laterais, transversais longitudinais ou horizontais do corpo de água (Figura 4.2) a ser simulado. A representação horizontal é utilizada na simulação de lagos e de rios, quando se tem interesse na planície de inundação. A representação transversal, lateral e longitudinal é utilizada apenas quando se deseja analisar escoamentos bem definidos, normalmente, em canais de laboratório.

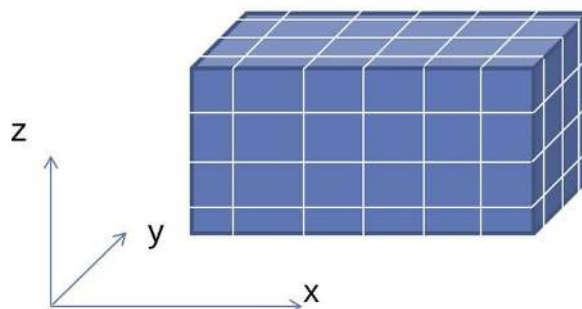
Figura 4.2 – Domínio bidimensional.



Fonte: Próprios autores.

3D - Representa o corpo como um volume (Figura 4.3). Todas as dimensões são consideradas neste tipo de simulação. Mesmo com o aumento do desempenho computacional, este tipo de modelo ainda é pouco utilizado na representação de rios, mas, quando se quer analisar os efeitos da turbulência, este tipo de simulação é imprescindível.

Figura 4.3 – Domínio tridimensional.



Fonte: Próprios autores.

4.2 ESCOAMENTO PERMANENTE

Um escoamento é chamado de permanente quando não possui variações temporais importantes. Entende-se que a importância dessas variações é relativa e deve ser definida especifica-

mente para cada tipo de estudo. Na natureza, escoamentos permanentes são muito raros, mas, dependendo do detalhamento que se necessita e/ou da escala a ser analisada, um escoamento pode ser considerado permanente para um projeto de engenharia.

O cálculo deste tipo de escoamento pode ser realizado utilizando a equação de Bernoulli, que trabalha com a conservação de energia de um ponto a outro, ou de uma seção a outra, e é tida como:

$$\frac{a_2 V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma_2} + h_2 = \frac{a_1 V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma_1} + h_1 + h_L, \quad (4.1)$$

em que V é a velocidade normal na seção transversal, a é o coeficiente de ponderação da velocidade, g é a aceleração da gravidade, P é a pressão, γ é o peso específico, h é a altura da lâmina da água e h_L é a perda de carga.

4.3 ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE

Em sua totalidade, os escoamentos são não permanentes, uma vez que variam ao longo do tempo. Quando se tem interesse na variação de um fluxo com o tempo, como no caso de propagação de hidrogramas, torna-se necessário o uso de equações que levam em consideração a variação temporal do escoamento.

A equação de Saint-Venant é uma das formulações clássicas para o cálculo dos escoamentos em rios. Mesmo que esta equação possua simplificações, como a pressão hidrostática e a difusividade do fluido, ela é aceita e amplamente utilizada. Esta é definida pela equação dinâmica:

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{aceleração local}} + \underbrace{\frac{\partial \frac{Q^2}{A}}{\partial x}}_{\text{aceleração advectiva}} + \underbrace{gA \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{pressão hidrostática}} = \underbrace{gAS_o}_{\text{declividade de fundo}} - \underbrace{gAS_f}_{\text{declividade da linha de energia}} \quad (4.2)$$

e é utilizada junto à equação da continuidade:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q = 0, \quad (4.3)$$

em que Q é a vazão normal a seção transversal, A é a área molhada da seção transversal, x é a distância, g é a aceleração da gravidade, h é a profundidade do escoamento, S_o é a declividade do canal, S_f é a declividade da linha de energia, q são as vazões laterais entre duas seções e t é o tempo. Para simulações bi ou tridimensionais, se utiliza, ou uma modificação da equação de Saint-Venant, ou as equações de Navier-Stokes. Devido à complexidade deste tema, se aconselha a pesquisa em bibliografia especializada, para mais informações sobre escoamentos bi e tridimensionais.

Assim, as hipóteses para a adoção destas equações levam em consideração que a pressão pode ser considerada como sendo apenas hidrostática, não existindo variações significativas da massa específica nem da viscosidade do fluido ao longo do tempo e do espaço, e os efeitos

da turbulência no escoamento são simplificados. Diversas simplificações das equações 4.2 e 4.3 são conhecidas e utilizadas. Quando estas simplificações são feitas desconsiderando as derivadas parciais do tempo, este modelo passa a ser um modelo de escoamento permanente.

4.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO E ESTABILIDADE

As equações 4.2 e 4.3 são resolvidas em um **domínio** restrito e definido, e necessitam de condições auxiliares. Em outras palavras, cada solução do sistema de equações corresponde a uma condição definida a priori. Portanto, a função e a solução do problema considerado devem satisfazer simultaneamente a condição do domínio e as condições adicionais. Estas condições adicionais são divididas em dois tipos: as condições iniciais e as condições de contorno.

As condições iniciais são dadas no instante de tempo inicial do cálculo (em geral $t = 0s$), normalmente no início da simulação. As condições de contorno são aplicadas nos limites do espaço físico ou quando se deseja representar alguma estrutura, restrição ou nascente dentro do domínio. Para o caso da equação de Saint-Venant, as condições iniciais são compostas pelas vazões e pela profundidade da lâmina de água.

Como condição de contorno, é necessário que se tenha uma vazão ou altura de lâmina de água na seção inicial e final do trecho simulado. Aconselha-se, por questões de estabilidade, que se adote uma **vazão** para a seção inicial e uma **profundidade** para a seção final. A vazão de entrada pode ser prescrita, ou seja, fornecida pelo usuário, e a condição de saída pode ser de saída livre.

As condições iniciais podem ser obtidas pela simulação do trecho de interesse como escoamento permanente, caso se tenha a vazão ou a profundidade fornecida pelo usuário. Como condição inicial, tem-se a vazão e a altura da lâmina de água para todas as seções do trecho.

4.5 MÉTODOS NUMÉRICOS

Existem diversos métodos numéricos para resolver problemas de escoamentos. Assim, adotam-se as aproximações discretas para as equações diferenciais do tempo e do espaço.

4.5.1 Discretização Espacial

As aproximações em diferenças finitas são as mais simples para aproximar a derivada numericamente. Elas efetivamente substituem o operador diferencial contínuo por uma aproximação discreta, calculada a partir dos valores de f em um número finito de pontos. Estas aproximações finitas podem ser obtidas de várias formas, onde as mais usuais são: expansão por série de Taylor e interpolação polinomial. O Teorema de Taylor permite aproximar uma função derivável

na vizinhança reduzida em torno de um ponto, com

$$f(x) = f(x_0) + (\Delta x) \left(\frac{df}{dx} \right)_i + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left(\frac{d^2 f}{dx^2} \right)_i + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left(\frac{d^3 f}{dx^3} \right)_i + \dots + R_N, \quad (4.4)$$

onde x_0 é o ponto anterior a x , R_N é o resto da série de Taylor e o subíndice i representa um i -ésimo elemento do conjunto que representa o volume de controle. Considerando uma variável dependente de x , como dependente da posição do ponto em i no eixo $0x$, pode-se simplificar a expansão para sua aproximação de primeira ordem tornando-a

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x). \quad (4.5)$$

onde $O(\Delta x)$ é o erro cometido pela aproximação de primeira ordem. A equação 4.5 é conhecida como método *forward*. Desta forma, o modelo utiliza os dados de um ponto para calcular o resultado do próximo ponto, criando uma resolução em sequência. Cada termo da série de Taylor adicionado a esta equação a torna mais próxima da diferencial.

4.5.2 Discretização Temporal

Existem muitos métodos para discretizar as derivadas temporais. Estes métodos, normalmente, dividem-se em dois grandes grupos: os métodos com discretização explícita e os métodos com discretização implícita.

Discretização Explícita

A representação conhecida como Método de Euler, de primeira ordem, é

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} + O(\Delta t), \quad (4.6)$$

onde n é o índice referente ao tempo e Δt é a discretização temporal. Considerando a equação de convecção pura 1D, temos

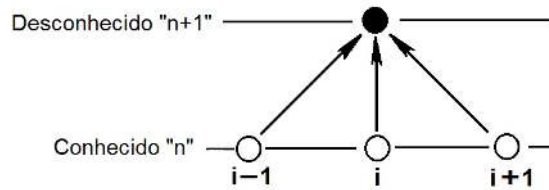
$$\frac{\partial u}{\partial t} = u \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (4.7)$$

Considerando um método *frontward* no espaço, para uma discretização explícita, avaliação temporal da equação 4.7 segue como

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = u \frac{u_{i+1}^n - u_i^n}{\Delta x}, \quad (4.8)$$

Neste tipo de equação, u^{n+1} à esquerda da equação é o único termo desconhecido. Como o valor da variável dependente do tempo n é conhecido de uma solução anterior ou de um dado inicialmente fornecido, o cálculo dos valores de $n + 1$ depende apenas do histórico passado (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Exemplo dos pontos da grade para a formulação explícita.



Fonte: Adaptação de Hoffman and Chiang [2000].

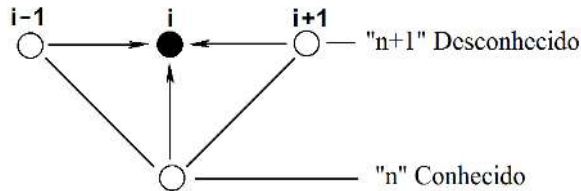
Discretização Implícita

Considerando análise similar, para uma discretização implícita, a avaliação temporal na equação 4.7 toma forma

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = u \frac{u_{i+1}^{n+1} - u_i^{n+1}}{\Delta x}. \quad (4.9)$$

Nesta equação existe mais do que uma variável desconhecida, como, por exemplo: u_i^{n+1} e u_{i+1}^{n+1} (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Exemplo dos pontos da grade para a formulação implícita.



Fonte: Adaptação de Hoffman and Chiang [2000].

CrITÉRIO DE CONVERGÊNCIA E ESTABILIDADE

A condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) é utilizada como critério de convergência e estabilidade para métodos explícitos. Esta condição indica que a distância percorrida pelas partículas de fluido seja menor do que um Δx em um passo de tempo. Isto implica que

$$\frac{|u_{max}|}{\Delta x / \Delta t} \leq 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} \geq |u_{max}|, \quad (4.10)$$

em que u_{max} é a velocidade máxima do escoamento e $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ é a velocidade da malha. Caso a condição CFL não for respeitada, oscilações numéricas irrealísticas se formarão descaracterizando os resultados e divergindo a solução.

Os métodos totalmente implícitos são mais dispendiosos computacionalmente, já que é necessário resolver um novo sistema de equações para cada passo de tempo. Por outro lado, este tipo de método é incondicionalmente estável, então o passo de tempo pode ser determinado dependendo apenas das considerações de precisão, erros numéricos e outros tipos de instabilidades.

4.6 VALIDAÇÃO

A validação avalia a exatidão do resultado de um modelo numérico se baseando na comparação entre os resultados computacionais e os dados experimentais ou analíticos. [Fortuna \[2010\]](#) menciona que a validação quantifica o grau de representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real. Essa análise é normalmente realizada por comparações sistemáticas com dados experimentais já consagrados, representativos dos tipos de fenômenos nos quais se espera simular.

De forma geral, os modelos hidrodinâmicos são baseados em equações analíticas da conservação de massa e conservação da quantidade de movimento, e estão menos suscetíveis à falta de representação das propriedades físicas do fenômeno de interesse se comparados aos modelos hidrológicos. Dependendo da complexidade do caso estudado, apenas o procedimento de validação é necessário para a modelagem hidrodinâmica, o que praticamente não acontece com a modelagem hidrológica.

O procedimento de calibração dos modelos hidrodinâmicos passa por etapas de aperfeiçoamento da representação do local de interesse (pelo tipo e tamanho da malha, adição de singularidades como pontes, microdrenagem, entre outros) e não apenas pela alteração de coeficientes empíricos, como o coeficiente de Manning. Assim, devido a essa individualidade, não será apresentado um procedimento específico para a calibração de modelos hidrodinâmicos.

A validação é uma indicação do nível de confiança de um modelo sob uma condição limite e para um propósito específico. Para que um modelo hidrodinâmico seja válido ao ser comparado com eventos reais de inundação, deve-se atentar às variáveis de interesse, que podem incluir: o volume escoado; a área de inundação; a resistência ao escoamento; e; as medidas do fluxo hidráulico, como a velocidade e a profundidade da lâmina d'água.

Para validar o código para áreas de inundação, é interessante que se tenham previamente alguns pontos ou regiões monitoradas de um evento definido, além dos dados de precipitação do evento. Na presente metodologia, as vazões das BCs são obtidas do modelo hidrológico, que também deve ter passado pelo processo de validação (e calibração). Diferente do modelo hidrológico, o modelo hidrodinâmico dificilmente possuirá um processo de calibração automático adequado, devendo o usuário ter o bom senso de aperfeiçoar o modelo ou até mesmo utilizar outro modelo para representar adequadamente a mancha de inundação.

As áreas inundadas podem ser validadas pela taxa de acerto, pela taxa de alarme falso e pelo índice crítico de sucesso. A partir dos dados dos pontos ou regiões monitoradas, os resultados

da mancha de inundação do modelo podem ser classificados conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tabela de contingência dois-a-dois para verificação de sistemas de previsão binários.

		Simulado	
		Sim	Não
	Ocorreu inundação		
Observado	Sim	a	b
	Não	c	d

Fonte: Adaptado de Schaefer [1990].

A taxa de acerto (*Hit Rate* - HR) demonstra a quantidade de pontos ou regiões em que o modelo previu inundações que realmente ocorreram. Ela pode ser calculada pelo somatório dos acertos de inundação sobre a soma do somatório dos acertos de inundação e do somatório dos erros de inundação (equação 4.11). A taxa de alarme falso (*False Alarm Rate* - FAR) corresponde à quantidade de pontos ou regiões que o modelo indicou ocorrer inundação, mas que não ocorreram na realidade. Ela é calculada pelo somatório de alarmes falsos sobre a soma do somatório dos alarmes falsos e do somatório dos acertos de não inundação (equação 4.12).

$$HR = \frac{a}{a + b} \quad (4.11)$$

$$FAR = \frac{c}{c + d} \quad (4.12)$$

onde os valores de a, b, c e d são obtidos pelo somatório de pontos ou áreas que se enquadram em cada classificação correspondente na Tabela 4.1.

O índice crítico de sucesso (*Critical Success Index* - CSI) apresenta a taxa de acertos que o modelo obteve sobre o somatório de eventos que foram indicados pela simulação e/ou observação. Ele é calculado pelo somatório de acertos de inundação, sobre a soma do somatório de acertos de inundação, do somatório de alarmes falsos e do somatório de acertos de erros de inundação (equação 4.13). Para se aprofundar mais na teoria por trás desses parâmetros, é aconselhável conferir o trabalho de Schaefer [1990].

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \quad (4.13)$$

4.7 COMENTÁRIOS

O tema da hidrodinâmica computacional é amplo e complexo. É fundamental que o usuário de um programa entenda como ele resolve o problema. Para se aprofundar neste tema, aconselha-se a leitura do Manual do HEC-RAS e dos livros de Hoffman and Chiang [2000] e de Fortuna [2010].

Conforme apresentado no item 4.5 deste capítulo, os métodos numéricos realizam uma sequência de resolução com dependência das condições iniciais e de contorno. Para encontrar

a solução na seção ou célula seguinte, ou no passo de tempo seguinte, os métodos numéricos necessitam de dados da seção, célula ou tempo presente. É importante compreender que, devido a esta sequência de resolução, os modelos que utilizam métodos numéricos apresentam resultados que possuem grande influência de seus arredores espaciais e temporais. Uma seção ou célula afeta a seguinte, e o resultado passado afeta o futuro.

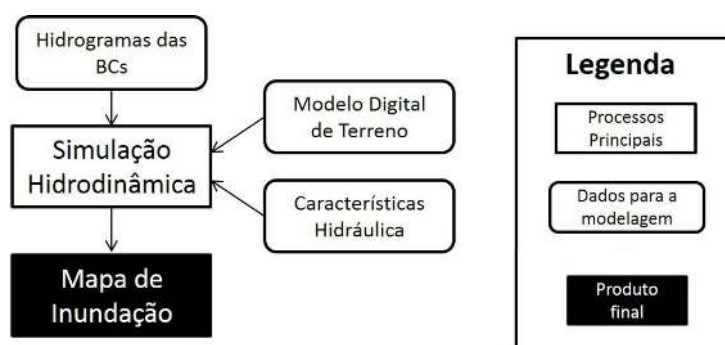
4.8 EXEMPLO PRÁTICO

No capítulo anterior, obtivemos os valores dos hidrogramas das BCs. Agora, com o modelo hidrodinâmico, as vazões apresentadas nesses hidrogramas serão propagadas na área inundável (AI) de interesse para obter as velocidades e as profundidades, a fim de criar os mapas de inundação e de perigo. O modelo hidrodinâmico utilizado para fazer este Capítulo foi o HEC-RAS 6.6, entretanto versões mais atuais já existem e encorajamos o uso destas versões, mesmo que impliquem em pequenas variações na maneira de utilizar o modelo que apresentaremos. Atualmente, o HEC-RAS possui um módulo unidimensional (1D) e bidimensional (2D), além da possibilidade de combinar as duas abordagens, com diversos artifícios para representar escoamentos em planície de inundação.

No caso da simulação unidimensional e não permanente, o HEC-RAS resolve as equações de Saint-Venant a partir de um esquema implícito em diferenças finitas ou a partir de um esquema semi-implícito (dependendo da variação do ponderador θ) em volumes finitos. Geralmente, a ordem de erro do código é 1ª para o tempo e 2ª para o espaço. No Apêndice D é apresentado um exemplo de aplicação do modelo 1D.

O exemplo prático de modelagem hidrodinâmica do presente documento utiliza o modelo 2D e segue o organograma apresentado na Figura 4.6. Primeiramente, serão definidas as geometrias contidas na área inundável e as informações necessárias, como tipo de solo, uso do solo e MDT e, depois, serão definidas as condições de contorno e outras informações para realizar a simulação. O programa HEC-RAS 6.6 será utilizado para realizar as simulações e está gratuitamente disponível em "<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>".

Figura 4.6 – Fluxograma detalhado da modelagem hidrodinâmica.



Fonte: Próprios autores.

Para o início do processamento de dados e a utilização do modelo, podem se utilizar **quatro fatores**, a saber: **geometria, características do solo, fluxo e sedimentos**. Cada um deles está ligado ao seguinte, pois é necessário ter realizado a entrada da geometria para referenciar o fluxo e, por sua vez, os sedimentos precisam da entrada do fluxo para serem referenciados. No presente texto, não é desenvolvido o procedimento de transporte de sedimentos.

Além disso, algumas alterações para tornar a simulação mais estável, confiável e prática, bem como a identificação de possíveis erros, são feitas nesta etapa, sendo de grande importância o conhecimento dos recursos de processamento. A análise dos resultados é de fácil compreensão e a navegação entre resultados é apresentada de forma intuitiva pelo programa, com muitos recursos para explorar.

4.8.1 Preparação do computador

Antes de iniciar o programa, deve-se alterar algumas configurações do sistema operacional para que o HEC-RAS possa rodar sem problemas. O computador deve estar com o idioma em *English (United States)*, pois o programa roda nesse idioma, e, caso haja incompatibilidade de idiomas entre o programa e o sistema, pode ocorrer problemas na hora de executá-lo.

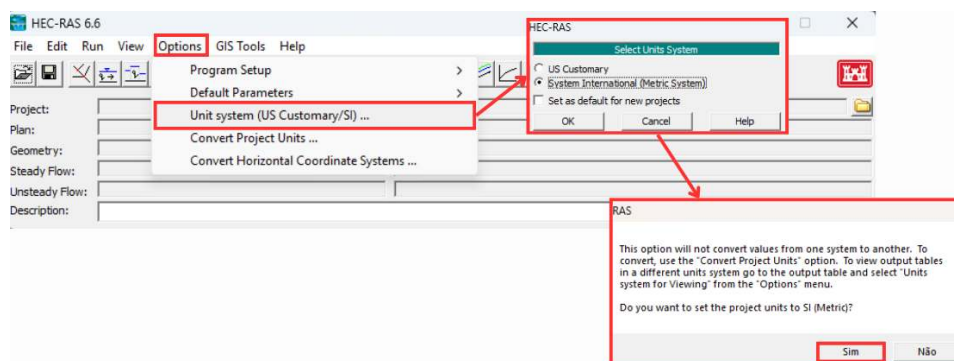
O sistema deve adotar ponto (.) como separador decimal e virgula (,) como separador de milhar, pois o programa utiliza essa configuração, evitando-se incompatibilidades. Normalmente, quando se troca o idioma principal do computador para inglês, ele altera automaticamente os separadores. A data e a hora devem seguir o sistema estadunidense (MM/DD/AAAA e AM/PM), mas, assim como no separador, quando se altera o idioma, a configuração de data e hora altera-se automaticamente.

4.8.2 Primeiros passos no programa

Ao abrir o programa, é importante definir as unidades padrão como SI (Sistema Internacional) e, depois, criar um projeto no programa HEC-RAS.

- Para definir o sistema de unidades, clica-se: *Option » Unit System... » System International (Metric System) » Set as default for new projects*;
- Feito isso, clica-se: *File » New Project...* para abrir um novo projeto.

Figura 4.7 – Definição do sistema de unidades.



Fonte: Próprios autores.

Nota: Lembrar das considerações mencionadas no HEC-HMS, sobre pastas e arquivo sem espaçamentos.

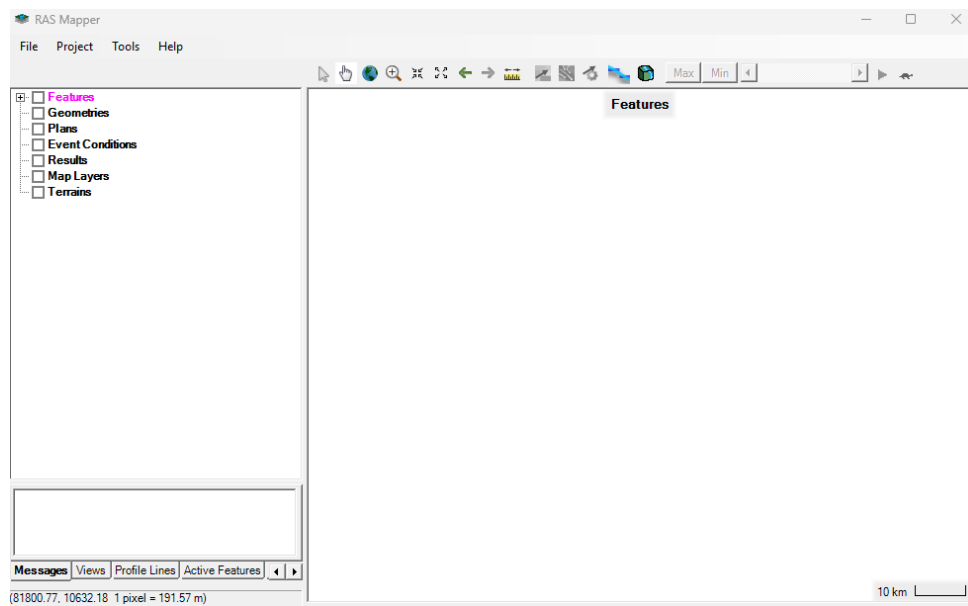
4.8.3 Incorporação do MDT

Iniciando um novo projeto, é preciso definir a geometria do corpo hídrico que se deseja representar. Essa etapa pode ser

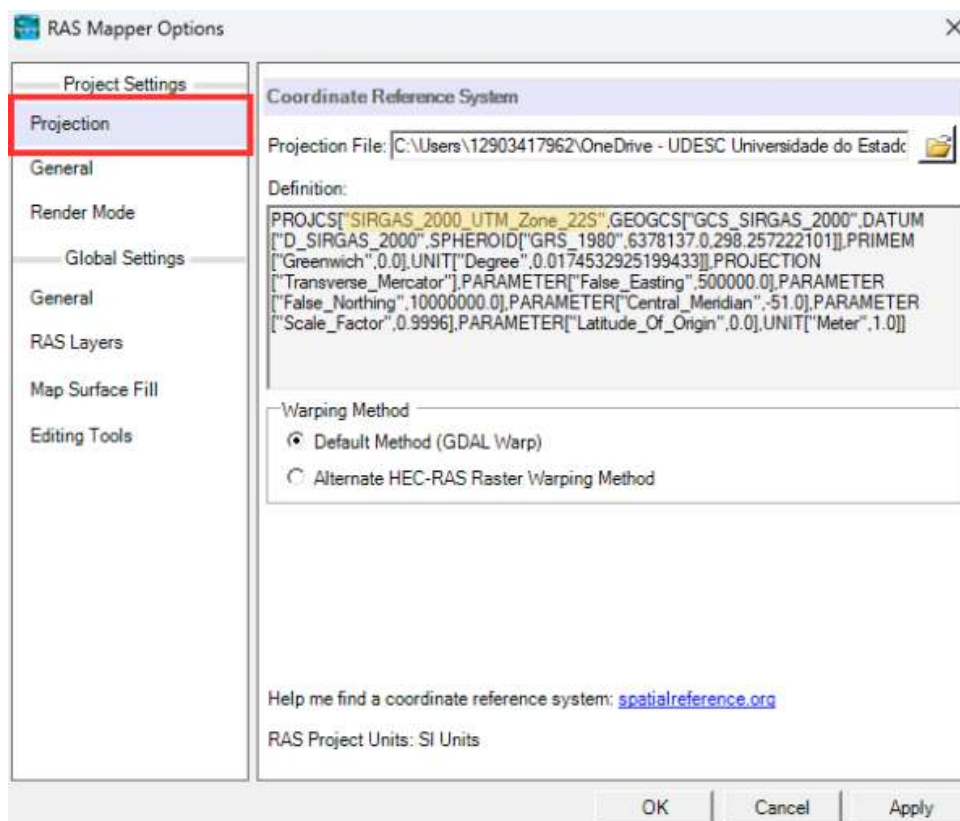
- Manual (apenas para modelagem 1D), introduzindo os valores referentes ao terreno um por um, ou
- Automática, na qual o terreno é carregado a partir de um MDT (para modelagem 1D ou 2D), podendo necessitar do auxílio de algum programa SIG. Assim, deve-se apenas determinar os limites do elemento a ser estudado.

Importar o MDT de um SIG é a forma mais prática e rápida de determinar a geometria, pois, além de partir de uma representação do terreno georreferenciada, poupa-se tempo nesse processo. No presente exemplo, utilizaremos o MDT da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável do estado de Santa Catarina, com resolução de 1×1 m.

Começa-se abrindo o recurso *RAS Mapper* pelo ícone  (Figura 4.8). Na barra superior do *Ras Mapper*, clica-se em *Tools* e, então, em *Options*. Isso abrirá uma nova janela (Figura 4.9), onde se deve inserir a projeção com a qual se está trabalhando. Clica-se no ícone e seleciona-se o arquivo da projeção (.prj) de algum *shape* que está se trabalhando. **Atente-se para que a projeção de seu arquivo esteja em SIRGAS 2000, caso contrário, o programa poderá sofrer problemas de escala.** Neste caso, para a Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho, foi utilizada a projeção "SIRGAS 2000 / UTM zone 22S". Por fim, clica-se em "OK" para fechar a janela e salvar o projeto no *RAS Mapper*.

Figura 4.8 – Nova Janela do *RAS Mapper*.

Fonte: Próprios autores.

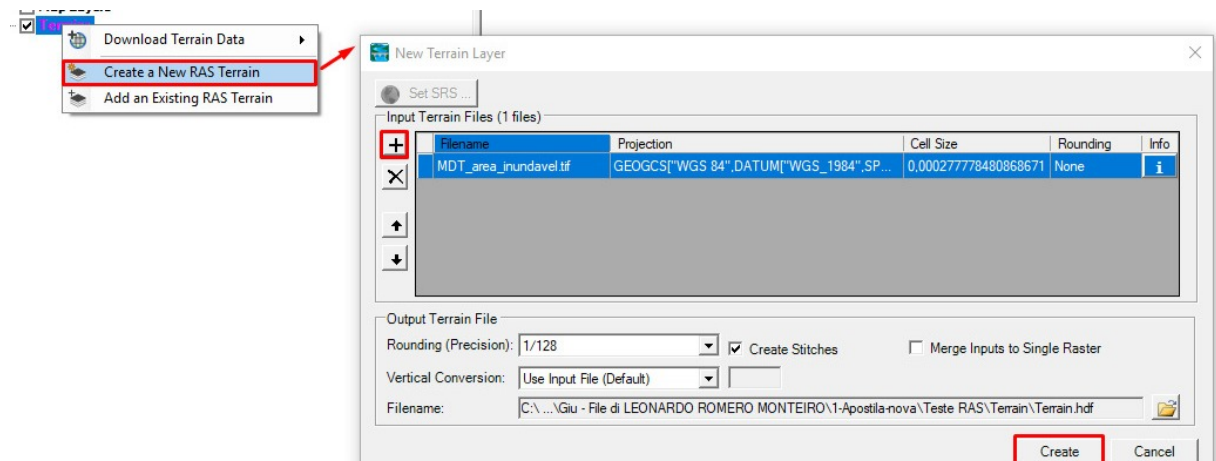
Figura 4.9 – Janela de novo projeto no *RAS Mapper*.

Fonte: Próprios autores.

De volta a janela principal do *RAS Mapper*, para adicionar o MDT do terreno, clica-se com o botão direito do *mouse* em *Terrains* e, depois, clica-se em *Create a New RAS Terrain*. Isso abrirá uma nova janela (Figura 4.10). Então, clica-se no ícone de "+" e seleciona-se o MDT do terreno para carregá-lo. Nesta fase, pode-se adicionar mais de um MDT de terreno e o programa irá mesclá-los automaticamente. Após adicionar todos os MDTs, clica-se em *Create* para criar o terreno, isso abrirá uma nova janela com o diagnóstico do processamento e, quando ele terminar, clica-se em *Close*. O terreno já terá sido adicionado na aba *Terrarian* e será possível visualizá-lo no *RAS Mapper*.

Nota: Ao escolher o arquivo para adicionar no programa, deve-se estar atento à resolução da imagem. Neste caso, foram usadas imagens baixadas pelo [SIG SC](#), já que o terreno trabalhado se localiza em Santa Catarina, onde se possui todo o território georreferenciado de 1 em 1 metro. Para este processamento, rever o Item [2.3.4](#).

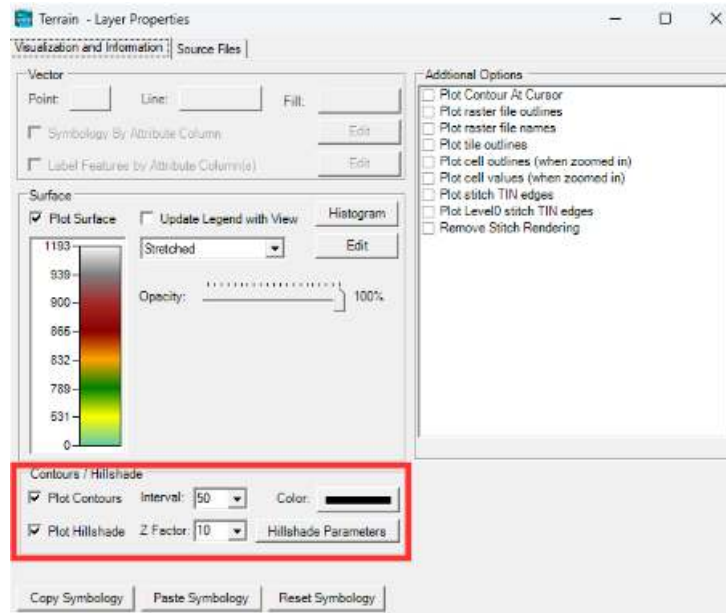
Figura 4.10 – Janela de *New Terrain*.



Fonte: Próprios autores.

Para melhorar a visualização do terreno, clica-se duas vezes no "Terrain" e alteram-se as configurações de "Plot Contours" e "Plot Hillshade", conforme na Figura 4.11.

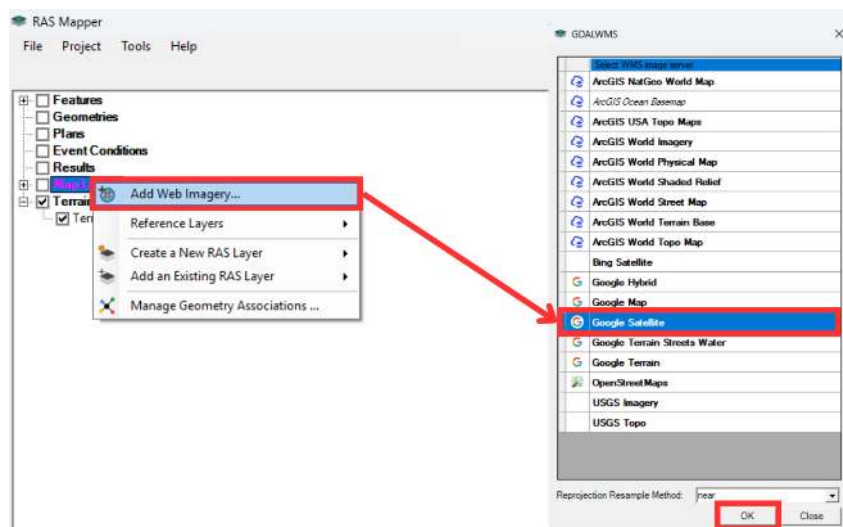
Figura 4.11 – Janela *New Terrain*.



Fonte: Próprios autores.

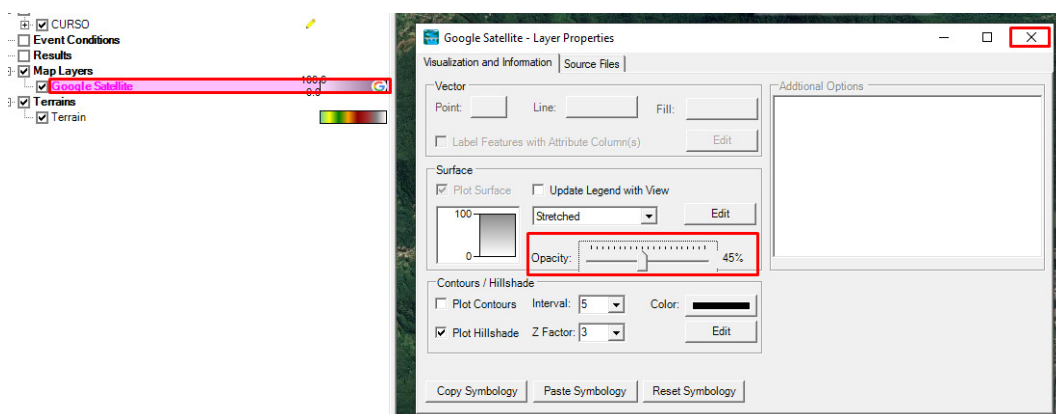
Além disso, para auxiliar na visualização, deve-se adicionar a imagem via satélite para melhor clareza. Desse modo, com o botão direito, clica-se em *MapLayers*, seleciona-se *Add Web Imagery...* e, em seguida, a opção *Google Satellite*, conforme mostrado na Figura 4.12. Depois, altere a opacidade do mapa clicando duas vezes na opção *Google Satellite* (Figura 4.13).

Figura 4.12 – Inserindo imagem via Google Satélite.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.13 – Alterando a opacidade do mapa.



Fonte: Próprios autores.

4.8.4 Modelagem 2D

Neste item, aborda-se como manusear de forma adequada as ferramentas do programa para a introdução de dados para o modelo em duas dimensões. Neste tipo de modelagem, na versão 6.6, o programa não aceita a introdução de dados de sedimentos ou qualidade de água.

O modelo 2D tem sua geometria baseada em um modelo digital de terreno (MDT), sendo necessário que o usuário do programa delimite apenas a área do MDT na qual serão criadas células onde os cálculos serão realizados.

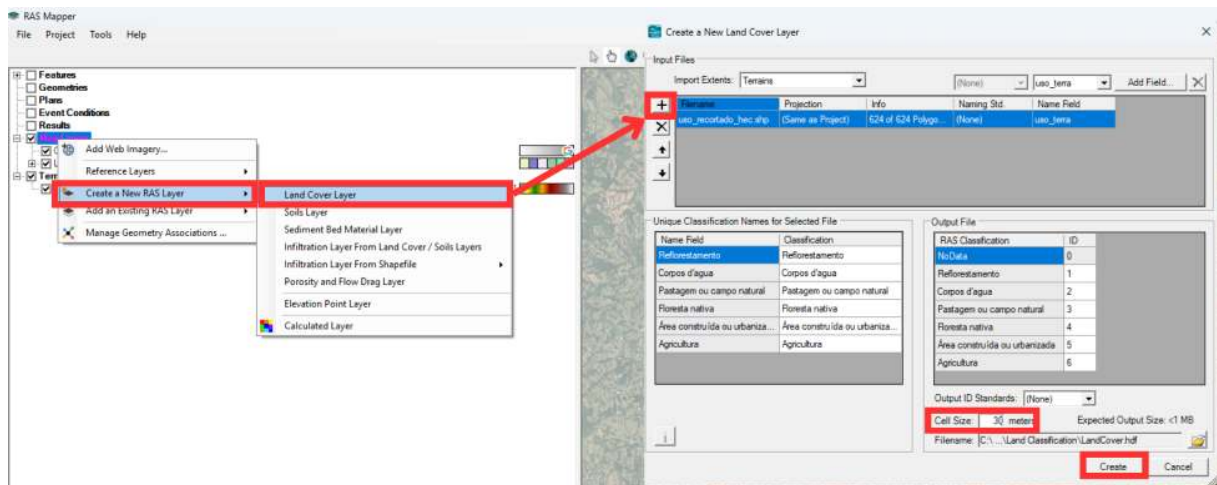
Agora, adicionaremos as **informações do solo**, tanto em relação à **rugosidade, considerando o coeficiente de Manning**, quanto à possibilidade de **infiltração pelo CN**. Nota-se que a infiltração será utilizada apenas se o HEC-RAS for utilizado em conjunto a um dado de chuva. Assim, ele representará não apenas a parte hidrodinâmica da geometria definida, como também a parte hidrológica de forma distribuída.

Coefficiente de Manning: cria-se um novo *layer* de **uso do solo**. Pode-se utilizar um *shape* de uso e ocupação do solo de um banco de dados oficial, e em caso de falta de dados para a região escolhida, pode ser criado manualmente (a partir de imagens de satélite e bom senso do usuário).

Um banco de dados que possui este tipo de arquivo é o [MapBiomias](#), com informações de resolução de 10x10 m², ou pelo [MonitoraSC](#) com resolução de 30x30 m². A partir destes dados, no QGIS, recorta-se o arquivo ".tif" para o tamanho da área inundável e insere-se no HEC-RAS o arquivo pelo "+" e alteram-se os tamanhos das células de 10 para 30 para que o processamento seja mais rápido (Figura 4.14).

A partir disso, determinam-se os valores do coeficiente de Manning (n) dependendo do tipo de uso do solo, conforme os valores estipulados no manual do usuário do HEC-RAS [[USACE-HEC, 2023](#)], apresentados na Tabela 4.2, baseado no Banco de Dados Nacional de Cobertura do Solo (*National Land Cover Database - NLCD*) dos Estados Unidos. O coeficiente de Manning é usado para representar a resistência do meio ao escoamento do fluido, sendo afetado pela

Figura 4.14 – Adicionando o uso do solo.



Fonte: Próprios autores.

rugosidade, obstáculos, vegetação, sinuosidade do canal, etc.

Conforme as configurações, clique com o botão direito do *mouse* em *Land Cover*, selecione *Edit Land Cover Data Table*, clique duas vezes na célula que deseja editar e insira os valores dos coeficientes de Mannings, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 4.2 (Figura 4.15).

Tabela 4.2 – Valores do coeficiente de Manning para cada valor de NLCD.

Valor NLCD	Abrangência de Valores de n	Descrição
11	0,025 - 0,05	Águas abertas - áreas de águas abertas, geralmente com menos que 25% do solo coberto por vegetação ou solo. Esta classe é destinada para canais naturais com inclinações médias ou moderadas.
21	0,03 - 0,05	Urbanizado, espaço aberto - áreas com um misto de construções, mas com vegetação majoritariamente de gramíneas baixas. A superfície impermeável é menor que 20% da cobertura total. Essas áreas normalmente incluem grandes lotes de unidades unifamiliares, estacionamento, campos de golfe, e vegetação plantada para fins de recreação, controle de erosão ou paisagismo.
22	0,06 - 0,12	Urbanizado, baixa intensidade - áreas com um misto de construções e vegetação. A superfície impermeável fica entre 20% e 49% da cobertura total. Essas áreas normalmente são ocupadas por unidades unifamiliares.
23	0,08 - 0,16	Urbanizado, média intensidade - áreas com um misto de construções e vegetação. A superfície impermeável fica entre 50% e 79% da cobertura total. Essas áreas normalmente são ocupadas por unidades unifamiliares.
24	0,12 - 0,20	Urbanizado, alta intensidade - Áreas altamente urbanizadas onde um grande número de pessoas moram e trabalham. Exemplos incluem complexos residenciais, comerciais e industriais. A superfície impermeável fica entre 80% e 100% da cobertura total.
31	0,023 - 0,030	Terra árida (Rochas/Areia/Argila) - áreas de rocha exposta, pavimentos desérticos, escarpas, taludes, encostas, material vulcânico, detritos glaciais, dunas de areia, minas abertas, poços de brita e outros acumulados de materiais terrestres. Geralmente, a vegetação cobre menos de 15% da superfície.

(continua)

Table 4.2 Valores do número de Manning para cada valor de NLCD (continuação).

Valor NLCD	Abrangência de Valores de n	Descrição
41	0,10 - 0,20	Floresta decídua - áreas dominadas por árvores geralmente maiores que 5 metros de altura, e representam 20% da cobertura vegetal. Mais de 75% das espécies das árvores perdem simultaneamente as folhas em resposta a mudanças das estações.
42	0,08 - 0,16	Florestas perenes - áreas dominadas por árvores geralmente maiores que 5 metros de altura, e representam 20% da cobertura vegetal. Mais de 75% das espécies das árvores mantém as folhas o ano todo. As copas estão sempre com folhagens verdes.
43	0,08 - 0,20	Florestas mistas - áreas dominadas por árvores geralmente maiores que 5 metros de altura, e representam 20% da cobertura vegetal. Nem as espécies decíduas e perenes dominam mais de 75% da cobertura de árvores.
51	0,025 - 0,05	Vegetação rasteira baixa - áreas restritas ao Alaska dominadas por arbustos ou outras plantas rasteiras com menos de 20 cm de altura, e representando 20% da vegetação total. Essa vegetação normalmente é associada a gramas, matos, ervas e vegetações não-vascularizadas.
52	0,07 - 0,16	Vegetação rasteira - áreas dominadas pela vegetação rasteira; com menos de 5 m de altura e representando mais de 20% de toda vegetação. Essa classe inclui arbustos, árvores jovens ou atrofiadas por condições ambientais.
71	0,025 - 0,05	Gramado/herbáceos - áreas dominadas por gramíneas e vegetações herbáceas, representando mais de 80% de toda vegetação. Essas áreas não estão sujeitas a manejo intenso com aragem, mas podem ser utilizadas para pastoreio.
72	0,025 - 0,05	Matagal/herbáceo - áreas restritas ao Alaska dominadas por matagais e flores selvagens, representando mais de 80% da vegetação total. Esse tipo pode ocorrer junto a outros tipos de gramíneas ou plantas tipo gramíneas.

(continua)

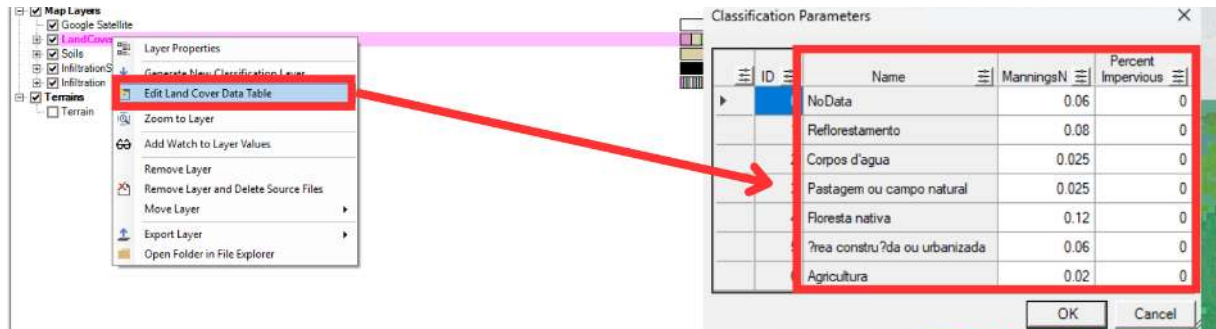
Table 4.2 Valores do número de Manning para cada valor de NLCD (continuação).

Valor NLCD	Abrangência de Valores de n	Descrição
81	0,025 - 0,05	Pastagem - áreas de gramas, leguminosas ou mistos de gramas e leguminosas plantadas para pastagem de gado ou produção de sementes ou feno, tipicamente com ciclos perenes. A vegetação de pastagem representa mais de 20% da vegetação total.
82	0,020 - 0,05	Plantação - áreas usadas para produção anual de lavouras, como milho, soja, vegetais, tabaco e algodão, e também colheitas arborizadas perenes como pomares e parreiras. A vegetação das lavouras representa mais de 20% da vegetação total. Essa classe também inclui toda terra que é ativamente arada.
90	0,045 - 0,15	Floresta alagadas - áreas onde florestas e plantas rasteiras representam mais de 20% da vegetação total, e o solo ou substrato está periodicamente saturado, ou coberto por água.
95	0,05 - 0,085	Herbáceas emergentes alagadas - áreas onde herbáceas perenes representam mais de 80% da vegetação total e o solo ou substrato está periodicamente saturado, ou coberto por água.

(conclusão)

Fonte: Adaptado de [USACE-HEC \[2023\]](#).

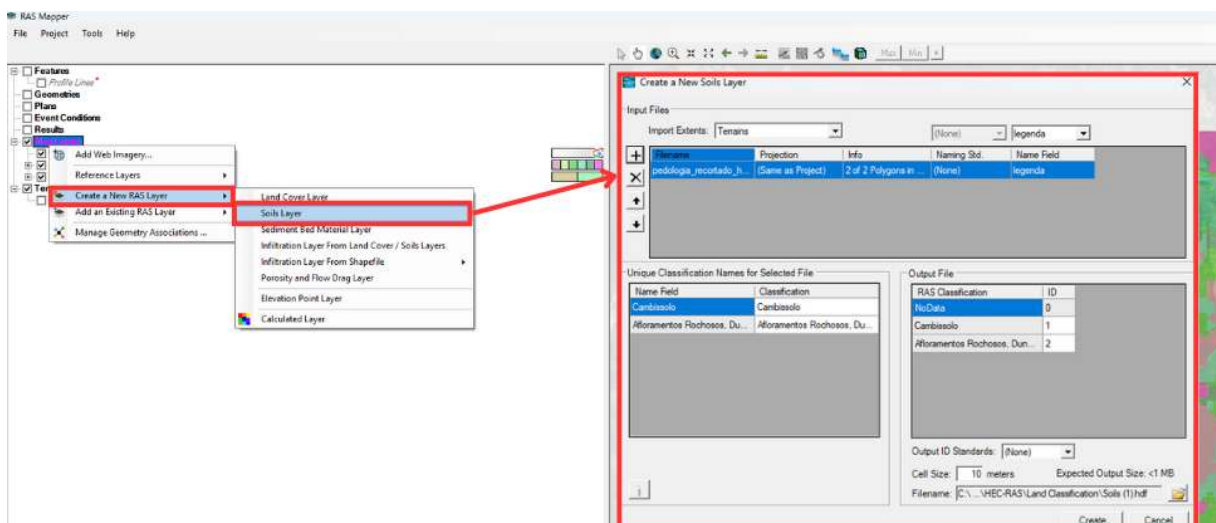
Para a aplicação do coeficiente de *Mannings*, foram adotados sistematicamente os menores valores disponíveis em cada faixa da tabela. Por exemplo, para "Pastagem" é de 0.025-0.05, portanto, utilizou-se 0.025 quando adicionado no HEC-RAS, como mostrado na Figura 4.15. Para "Floresta Nativa" e "Reflorestamento" ambos usamos o coeficiente de *Mannings* de "Florestas Mistas", entretanto, como a "Floresta Nativa" é significativamente mais densa que "Reflorestamento", optou-se por 0.12, aumentando em um terço em relação ao valor de base, e mantendo o valor mínimo de 0.08 em "Reflorestamento". Para locais onde consta "NoData" usaremos 0.06 como um valor padrão. E em *Percent Impervious* adicionaremos 0 em todos.

Figura 4.15 – Alterando os valores dos coeficiente de *Mannings*.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tipo do Solo: deve-se inserir o tipo do solo conforme a sua classificação pedológica. Para isso, faz-se um procedimento muito similar ao anterior. Obtém-se a pedologia do solo, por exemplo, no *site* do IBGE ou ainda, em outras bases de dados mais locais, como bancos de dados da prefeitura da região de estudo. No QGIS, fazem-se as configurações necessárias¹ para inserir o *raster* no HEC-RAS, clicando diretamente com o botão direito do *mouse* em *Map Layers* » *Create a New RAS Layer* » *Soils Layer* (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Importando o tipo do solo.



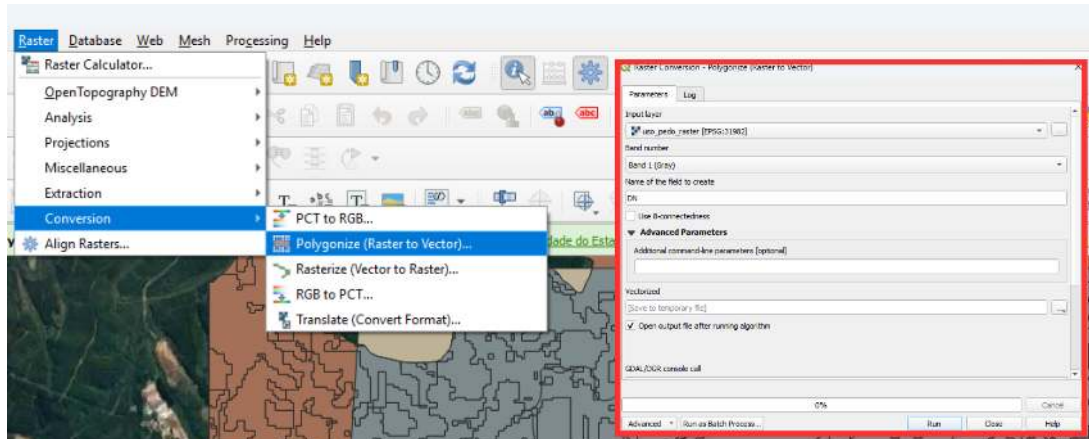
Fonte: Próprios autores.

CN: Outro passo é a entrada dos valores de número de deflúvio (CN) no modelo, um parâmetro empírico que representa a porcentagem do solo impermeável, aplicado no HEC-RAS apenas para a chuva. No HEC-RAS, o CN tem que estar em formato de *shape*, portanto, transformare-

¹ No QGIS, pode ser necessário reparar a geometria obtida (*Processing Toolbox* » *Vector Geometry* » *Fix geometries*) para fazer o recorte da área inundável escolhida (*Vector* » *Geoprocessing Tools* » *Clip*). Feito isso, recomenda-se que se abra a tabela de atributos (Attribute Table) e clicando em **CTRL + E** e, em seguida, **CTRL + W**, cria-se uma coluna "tipo" e adicionam-se inteiros que definem a classificação do solo para melhor leitura do HEC-RAS. Depois, para prevenir erros, transformam-se os campos em partes únicas (*Processing Toolbox* » *Vector Geometry* » *Multiparts to singleparts*). Por fim, transforma-se o *shape* em um arquivo *raster* (.tif) em (*Raster* » *Conversion* » *Rasterize*) e adiciona-se ao RAS.

mos o *raster* em *shape* por meio da ferramenta *Polygonize* do QGIS, como mostrado na Figura 4.17. Utilizaremos os dados conforme obtidos no procedimento da modelagem hidrológica.

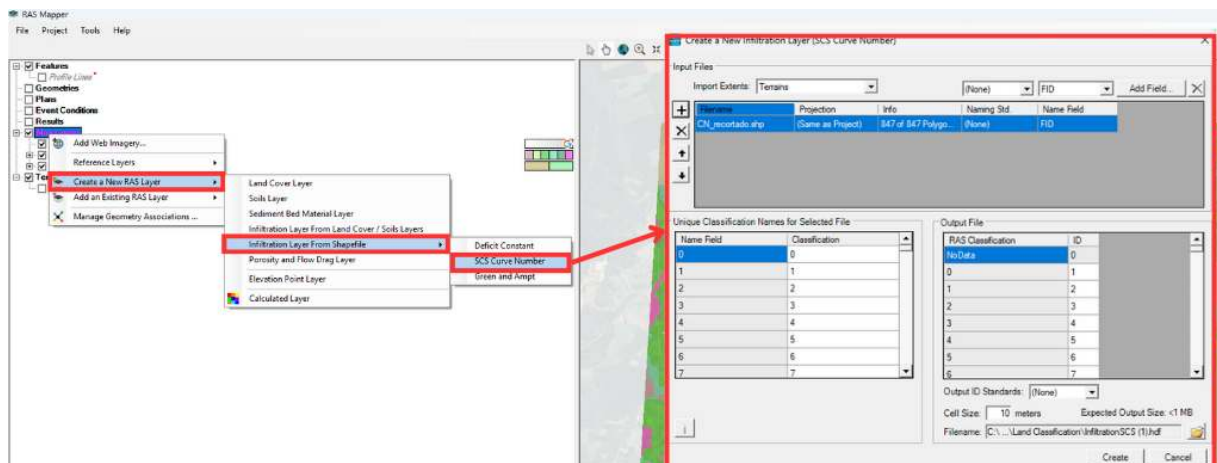
Figura 4.17 – Transformando o CN de *raster* para *shape*.



Fonte: Próprios autores.

Após, adicionando no HEC-RAS iremos em *Map Layers* » *Create a New RAS Layer* » *Infiltration Layer From Shapefile* » *SCS Curve Number* (Figura 4.18)

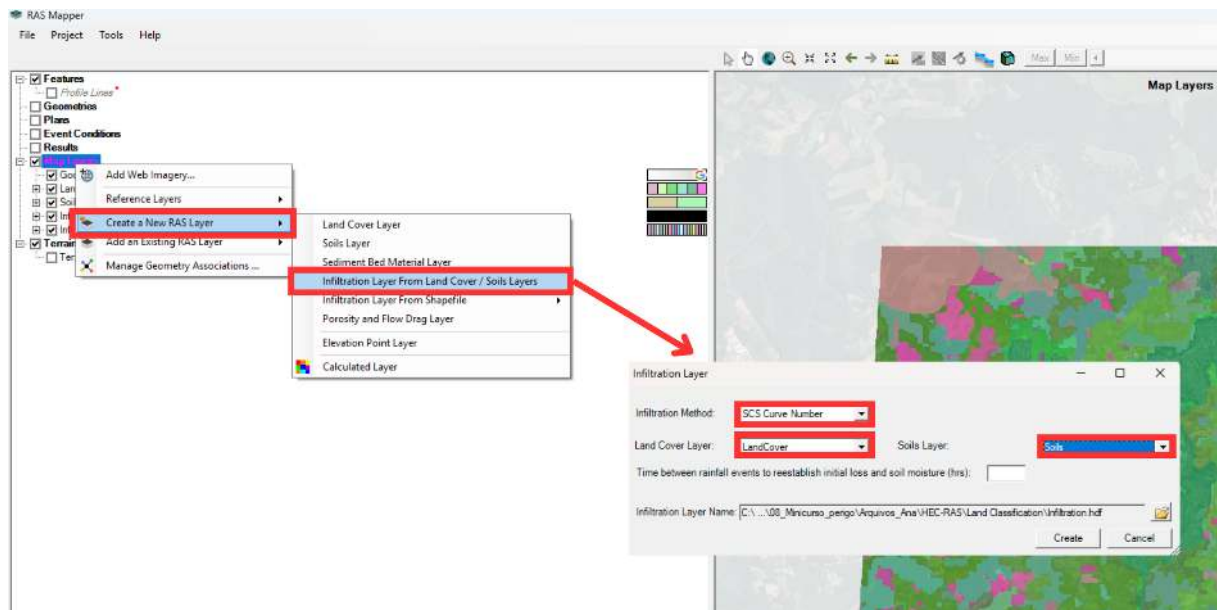
Figura 4.18 – Adicionando o CN no HEC-RAS.



Fonte: Próprios autores.

Para finalizar esta etapa, deve-se determinar a infiltração da bacia. Para isso, deve-se clicar com o botão direito do mouse em *MapLayers* » *Create a New RAS Layer* » *Infiltration Layer From LandCover/ Soils Cover* e editar as configurações, inserindo os parâmetros recém criados, como mostrado na Figura 4.19.

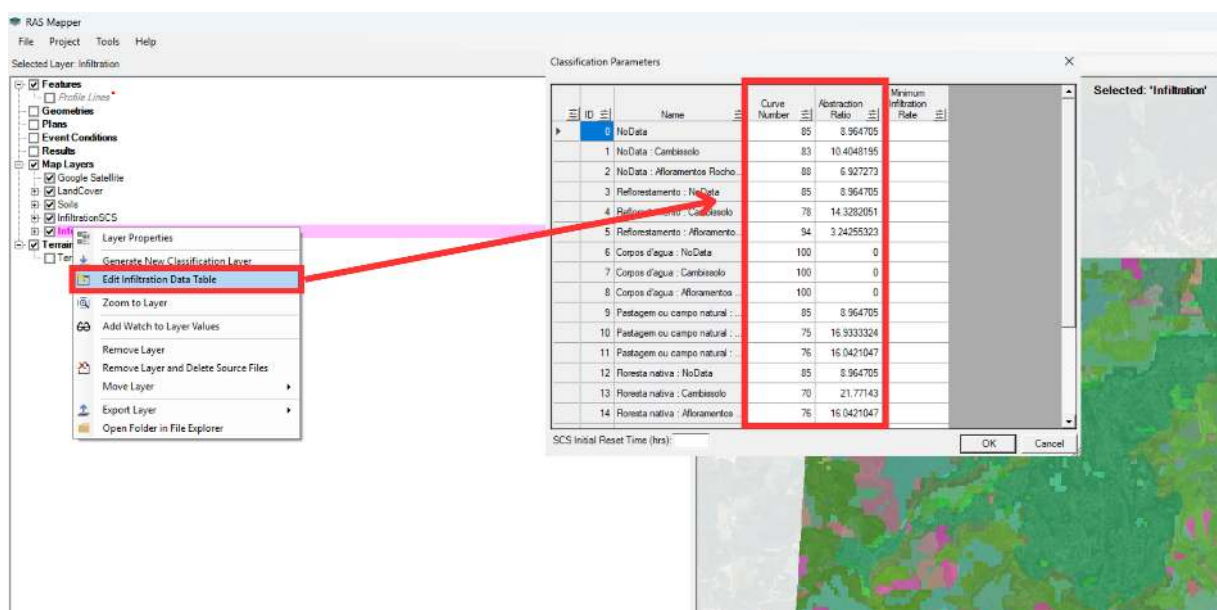
Figura 4.19 – Configurando a infiltração da bacia.



Fonte: Próprios autores.

Com o *layer* da infiltração presente no programa, deve-se alterar o *CN Number* (valor escalar para cada célula), o índice de abstração inicial (*Ia*) (valor escalar para cada célula) e a taxa mínima de infiltração (valor opcional para cada célula) em milímetros. Para isso, deve-se proceder como explicado no capítulo de modelagem hidrológica, no Item 3.2.3 e no Subitem 3.6.3.4, obtendo-se o valor de *Ia* a partir do CN. Então, preenche-se os dados como na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Alterando configurações de infiltração.

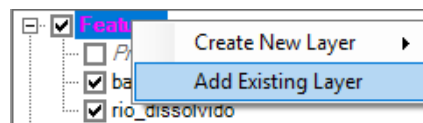


Fonte: Próprios autores.

Geometria

Para criar o domínio da simulação, pode-se delimitá-lo pela janela de geometria ou continuar no *RasMapper* e editá-lo. Neste caso, editaremos a geometria pelo *RasMapper*. Para dar apoio a delimitação da área de estudo, é interessante adicionar o perímetro do domínio de interesse importando um *shapefile* com o formato da bacia de estudo. Para adicionar o *shapefile* da bacia de estudo, clique com o botão direito do mouse em "Features" e selecione a opção "Add Existing Layer" (Figura 4.21), isso abrirá uma janela, e então selecione o arquivo do tipo *shapefile* com o formato da bacia de estudo.

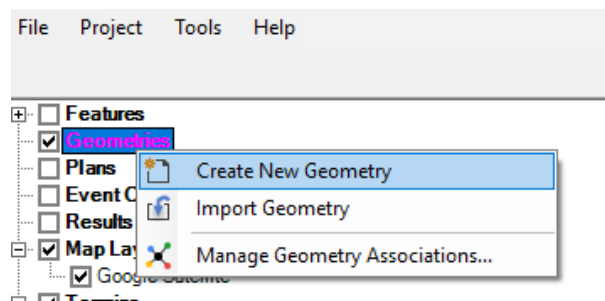
Figura 4.21 – Adicionando Camadas no HEC-RAS.



Fonte: Próprios autores.

Para a criação do domínio computacional, deve-se clicar com o botão direito do mouse em *Geometries*, e depois em *Create New Geometry*, vide Figura 4.22 (Note que ela pode ser importada de um shape já criado em formato .hdf ou .h5). Assim, se abrirá uma janela para você inserir o nome da nova geometria e, clicando em "OK", a janela fechará. Uma nova janela para associar as informações a este domínio se abrir e neste momento apenas feche esta janela. Agora, a sua nova geometria estará apta a ser editada. Com a nova geometria selecionada, clique na ferramenta  para editar a área de estudo. Então, expanda os subitens presentes na geometria clicando no ícone "+" ao lado do nome da geometria escolhida no canto esquerdo da janela, expanda também o item "2D Flow Areas". Com isso, selecione o subitem "Perimeters", após isso, temos duas opções, ou importar a área de estudos ou desenhá-la.

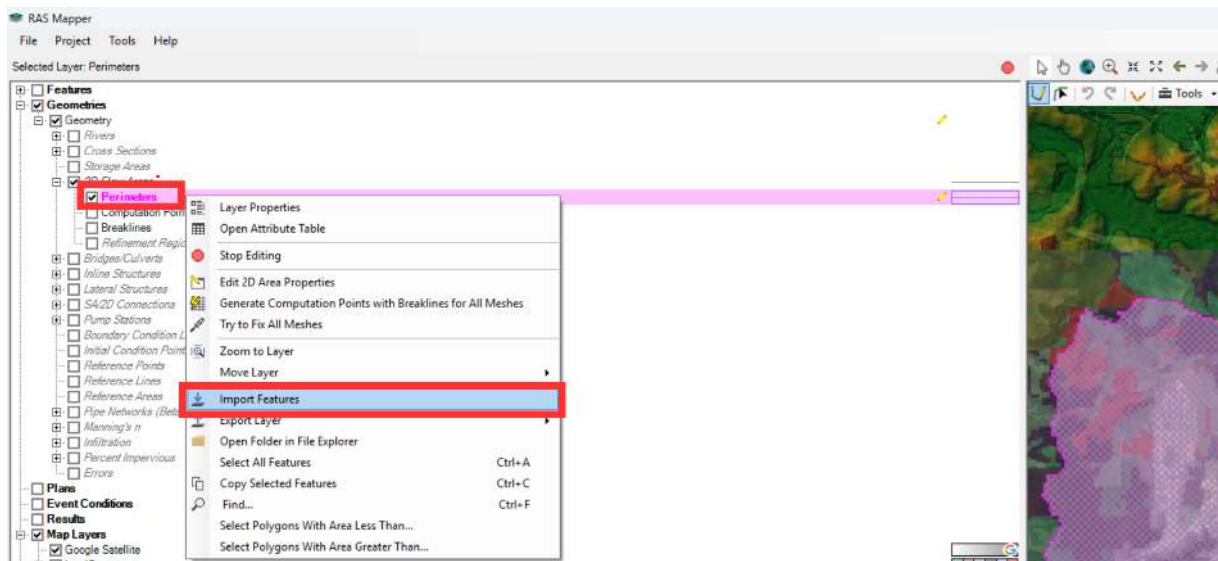
Figura 4.22 – Criação da geometria.



Fonte: Próprios autores.

Para importar, clique com o botão direito do mouse em *Perimeters* e vá em *Import Features* selecionando o *shape* da área de estudos (Figura 4.23).

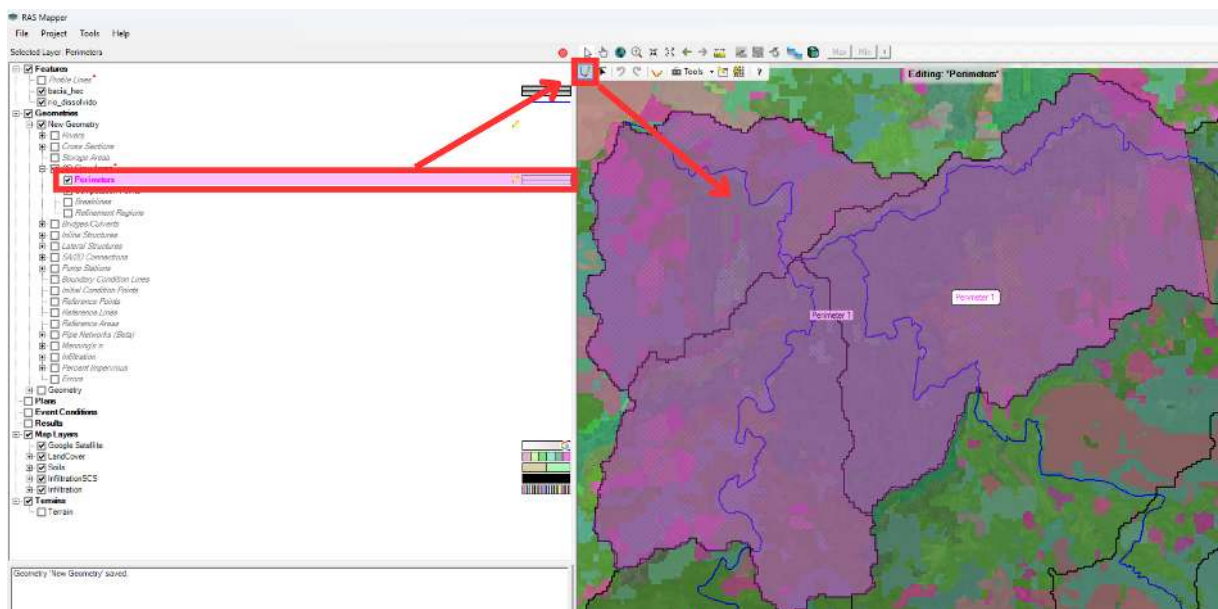
Figura 4.23 – Importando o contorno da área.



Fonte: Próprios autores.

Ou, caso prefira fazer manualmente, com o subitem *Perimeters* selecionado, comece a adicionar o perímetro de interesse ponto a ponto, com apoio do *shapefile* a pouco inserido, e no final dê dois cliques para terminar a adição e nomear a região (Figura 4.24).

Figura 4.24 – Criação do contorno da área.



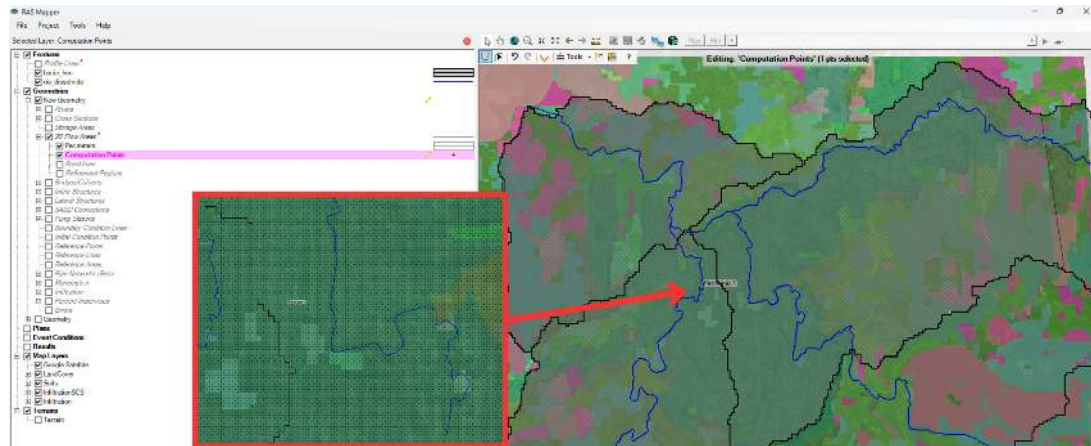
Fonte: Próprios autores.

Uma nova janela se abrirá automaticamente, caso tenha feito a delimitação manualmente, intitulada "2D Flow Area Editor". Nesta janela é possível definir o tamanho das células e o número de *Manning* padrão que será utilizando. Em "Points Spacing" defina "DX" e "DY" como 10. Mantenha o número de *Manning* padrão e clique em "Generate Computation Points" e então

feche esta janela.

Uma malha referente a geometria definida será criada com células quadriláteras de 10 x 10 m² (Figura 4.25). Nota-se, nas fronteiras, que as células não são exatamente quadradas, pois elas se adaptam ao formado, utilizando uma malha em volumes finitos. Para não termos instabilidades nas simulações aconselha-se que estas células não sejam muito "pontudas", facilitando o seu processamento.

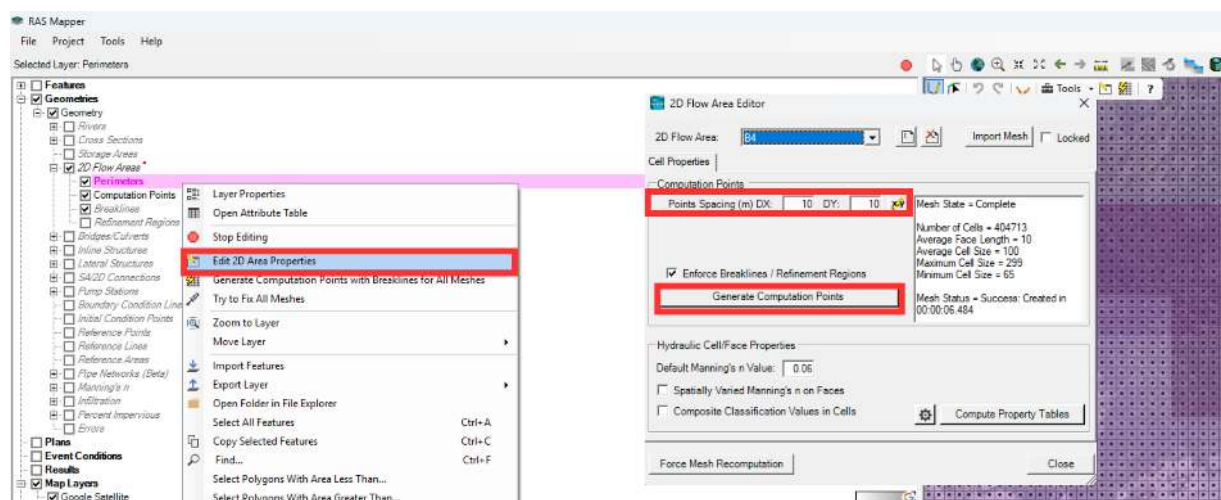
Figura 4.25 – Geração inicial da malha.



Fonte: Próprios autores.

Caso tenha adicionado o perímetro por importação, a janela não aparecerá como explicado anteriormente, portanto, deve-se clicar com o botão direito do *mouse* em *Perimeters* e acesse *Edit 2D Area Properties* (Figura 4.26). Em *Points Spacing (m)* inserira 10 tanto no DX quanto no DY. Feito isso, pressione *Generate Computation Points* e então a malha será gerada.

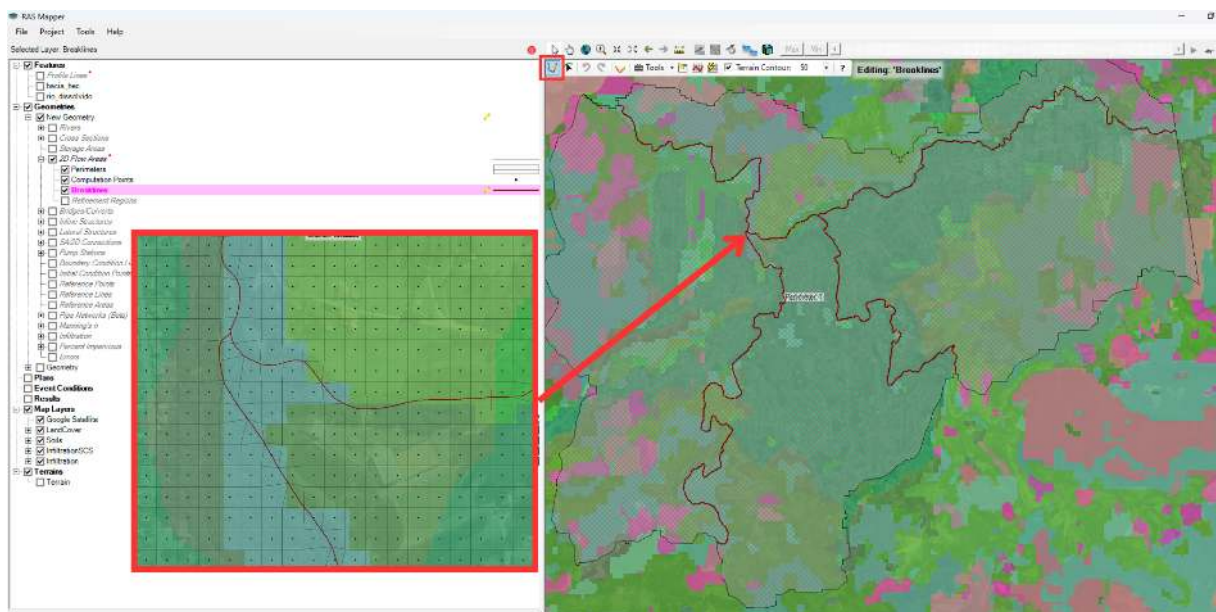
Figura 4.26 – Gerando a malha.



Fonte: Próprios autores.

Breaklines: Para a representação de rios dentro do domínio ou outras singularidades de interesse, as células no formato de quadriláteros podem não representar adequadamente os interesses da simulação, podendo trazer inconsistências no processamento e possíveis falhas no resultado. Desse modo, a ferramenta *Breaklines* permite mudar o formato de algumas células dentro do domínio para que elas tenham formatos mais complexos, para melhor calcular o escoamento em locais importantes, como nos leitos do rio, onde a água pode fluir de diferentes direções. Para que seu modelo tenha mais precisão em simular possíveis extravasamentos do leito do rio, muito importante para criação de mapas de inundação, adicionam-se *Breaklines* nos leitos dos rios que se pretende representar (Figura 4.27).

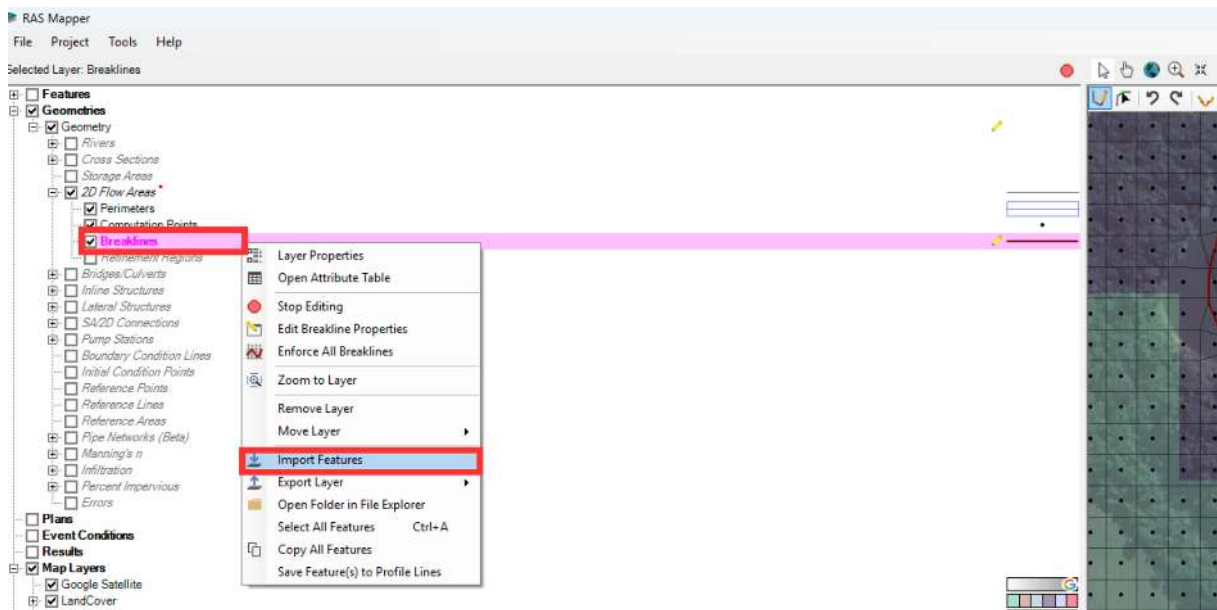
Figura 4.27 – Criando *Breaklines*.



Fonte: Próprios autores.

⇒ Para criar as *breaklines* de modo manual, seleciona-se na aba esquerda "*Breakline*", ainda com a ferramenta de edição ativada. Com o botão esquerdo do *mouse*, posiciona-se a *Breakline* de forma a seguir o leito do rio. No último ponto, clica-se com o botão direito do *mouse* duas vezes para abrir a janela de nomeação da linha, após nomeá-la, salva-se as alterações. Assim, para cada lado do rio, criam-se *Breaklines* gerando-se ao menos duas, uma para cada margem do rio.

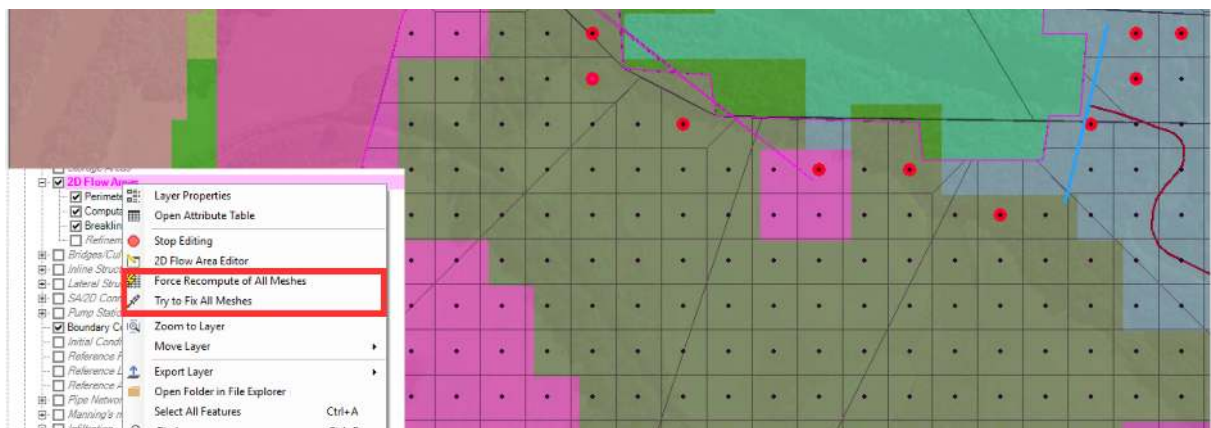
⇒ Para criar as *breaklines* de modo mais simples, importando um *Shapefile*, clicasse com o botão direito do *mouse* em *Breaklines* e vá em *Import Features*, com a edição ativada (Figura 4.28).

Figura 4.28 – Importante *Breaklines*.

Fonte: Próprios autores.

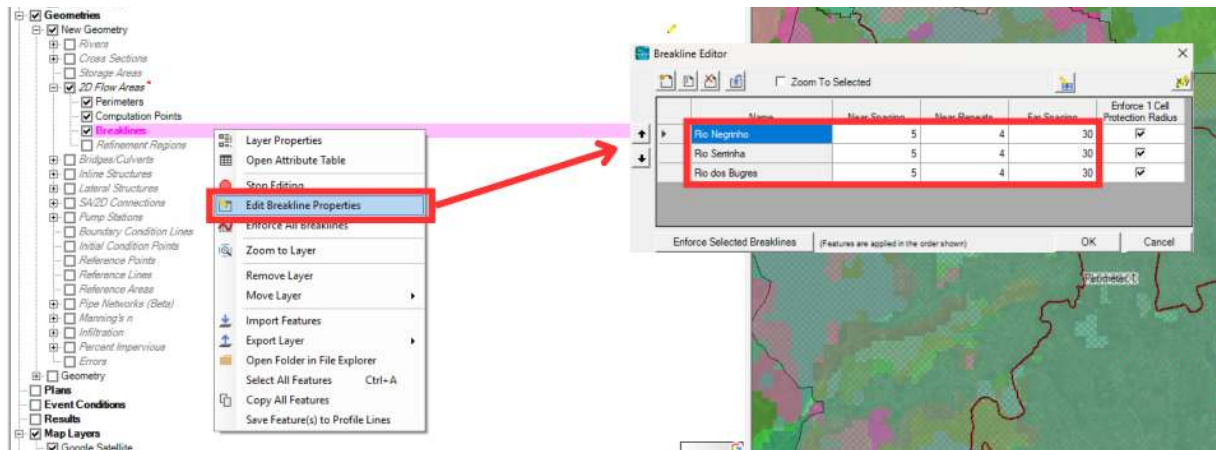
Caso apareça pontos vermelhos na sua malha, como na Figura 4.29, clica-se com o botão direito em *2D Flow Area*. Assim, existem duas opções para resolver este problema, a primeira é utilizando *Force Recompute of All Meshes* e caso os pontos vermelhos não tenham sumido ative *Try to Fix All Meshes*. Repita o segundo procedimento até que não apareçam mais pontos vermelhos.

Figura 4.29 – Correção de erros na malha.



Fonte: Próprios autores.

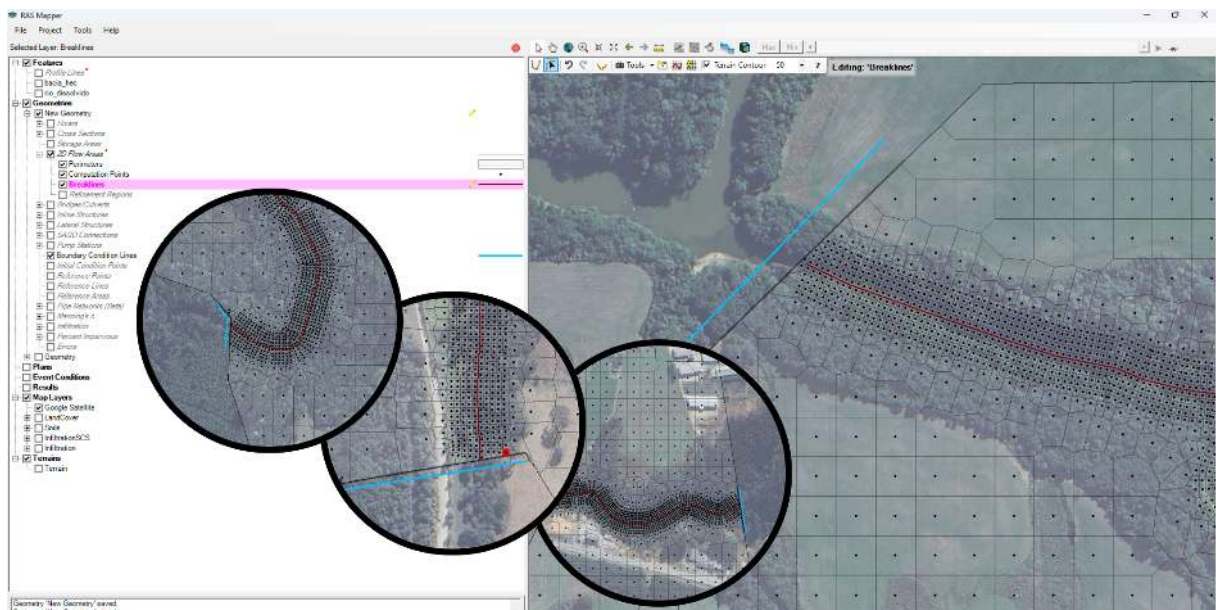
Deve-se editar as propriedades do *Breakline*, clicando-se com o botão direito do mouse em *Edit Breakline Properties* e, então, alterando-se os parâmetros, conforme a Figura 4.30, seguindo "Near Spacing" de 5, "Near Repeats" de 4 e "Far Spacing" de 30. Estas informações se referem ao tamanho da célula perto das *Breaklines* e em qual proporção elas aumentarão até um limite.

Figura 4.30 – Editando os parâmetros das *Breaklines*.

Fonte: Próprios autores.

É necessário adicionar a informação de onde entrará e sairá a água na malha para então calcular seu movimento dentro dela, definido assim o que chamamos de **Condições de Contorno**. Cria-se linha(s) onde o rio entra ou sai no domínio computacional, podendo ter várias entradas e várias saídas, conforme houver confluências ou ramificações.

⇒ Assim, na aba à esquerda, clicando em *Boundary Condition Lines* se delimita as condições de contorno na malha. As linhas devem ir de uma planície de inundação a outra do rio, sendo perpendiculares ao fluxo dele. Assim, a ferramenta criará no contorno da malha a *Boundary Condition Lines* para melhor adaptar a linha que criada pelo usuário. Dando dois cliques no fim da linha encerrará a criação dela e abrirá a janela para se nomeá-la e salvá-la (Figura 4.31).

Figura 4.31 – Criando *Boundary Condition Lines*.

Fonte: Próprios autores.

Para dar continuidade ao processo, devem ser colocados os parâmetros configurados até então no gerenciador de associações geométricas. Para isso, deve-se clicar com o botão direito do mouse em *Geometries* » *Manage Geometry Associations...* e selecionar as respectivas opções para o Terreno - *Terrain*, Número de Manning - *LandCover*, Infiltração - *Infiltration* e Impenetrabilidade - *LandCover* (Figura 4.32).

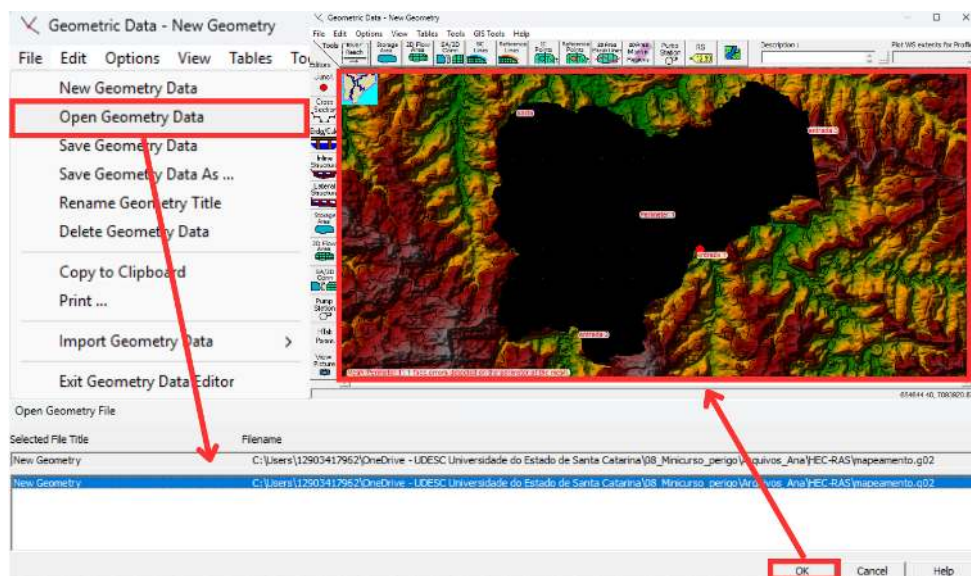
Figura 4.32 – Selecionando as opções de gerenciamento.



Fonte: Próprios autores.

Finalizada a montagem da malha, clica-se em *File* na aba superior e, em seguida, em *Save*. Na página inicial, em  (*View/Edit Geometric Data*) a abrir, em *File* » *Open Geometry Data* a sua geometria criada, então, salvar o arquivo em *File* » *Save Geometry Data* (Figura 4.33). Esse procedimento serve para reduzir os erros em alterações futuras.

Figura 4.33 – *Geometry Data*.

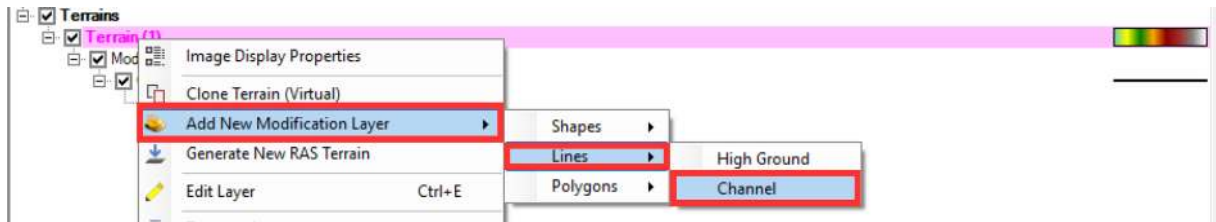


Fonte: Próprios autores.

A sua geometria pode ter erros que só serão identificados posteriormente, ao rodar o modelo. Assim, você terá de voltar a edição de geometria para resolver problemas como o de células com mais do que nove lados, ou células muito pequenas, por exemplo.

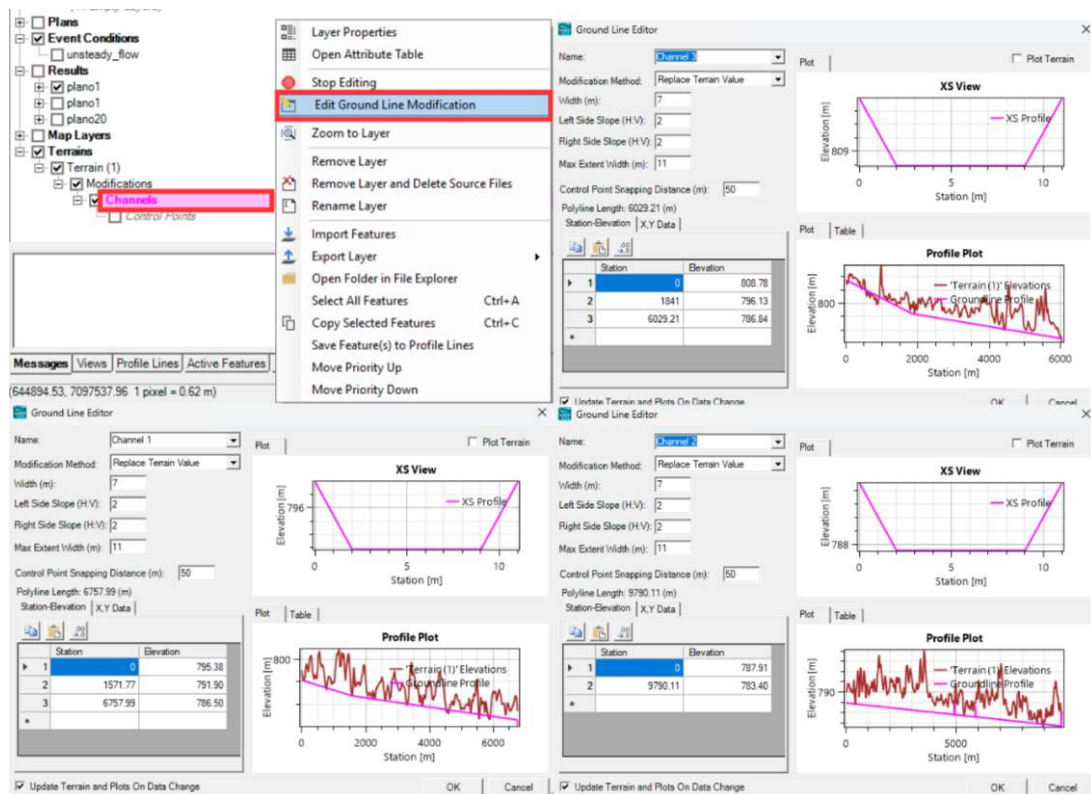
Para aperfeiçoar a representação do canal, "escavaremos" o MDT para a representação dos cursos hídricos, pois o MDT não tem a informação da profundidade do rio, ou seja, da batimetria. Para efetivar este procedimento, no RASMapper, clique com o botão direito do *mouse* no terreno que adicionamos anteriormente; após isso, acesse *Add New Modification Layer » Lines » Channel* (Figura 4.34); posteriormente, clique no "+" do terreno e em *Modifications*, e; em seguida, clique em *Channels* e na ferramenta . Ainda, com a função de edição (lápis) ativada, clicaremos com o botão direito do *mouse* em *Channels* e iremos em *Edit Ground Line Modification* que aparecerá as abas dos *channels* que criamos (Figura 4.35).

Figura 4.34 – Channels



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.35 – Ground Line Editor

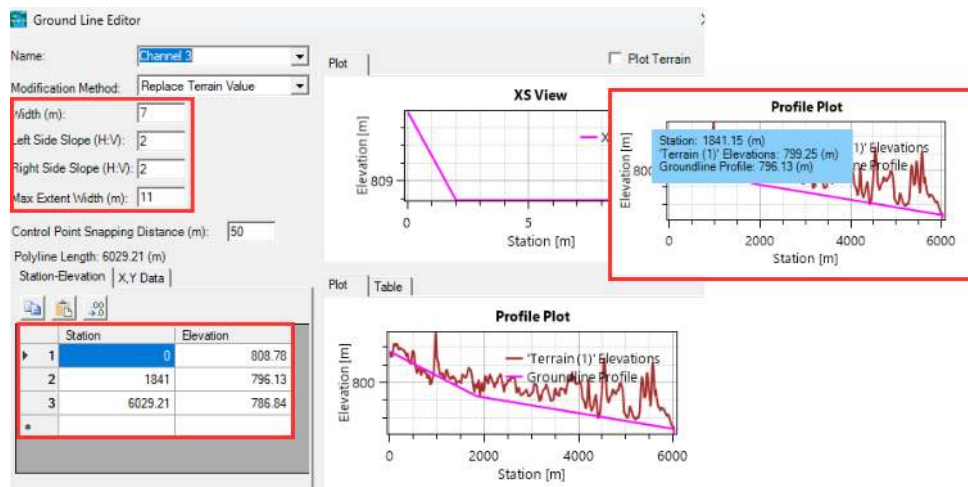


Fonte: Próprios autores.

Aberta a aba de edições iremos alterar o método em *Modification Method* para *Replace Terrain Value* e alteramos os valores referentes a esta escavação como a largura, as declividades esquerdas e direitas dos taludes e a largura máxima (Figura 4.36). Em *Profile Plot* podemos ver que a reta rosa (rio após a "escavação") não se comporta como a vermelha (que representa as elevações do rio de acordo com o MDT), portanto, com o *mouse* vamos nos pontos onde há maior declividade e anotaremos o *Station* e *Groundline Profile*, depois, inserimos respectivamente esses valores em *Station* e *Elevation* na planilha presente na própria janela.

Fluxo

Dados de fluxo podem ter origem de diversas fontes, podendo ser provenientes de outros *softwares*, como o HEC-HMS, tabelas fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) de

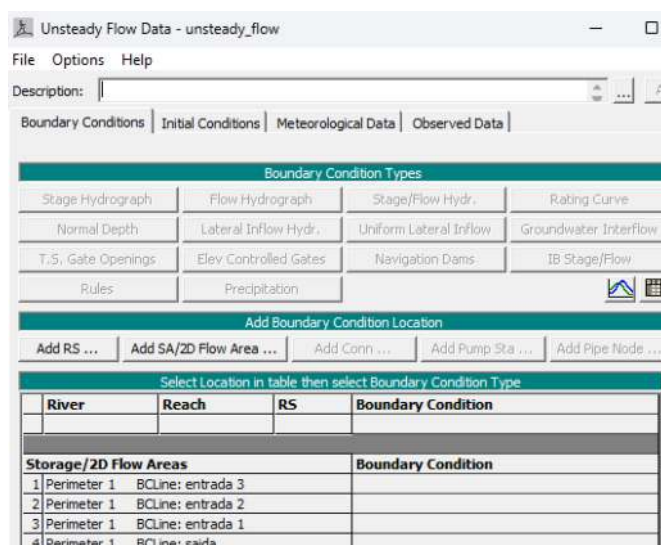
Figura 4.36 – Editando as *Channels*

Fonte: Próprios autores.

estações pluviométricas e fluviométricas e também por medições em campo.

No exemplo deste documento, para a validação, utiliza-se uma série de dados obtida por interpolação dos dados fornecidos pela ANA, que devem ser processados no HEC-HMS para a obtenção dos hidrogramas de entrada, de maneira semelhante a apresentada neste documento. Posteriormente, para a criação dos mapas com períodos de retorno, utilizaremos as vazões provenientes das chuvas sintéticas, isto é, da Equação IDF, como apresentado no capítulo anterior.

Para inserir as condições de fluxo no modelo, deve-se ir para a interface inicial e clicar no ícone  para abrir a janela de *Unsteady Flow Data* (Figura 4.37), que é onde se poderá inserir e editar fluxos em regime não permanente para o modelo 2D. Mais explicações sobre este procedimento serão apresentadas nos itens a seguir.

Figura 4.37 – Janela *Unsteady Flow Data*.

Fonte: Próprios autores.

4.8.5 Processamento e validação do modelo hidrodinâmico

Para a validação do modelo hidrodinâmico precisamos definir um evento de inundação que já esteja mapeado. Esses mapas podem ser encontrados no plano de macrodrenagem do município (ou similar), Defesa Civil ou estudos científicos, mas, caso não encontre essa informação, será necessário realizar este estudo por meio de entrevistas e arquivos históricos do município. No presente trabalho, será utilizado o mapa de inundação obtido por Giglio [2010], para outubro do ano de 2004, referente a área urbana do município de Rio Negrinho. **Além do mapa de inundação, é necessário ter-se a chuva observada que ocasionou esta inundação.** Neste caso, utilizamos uma interpolação proveniente de dados da ANA (Tabela 4.3). É importante lembrar que no HEC-RAS utilizaremos os dados de vazão provenientes do processamento da chuva pelo HEC-HMS. Desta forma, aplique o HEC-HMS como nos passos anteriores, para este evento de chuva. Utilize uma discretização de cálculo no HEC-HMS de hora em hora. Note que o HEC-HMS já está calibrado e validado, então esta etapa não precisa ser realizada novamente.

Tabela 4.3 – Dados de chuva diária

Data	Chuva (mm)	Data	Chuva (mm)
07/10/2004	0	19/10/2004	1,92
08/10/2004	0	20/10/2004	0,12
09/10/2004	2,88	21/10/2004	0,24
10/10/2004	6,72	22/10/2004	0
11/10/2004	0,12	23/10/2004	25,44
12/10/2004	2,52	24/10/2004	35,88
13/10/2004	11,64	25/10/2004	2,76
14/10/2004	0,36	26/10/2004	1,32
15/10/2004	0,12	27/10/2004	0
16/10/2004	9,36	28/10/2004	0
17/10/2004	0,48	29/10/2004	0
18/10/2004	8,4		

Fonte: Próprios autores.

Na janela de *Unsteady Flow Data*, estarão listadas todas as *Boundary Condition Lines* da malha criadas anteriormente (Figura 4.37). Começando-se com a condição de entrada, clique na linha das *Boundary Condition Lines* de entrada 1 (montante) para selecioná-la e, então, escolha o tipo de condição de contorno. Clique sobre *Flow Hydrograph* para abrir uma nova janela onde são inseridos os valores de vazão para cada seção de entrada (Figura 4.38), considerando os dados da validação.

É possível inserir os dados de vazão para iniciar no momento que se escolher posteriormente como horário de início da simulação ou, ainda, escolher um horário específico para início e fim da propagação do hidrograma. Note que a primeira opção acaba resolvendo possíveis problemas de incompatibilidade de horário da simulação e dados de vazão, entretanto, como temos o pro-

Figura 4.38 – Janela *Flow Hydrograph* preenchida com os dados de entrada.

Flow Hydrograph

2D: Perimeter 1 BCLine: entrada 1

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 07OCT2004 Time: 00:00

☒ Fixed Start Time: Date: 07OCT2004 Time: 0

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m ³ /s)
1	06Oct2004 2400	0:00:00	3.3
2	07Oct2004 0100	1:00:00	3.3
3	07Oct2004 0200	2:00:00	3.2
4	07Oct2004 0300	3:00:00	3.2
5	07Oct2004 0400	4:00:00	3.2
6	07Oct2004 0500	5:00:00	3.1
7	07Oct2004 0600	6:00:00	3.1
8	07Oct2004 0700	7:00:00	3
9	07Oct2004 0800	8:00:00	3
10	07Oct2004 0900	9:00:00	3
11	07Oct2004 1000	10:00:00	2.9
12	07Oct2004 1100	11:00:00	2.9
13	07Oct2004 1200	12:00:00	2.8
14	07Oct2004 1300	13:00:00	2.8
15	07Oct2004 1400	14:00:00	2.8

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.0005 TW

Fonte: Próprios autores.

cedimento de validação sendo aplicado, é importante que tenhamos as datas bem estabelecidas e utilizaremos a segunda opção para esta situação.

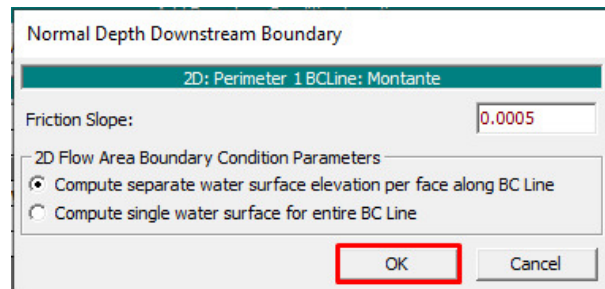
Uma ferramenta interessante é a "*Interpolate Missing Value*", onde se pode também inserir apenas os dados de vazão em horários específicos conhecidos na tabela e interpolar os valores faltantes.

Próximo ao botão "OK" se tem a lacuna de *EG Slope for distributing flow along BC Line*, onde se coloca a inclinação da Linha de energia, que será representada pela inclinação do fundo do canal na seção de entrada do rio, **sem esta informação a simulação não roda**. No nosso caso utilizaremos o valor de 0,0005 m/m, valor obtido por aproximações do MDT e medições em campo. Depois de inseridos todos os valores de vazão desejados, clica-se em "OK" para fechar a janela e salvar os valores para aquela sessão. Faça procedimento semelhante para as demais condições de entrada.

A fim de adicionar a condição de saída, na tela de *Unsteady Flow Data* clique na *BC Line* de saída para selecioná-la. Utilizaremos a opção *Normal Depth*, que abrirá uma nova janela onde se poderá inserir a inclinação do fundo da seção de saída (Figura 4.39), para o programa

calcular como é a profundidade normal do rio neste ponto a partir da Equação de Manning. Adicione noamente o valor de 0.0005 e selecione a primeira opção da caixa. Após isso, clica-se "OK" para salvar a condição normal na saída.²

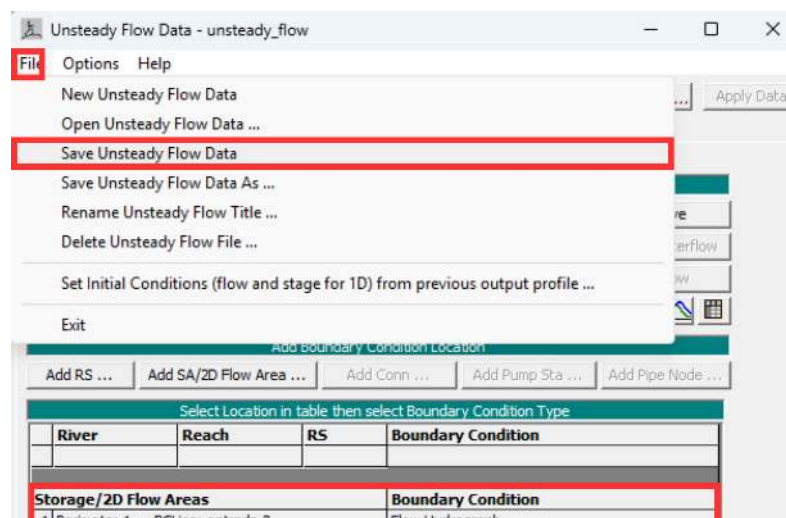
Figura 4.39 – Janela *Normal Depth* para jusante.



Fonte: Próprios autores.

Para salvar a condição de fluxo criada, clica-se em *File* na aba superior, então, seleciona-se a opção *Save Unsteady Flow As ...*, abrindo uma janela para nomear e salvar a condição criada (Figura 4.40). Assim, você terá terminado de inserir as condições de fluxo do modelo. Dessa forma, foram listadas aqui as condições usuais de entrada e saída para a simulação de rios, mas pode-se utilizar qualquer outro tipo de condição de fluxo, tanto na entrada, quanto na saída, para melhor representar o modelo desejado.

Figura 4.40 – Salvando o *Unsteady Flow Data*.



Fonte: Próprios autores.

² Observa-se que a saída *Normal Depth* deve ser considerada quando não consideramos o efeito de jusante na simulação, como de maré ou remanso. Nestas situações, deve-se compreender como o nível na saída se comporta e adicionar este nível pela opção *Stage Hydrograph*. No caso do centro urbano do município de Rio Negrinho, o efeito de remanso não é desprezível. Logo, o produto gerado pelo presente curso apresente apenas situações parciais de inundações nesta localidade de interesse. Este tema não será desenvolvido devido a sua complexidade, que está além do escopo do presente curso

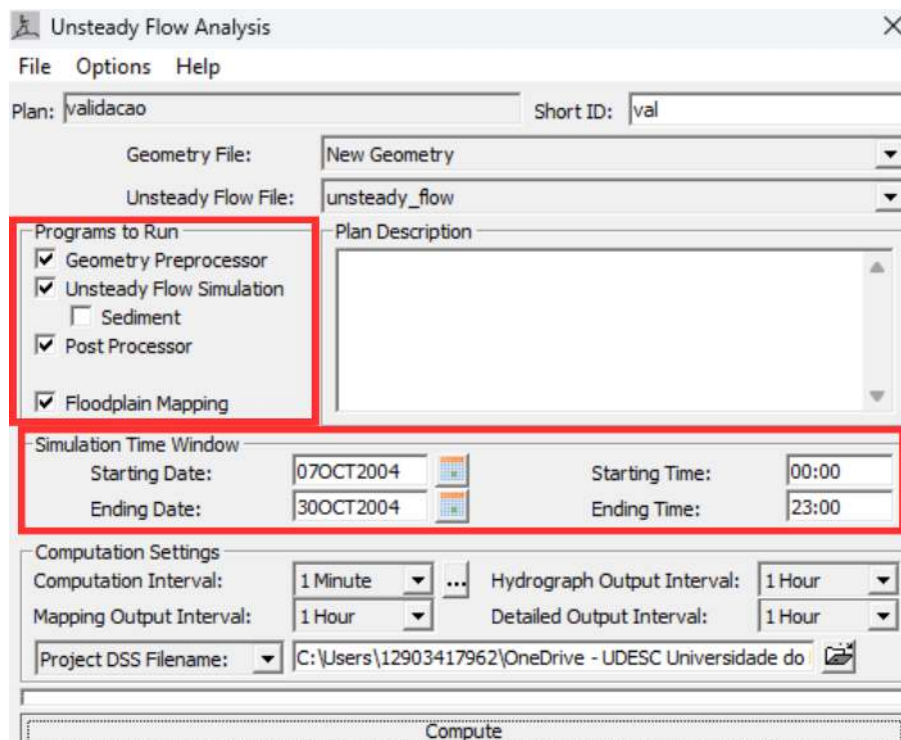
Processamento

Nesta etapa, escolheremos as configurações dos métodos que utilizaremos para fazer a simulação, assim como definir o passo de tempo e rodar o modelo. Para abrir a ferramenta de processamento, deve-se, na interface inicial do HEC-RAS, clicar no ícone  para acessar o *Perform an Unsteady Flow Simulation*, onde se podem alterar os parâmetros dos cálculos e iniciar o processo de simulação.

Na aba superior, clica-se em *File* e, então, em *New Plan*. Isso abrirá uma janela onde deve-se inserir o nome do plano de simulação e onde se quer salvá-lo. Após nomear o novo plano e escolher a sua pasta de destino, clica-se em "OK", o que abrirá uma nova janela onde se pede para adicionar um *Short ID* do plano. Nessa parte, insere-se um nome no campo em branco e clica-se em "OK".

Para um primeiro processamento, selecionam-se as quatro opções principais da área *Programs to Run*, apenas não selecionando o campo *Sediment* (Figura 4.41). Para rodadas futuras, caso seja feita uma alteração no modelo que não envolva a geometria pode-se deixar em branco o campo *Geometry Processor*, que o processamento levará menos tempo. Na área *Simulation Time Window*, determine o momento de início e fim do período que se deseja simular. Após a introdução desses valores, caso a segunda opção na definição da vazão tivesse sido selecionada, as vazões seriam referenciadas neste tempo, encerrando assim todos os dados faltantes da parte de fluxo (Figura 4.41).

Figura 4.41 – Janela *Unsteady Flow Simulation* preenchida.

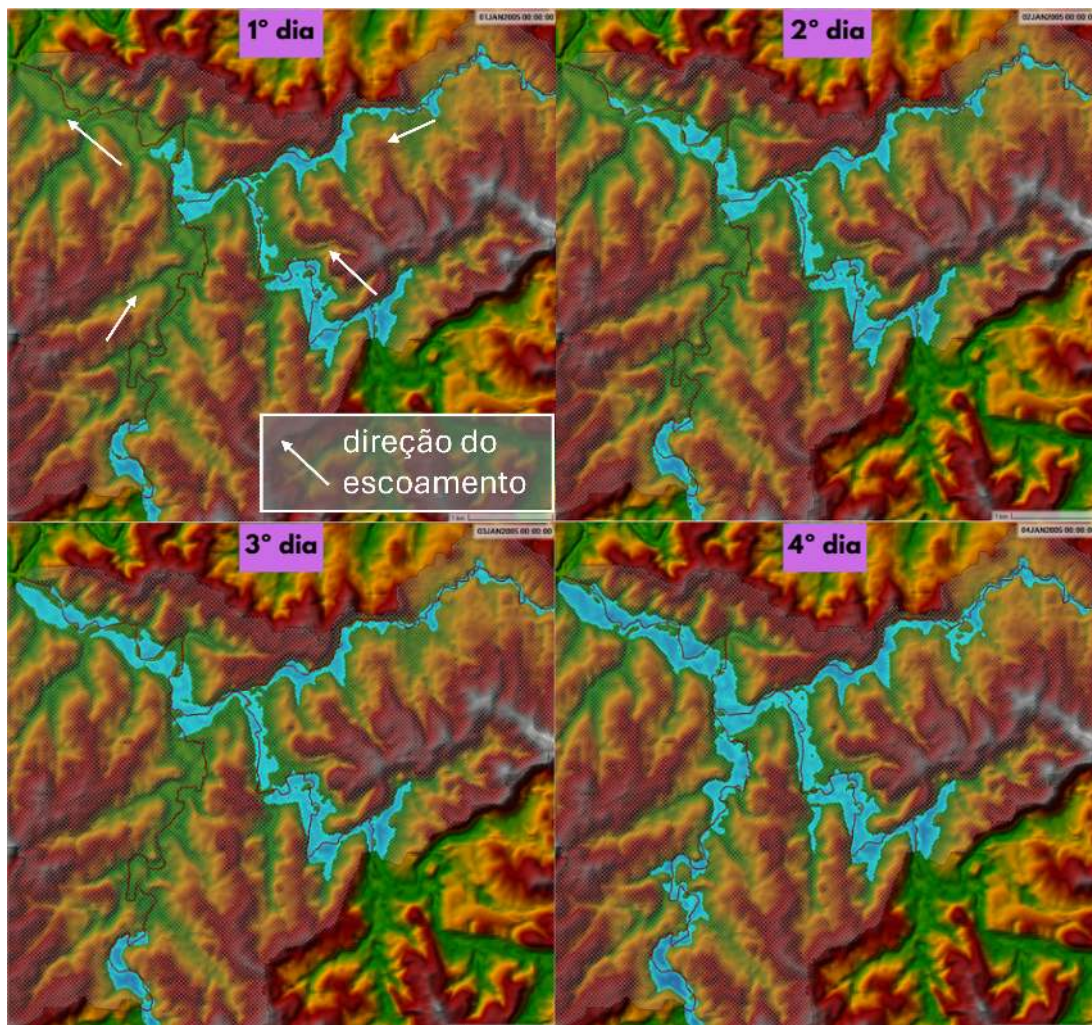


Fonte: Próprios autores.

Em seguida, clique na aba superior da janela do *Unsteady Flow Analysis*, em *Options* e, depois, em *Computation Options and Tolerances...*, abrindo uma janela onde será possível alterar alguns parâmetros de cálculo do modelo. Nessa janela, haverá sete abas; algumas delas servem para modelos 1D, outras para 2D e outras para modelos mistos. Nesta etapa, são enfatizados aspectos importantes para o modelo 2D.

Para realizar a simulação, existe a necessidade de aplicar as condições iniciais. Desta forma, devemos considerar que o rio já escoava a água do escoamento base, antes da onda de cheia chegar. Caso você rode o modelo sem essa consideração de escoamento inicial, um rio efêmero sem escoamento será inicialmente representado, como apresentado na Figura 4.42, em que se pode observar que o rio apenas está completamente cheio a partir do quarto dia simulado.

Figura 4.42 – Evolução da situação de inundação caso não se considere a condição inicial do rio, para o 1º, 2º dia, 3º dia, e 4º dia.



Fonte: Próprios autores.

Para adicionarmos a condição inicial podemos utilizar o método de *Warm up*³. Na primeira aba (*General*), iremos em "*1D/2D Unsteady Flow Options*" e alteraremos os valores de: "*Number of warm up time steps*" para 7000 que é uma aproximação de quantos minutos tem em 5 dias; "*Time step during warm up period (hrs)*" para 0.02 que é uma aproximação de um minuto em fração de horas; "*Minimum time step for time slicing (hrs)*" para 0.01, e; "*Maximum number of time slices*" para 20, estes dois últimos valores tendo relação com o intervalo de tempo variável para manter a solução estável.

Figura 4.43 – Aba *General* em *Computation Options and Tolerances...*

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General | 2D Flow Options | Pipe Systems | 1D/2D Options | Advanced Time Step Control | 1D Mixed Flow Options

1D Unsteady Flow Options

Theta [implicit weighting factor] (0.6-1.0): 1.

Theta for warm up [implicit weighting factor] (0.6-1.0): 1.

Water surface calculation tolerance [max=0.06](m): 0.02

Storage Area elevation tolerance [max=0.06](m): 0.02

Flow calculation tolerance [optional] (m3/s):

Max error in water surface solution (Abort Tolerance)(m): 100.

Maximum number of iterations (0-40): 20

Maximum iterations without improvement (0-40):

1D/2D Unsteady Flow Options

Number of warm up time steps (0 - 100,000): 7000

Time step during warm up period (hrs): 0.02

Minimum time step for time slicing (hrs): 0.01

Maximum number of time slices: 20

Lateral Structure flow stability factor (1.0-3.0): 2.

Inline Structure flow stability factor (1.0-3.0): 1.

Weir flow submergence decay exponent (1.0-3.0): 1.

Gate flow submergence decay exponent (1.0-3.0): 1.

Gravity (m/s^2): 32.17405

Wind Forces

Reference Frame: Eulerian

Drag Formulation: Hsu (1988)

Geometry Preprocessor Options

Family of Rating Curves for Internal Boundaries

☒ Use existing internal boundary tables when possible.

☐ Recompute at all internal boundaries

1D Numerical Solution

☒ Finite Difference (classic HEC-RAS methodology)

Finite Difference Matrix Solver

☒ Skyline/Gaussian (Default: faster for dendritic systems)

☐ Pardiso (Optional: may be faster for large interconnected systems)

☐ Finite Volume (Beta)

Number of cores to use with Pardiso solver: All Available

OK Cancel Defaults ...

Fonte: Próprios autores.

Feito isso, em *2D Flow Options*, é possível alterar uma série de configurações (Figura 4.44). As colunas referem-se as malhas criadas, podendo melhor adequar os cálculos para cada área que você pretende simular. Alterando o "*Theta*", altera-se o fator que torna o esquema implícito. É possível fazer os cálculos de forma totalmente implícita ($\theta = 1$) ou parcialmente implícita ($\theta < 1$) Neste momento, aconselha-se utilizar $\theta = 1$, por ser uma solução mais estável.

³ Existem diversas formas válidas para considerar as condições iniciais. Outra maneira muito utilizada é rodar a condição de escoamento base até que o escoamento fique permanente e criar um arquivo de inicialização no final deste processamento.

Figura 4.44 – Aba 2D Flow Options em Computation Options and Tolerances...

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General | 2D Flow Options | Pipe Systems | 1D/2D Options | Advanced Time Step Control | 1D Mixed Flow Options

☐ Use Coriolis Effects (not used with Diffusion Wave equation)

Parameter	(Default)	Perimeter 1
1 Theta (0.5-1.0)	1	1
2 Theta Warmup (0.5-1.0)	1	1
3 Water Surface Tolerance (max=0.06)(m)	0.003	0.003
4 Volume Tolerance (m)	0.003	0.003
5 Maximum Iterations	20	20
6 Advanced Convergence	☐	☐
7 Water Surface Max Tolerance (m)	0.045	0.045
8 Water Surface RMS Tolerance (m)	0.006	0.006
9 Water Surface Stalling Tolerance (%)	1	1
10 Equation Set	SWE-ELM (original/faster)	SWE-ELM (original/faster)
11 Initial Conditions Time (hrs)		
12 Initial Conditions Ramp Up Fraction (0-1)	0.1	0.1
13 Number of Time Slices (Integer Value)	1	1
14 Turbulence Model	None	None
15 Longitudinal Mixing Coefficient	0.3	0.3
16 Transverse Mixing Coefficient	0.1	0.1
17 Smagorinsky Coefficient	0.05	0.05
18 Boundary Condition Volume Check	☐	☐
19 Latitude for Coriolis (-90 to 90)		
20 Solver Cores	All Available	All Available
21 Matrix Solver	PARDISO (Direct)	PARDISO (Direct)
22 Convergence Tolerance	0.00001	0.00001
23 Minimum Iterations	3	3
24 Maximum Iterations	30	30
25 Restart Iteration	10	10

OK Cancel Defaults ...

Fonte: Próprios autores.

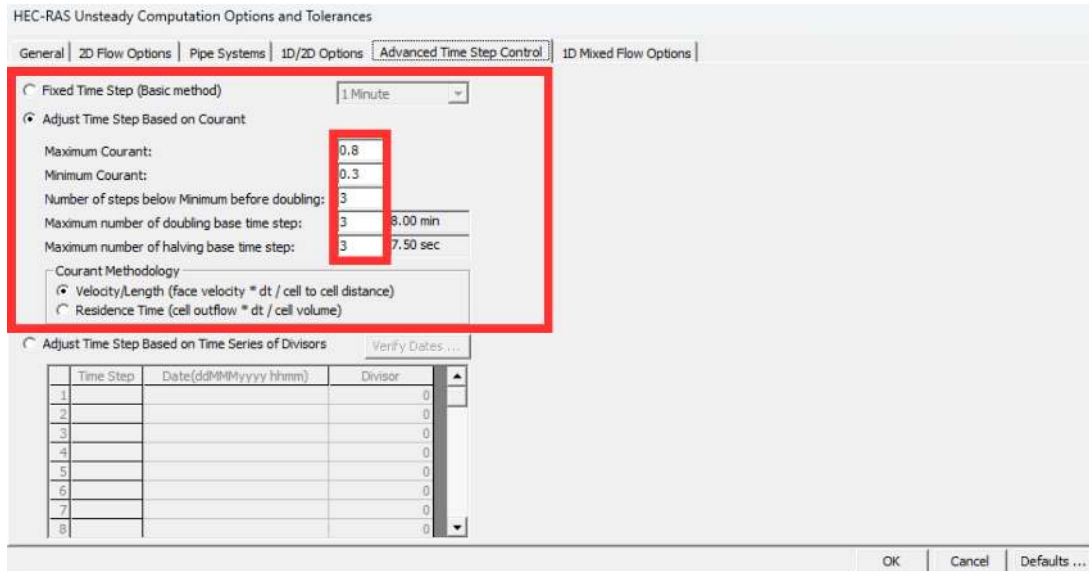
Também é possível alterar algumas tolerâncias adotadas no cálculo, além da fórmula utilizada para o cálculo, podendo-se modificar em *Equation Set*, entre *Diffusion Wave*, que é um bom método, onde apenas gravidade, pressão e fricção são avaliadas; *Shallow Water Equation* pelo método de advecção de Lagrange e Euler, que é mais rápido de fazer; *Shallow Water Equation* pelo método de advecção de Euler, onde a conservação de momento é estrita e *Shallow Water Equation* pela aproximação local de inércia. Tanto a segunda quanto a terceira opção apresentam cálculos mais precisos e trazem menos instabilidades, porém aumentam o tempo de processamento. Na presente aplicação, foi utilizado o segundo método (SWE-ELM) para que o programa realizasse os cálculos.

Em *Solver Cores*, pode-se escolher a quantidade de núcleos do computador que se deseja utilizar durante o processamento. Caso se deixe em *All available*, ele utilizará quantos achar necessário e estiverem disponíveis. Teoricamente, quantos mais núcleos forem utilizados, mais rápido será o processamento, porém pode deixar o computador muito lento para fazer outras atividades até que o processamento do modelo termine.

Na aba *Advanced Time Step Control*, é possível alterar o passo de tempo utilizado no cálculo. Pode ser utilizado um **passo de tempo fixo** determinado antes de iniciar a simulação ou um **passo de tempo variável**, conforme o Coeficiente de Courant ou, ainda, **um passo que se altere em determinado tempo da simulação** (Figura 4.45). A opção mais estável é a segunda, pois ela reconhece quando o sistema está encontrando dificuldades de calcular os valores para

um passo de tempo específico e diminui o passo pela metade e, caso o sistema esteja mais estável e sem necessidade de um passo tão curto, ele dobra o passo de tempo.

Figura 4.45 – Aba *Advanced Time Step Control* em *Computation Options and Tolerances*.

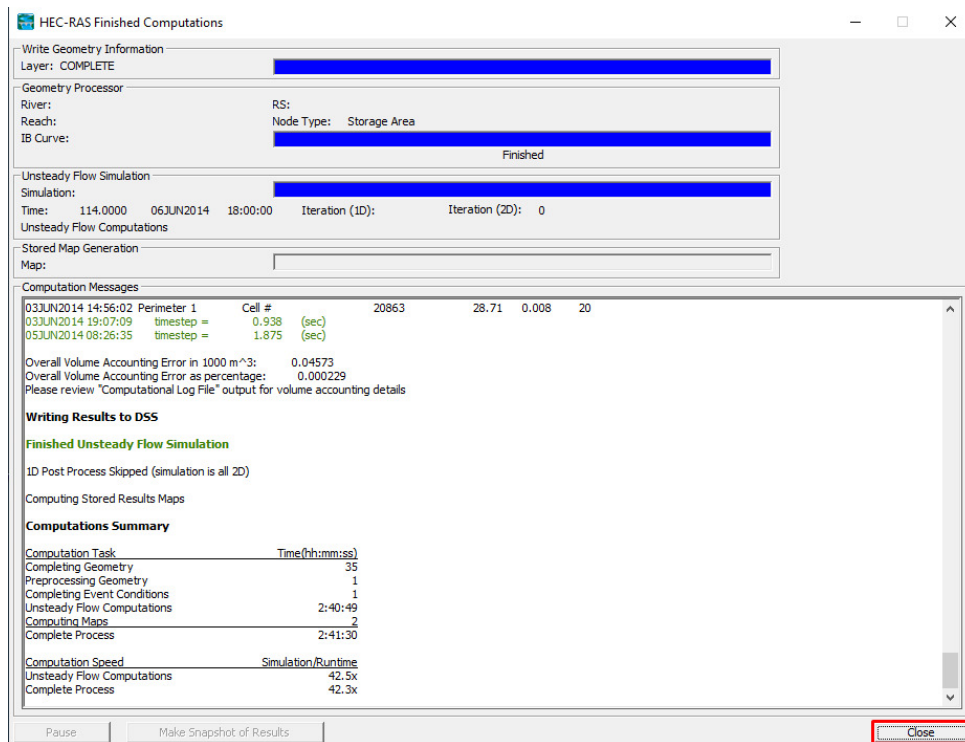


Fonte: Próprios autores.

Para configurar o passo de tempo variável pelo Coeficiente de Courant, deve-se primeiro selecionar a opção *Adjust Time Step Based on Courant*, em seguida, definem-se o valor máximo e mínimo de Courant, quando os cálculos do sistema chegarem no Courant máximo, ele dividirá o tempo pela metade, quando ele chegar no Courant mínimo ele dobrará o tempo. Lembre-se que o Courant vai de uma escala de 0 a 1, então, tenha em mente valores dentro deste intervalo e fora dos seus limites. Na linha *Number of steps below minimum before doubling*, insere-se o número de vezes que o sistema deve obter o Courant limitante com o passo de tempo antes de dobrá-lo. Em *Maximum number of doubling base time step* e *Maximum number of halving base time step*, deve-se inserir um multiplicador máximo para o valor base, de forma a definir o passo mínimo e máximo que o sistema pode utilizar, sendo mostrado na caixa do lado o valor do máximo ou mínimo. Na Figura 4.45 apresentamos uma sugestão de valores.

Após terem sido configurados todos os parâmetros de cálculos desejados, clica-se em "OK" para fechar a janela salvando suas configurações. Com isso, o modelo está pronto para ser rodado. Na janela de *Unsteady Flow Analysis*, clica-se em *Compute*, para abrir uma janela por onde você pode acompanhar como está o processamento da simulação, bem como pausá-la ou pará-la. Ao clicar em *Compute*, pode aparecer uma janela acusando possíveis erros na criação do modelo, logo, deve-se corrigi-los antes de poder computar novamente o modelo, se não ele não iniciará a simulação. Caso não possua erros graves no início ou durante o processo de simulação, a rodada será finalizada com sucesso (Figura 4.46).

Figura 4.46 – Janela de processamento após a simulação ter sido feita com sucesso.



Fonte: Próprios autores.

4.8.5.1 Validação do modelo

Para verificar se o presente modelo é representativo da realidade, este deve resultar em uma mancha de inundação que já se tem conhecimento. Neste caso, foi verificada a correspondência com a mancha obtida por Giglio [2010] para evento de outubro/novembro 2004. Assim, iremos comparar os dados observados com os que simulamos (Figura 4.47). É possível adicionar os dados observados no próprio HEC-RAS, no *RASMapper* em *Features*, ou exportar os dados do HEC-RAS para um GIS a partir do (*Inundation Boundary*), em que a sua obtenção será apresentada no item posterior deste documento.

Fragmentado a comparação em 3 partes para facilitar a visualização e ser possível comentar o que aconteceu em cada uma das partes.

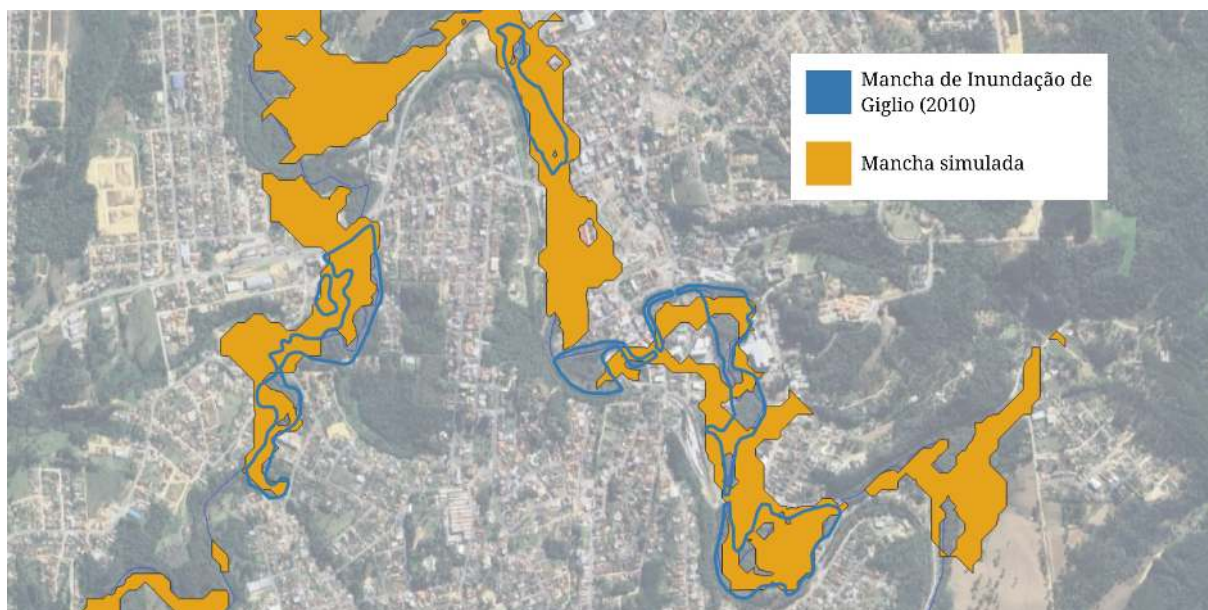
Nesta primeira figura (Figura 4.48) no lado direito, principalmente, existem muitas partes onde a mancha de inundação simulada não alcançou a mancha de inundação observada. Assim existe uma região que não está coerente, mas ainda, sim, consideraremos como aceitável.

Na Figura 4.49, na parte superior, temos pouquíssimas áreas onde foram representadas bem, portanto, o modelo mostrou-se ineficaz nesta região. Entretanto, na região inferior, foi observada uma maior concordância entre o simulado e o observado.

E na Figura 4.50 podemos considerar que a nossa mancha foi muito bem representativa comparando com a da Giglio [2010].

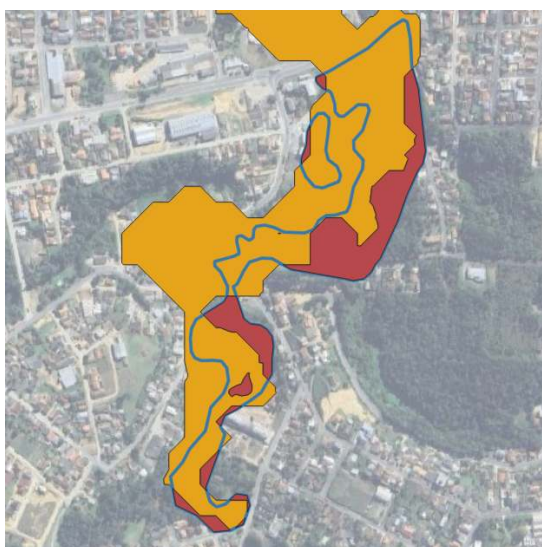
Para um trabalho técnico este mapa seria considerado ineficaz e seria necessário refazê-lo.

Figura 4.47 – Comparando os mapas.



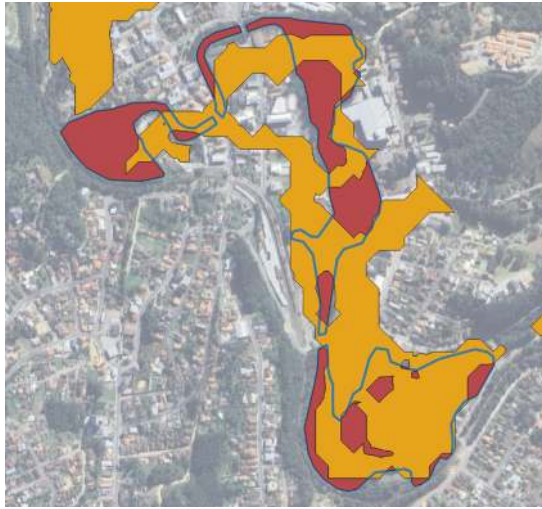
Fonte: Próprios autores.

Figura 4.48 – Diferenças entre os mapas, parte 1. Azul: Mancha de Giglio [2010]; Laranja: Mancha simulada; Vermelho: dados que não se apresentam na mancha de inundação simulada.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.49 – Diferenças entre os mapas. Parte 2.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.50 – Diferenças entre os mapas. Parte 3.



Fonte: Próprios autores.

Algumas das estratégias para o aperfeiçoamento é modificando parâmetros que foram adotados, como, por exemplo: alteração do coeficiente de Manning, modificação da batimetria do canal, obtenção de um MDT mais adequado e atual, entre outros.

4.8.6 Obtenção das informações para o MPI

4.8.6.1 Tempos de Retornos

Após a validação do modelo, utilizaremos faremos o procedimento para obtermos os mapas de profundidade e velocidade de inundação para obter os mapas de perigo de inundação. Assim, iniciaremos o processo a partir dos valores obtidos anteriormente no HEC-HMS (Figura 4.51) com cada Tempo de Retorno (TR). No HEC-RAS, apenas alteraremos os dados em *Flow Hydrography* utilizando os dados do HEC-HMS (Figura 4.38). Devemos fazer uma rodada para cada período de retorno.

Figura 4.51 – Dados obtidos no HEC-HMS.

TR5				TR20				TR100			
horas	Serrinha	Negrinho	Bugres	horas	Serrinha	Negrinho	Bugres	horas	Serrinha	Negrinho	Bugres
1	0.5	3.3	1.4	1	0.5	3.3	1.4	1	0.5	3.3	1.4
2	0.5	3.3	1.4	2	0.5	3.3	1.4	2	0.5	3.3	1.4
3	0.5	3.2	1.4	3	0.5	3.2	1.4	3	0.5	3.2	1.4
4	0.5	3.2	1.4	4	0.5	3.2	1.4	4	0.5	3.2	1.4
5	0.5	3.2	1.3	5	0.5	3.2	1.3	5	0.5	3.2	1.3
6	0.5	3.1	1.3	6	0.5	3.1	1.3	6	0.5	3.1	1.3
7	0.5	3.1	1.3	7	0.5	3.1	1.3	7	0.5	3.1	1.3
8	0.5	3	1.3	8	0.5	3	1.3	8	0.5	3	1.3
9	0.4	3	1.3	9	0.4	3	1.3	9	0.4	3	1.3
10	0.4	3	1.3	10	0.4	3	1.3	10	0.4	3	1.3
11	0.4	2.9	1.2	11	0.4	2.9	1.2	11	0.4	2.9	1.2
12	0.4	2.9	1.2	12	0.4	2.9	1.2	12	0.4	2.9	1.2
13	0.4	2.8	1.2	13	0.4	2.8	1.2	13	0.4	2.8	1.2
14	0.4	2.8	1.2	14	0.4	2.8	1.2	14	0.4	2.8	1.2
15	0.4	2.8	1.2	15	0.4	2.8	1.2	15	0.4	2.8	1.2
16	0.4	2.7	1.2	16	0.4	2.7	1.2	16	0.4	2.7	1.2
17	0.4	2.7	1.1	17	0.4	2.7	1.1	17	0.5	2.7	1.2
18	0.4	2.7	1.1	18	0.4	2.7	1.1	18	0.5	2.7	1.1
19	0.4	2.6	1.1	19	0.4	2.6	1.1	19	0.5	2.7	1.1
20	0.4	2.6	1.1	20	0.4	2.6	1.1	20	0.5	2.7	1.1
21	0.4	2.6	1.1	21	0.4	2.6	1.1	21	0.6	2.8	1.1
22	0.4	2.5	1.1	22	0.4	2.5	1.1	22	0.6	2.9	1.1
23	0.4	2.5	1.1	23	0.4	2.5	1.1	23	0.7	3	1.1
24	0.4	2.5	1.1	24	0.4	2.5	1.1	24	0.8	3.1	1.2
25	0.4	2.4	1	25	0.5	2.5	1	25	0.8	3.3	1.2
26	0.4	2.4	1	26	0.5	2.5	1	26	0.9	3.5	1.2
27	0.4	2.4	1	27	0.5	2.5	1	27	1.1	3.8	1.3
28	0.4	2.4	1	28	0.6	2.6	1	28	1.2	4.1	1.3
29	0.4	2.3	1	29	0.6	2.7	1	29	1.3	4.4	1.4
30	0.4	2.3	1	30	0.7	2.8	1	30	1.5	4.8	1.5
31	0.5	2.4	1	31	0.8	3	1.1	31	1.7	5.3	1.6
32	0.5	2.4	1	32	0.8	3.2	1.1	32	1.9	5.8	1.6
33	0.5	2.4	1	33	0.9	3.4	1.1	33	2.1	6.4	1.9
34	0.6	2.5	1	34	1	3.6	1.2	34	2.3	7	2.1
35	0.6	2.6	1	35	1.2	3.9	1.2	35	2.6	7.6	2.4

Fonte: Próprios autores.

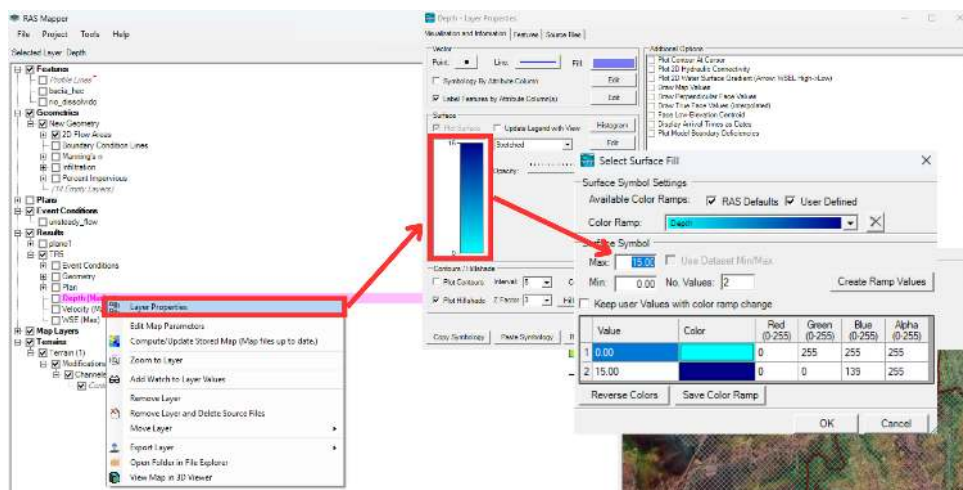
4.8.7 Analisando os resultados

O *RAS Mapper* é uma ótima ferramenta para analisar os resultados, possuindo diversas opções de apresentação de seus resultados e exportação, além de sua visualização ser sobre o terreno adicionado no início da geometria. Assim, tem-se facilidade de entendimento e análise de diversos tipos de resultados.

Para isso, abre-se o *RAS Mapper*. Após ter rodado o processamento, aparecerá no *Mapper* as opções na aba *Results*, clicando no ícone de "+" ao lado do nome do seu plano de processamento (ou pode estar apenas escrito o *short ID* ao invés do nome), abrem-se as opções de camadas de resultados para se visualizar. Clicando na caixa vazia ao lado da camada que se deseja ver, o programa fará com que este tipo de resultado seja visível no mapa. Clicando sobre a camada, permite-se acessar algumas configurações de visualização na aba superior, como: selecionar um momento específico simulado; mostrar os valores máximos ou mínimos encontrados para cada célula dentro do período simulado; mostrar uma animação com o sentido do fluxo; ou, até mesmo, colocar setas indicando o sentido da velocidade do fluido em cada parte.

No mais, para editar as escalas e cores do resultado apresentado, clica-se com o botão direito do *mouse* sobre uma das camadas dos resultados e seleciona-se *Layer Properties* (Figura 4.52). Além disso, existem outras opções abaixo de *Layer Properties*, tanto para mover esta camada em relação as outras ou até para removê-la.

Figura 4.52 – Janela para alterar as *Layer Properties*.

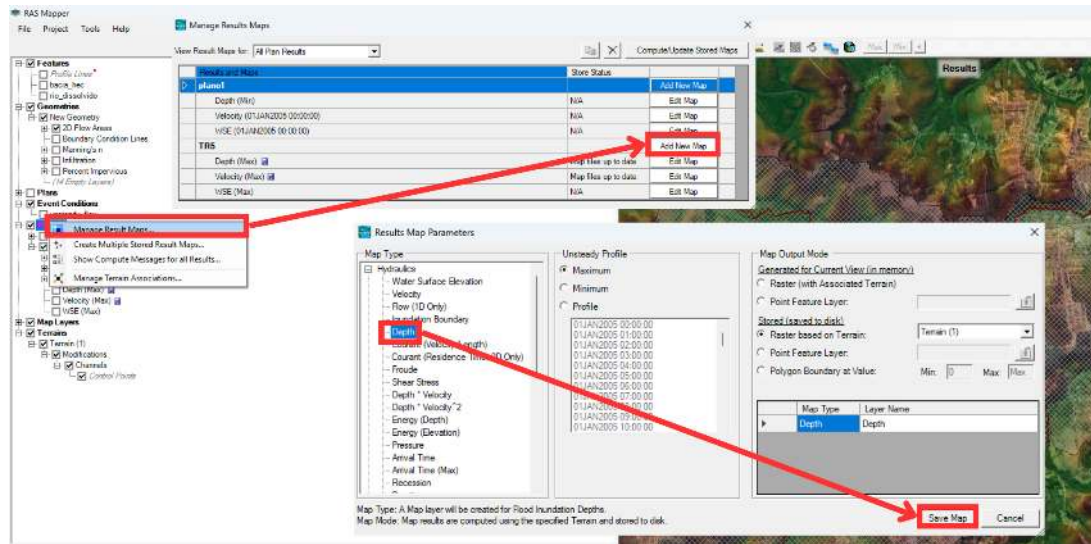


Fonte: Próprios autores.

Para adicionar outras camadas com outros tipos de resultados, clica-se com o botão direito sobre *Results* » *Manage Result Maps...* » *Add New Map* » "+" » *Hydraulics* ou *Additional 2D Variables*, que abrirá uma janela onde se pode selecionar o tipo de resultado que se deseja mostrar nessa nova camada. Depois de configurar o que se deseja, clica-se em "Add Map" e a camada será adicionada, mas para ela aparecer deve-se computá-la (Figura 4.53). Para isso, na aba *Results* no *RAS Mapper*, clica-se com o botão direito do *mouse* sobre a camada inserida e seleciona-se a opção *Compute/Update Stored Map (Map files up to date.)*, (vide a Figura

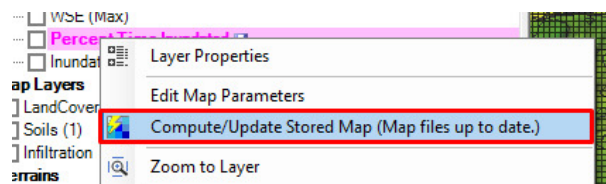
4.54). Feito o processamento pelo sistema, já será possível visualizar a nova camada no mapa. O arquivo também ficará gravado na pasta do HEC-RAS como arquivo *raster* ou *shapefile*, podendo ser utilizados em programas GIS.

Figura 4.53 – Janela *Add New Results Map Layer*.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.54 – Selecionando a opção *Compute/Update Stored Map (Map files up to date.)*.

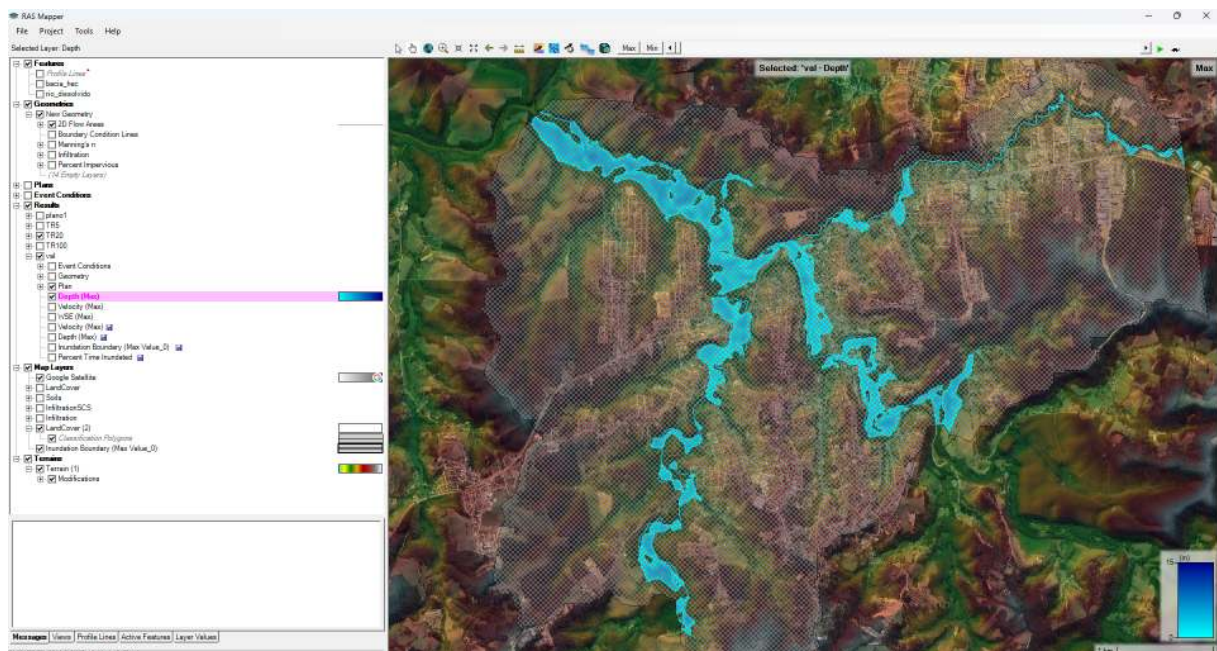


Fonte: Próprios autores.

Algumas camadas interessantes para a análise de resultados são: *Depth*, *Velocity*, *Inundation Boundary* e *Percent Time Inundated*, e serão explanadas a seguir.

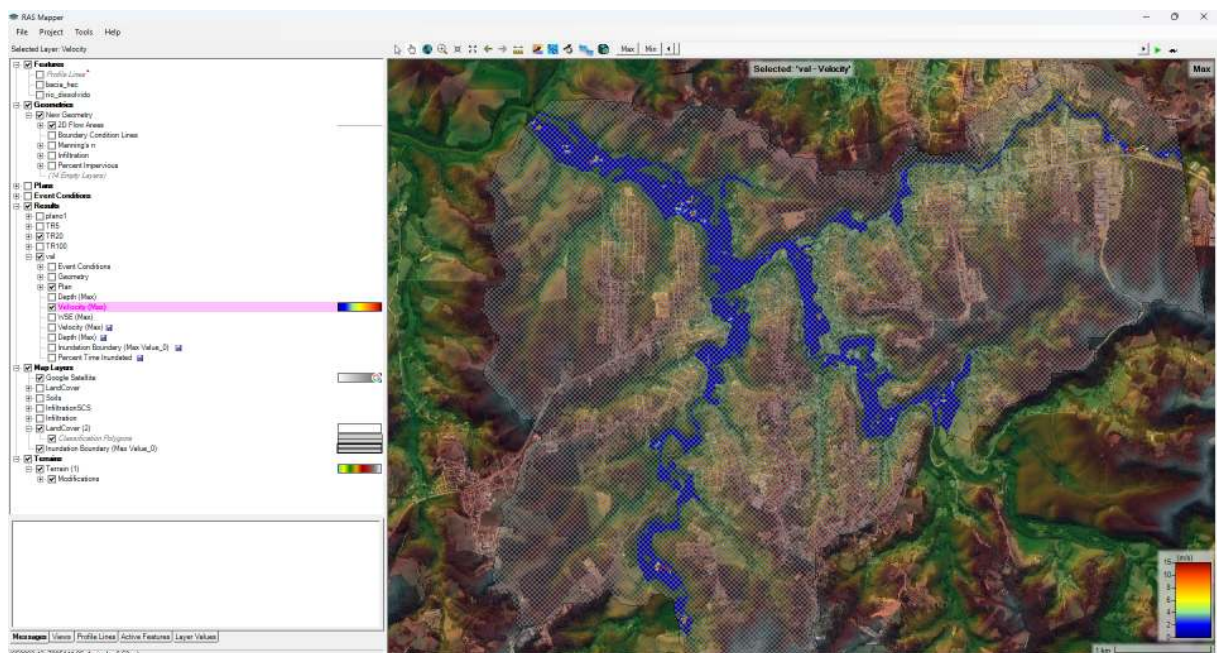
- Em *Depth*, é possível ver a profundidade da água em cada ponto, sendo interessante para analisar os locais com mais água retida (Figura 4.55).
- *Velocity* nos traz a velocidade em cada ponto, podendo assim ver qual partes do rio estão com velocidades muito elevadas (Figura 4.56).

Figura 4.55 – Visualização dos resultados de profundidade do rio.



Fonte: Próprios autores.

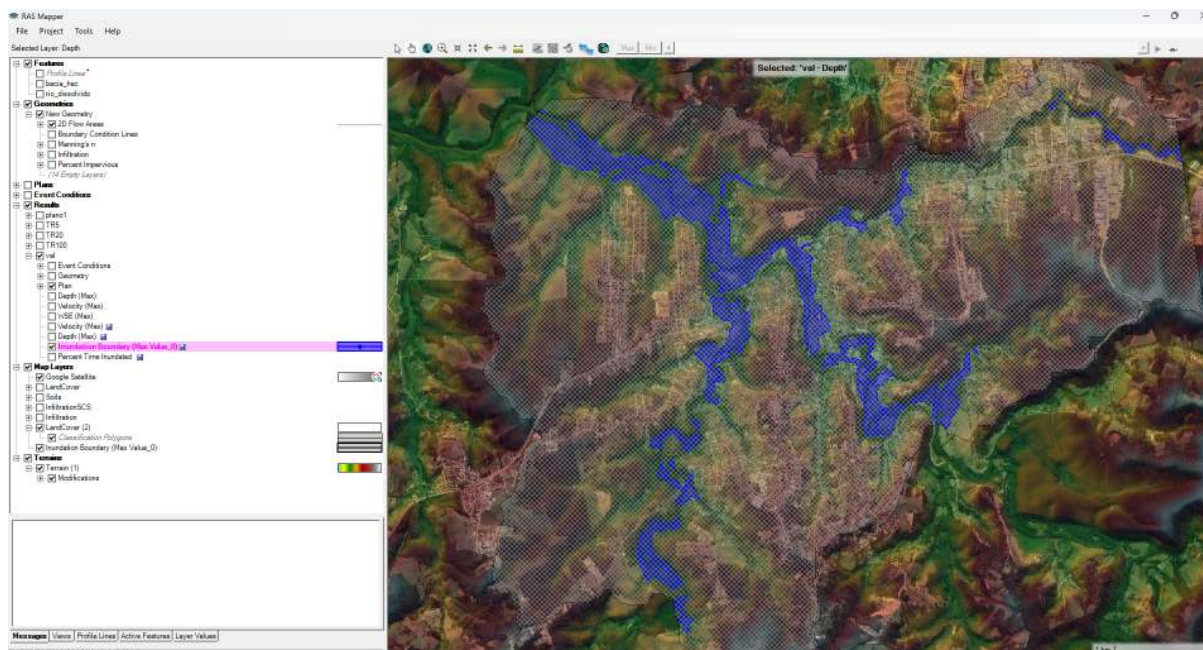
Figura 4.56 – Visualizando os resultados no RAS Mapper (velocidade).



Fonte: Próprios autores.

- *Inundation Boundary* traça a partir de um arquivo vetorial até aonde a água foi em determinado tempo, no seu mínimo, ou no seu máximo (Figura 4.57).

Figura 4.57 – Visualização dos resultados de inundação das bordas do rio.



Fonte: Próprios autores.

- *Percent Time Inundated* mostra a porcentagem de tempo que cada região passou molhada, sendo interessante para se analisar as áreas que são afetadas de forma mais prolongadas a uma inundação (Figura 4.58).

Para **simulações 1D**, ainda é possível analisar mais resultados. Dentro destes ícones

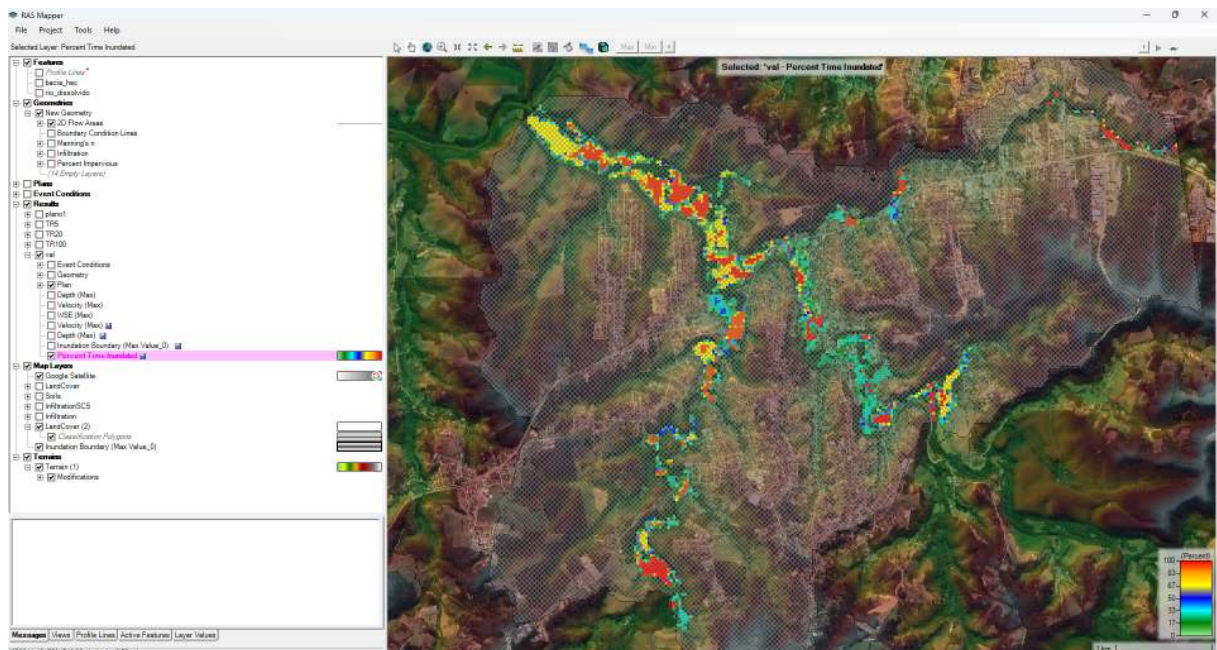


é possível ver o comportamento um conjunto de sessões ao longo da simulação, alguns gráficos que relacionam informações obtidas na simulação e tabelas de informações do seu modelo e da simulação.

Exportaremos esses *rasters* para o QGIS para criarmos os mapas de perigo, assim precisamos salvá-los. Com o botão direito do *mouse* em *Results » Manage Result Maps...*, iremos nas camadas que quisermos exportar uma por uma. Com a camada escolhida iremos em *Edit Map » Maximum » Raster based on Terrain » Save Map » Compute/Uptade Stored Maps*, como mostra na Figura 4.59.

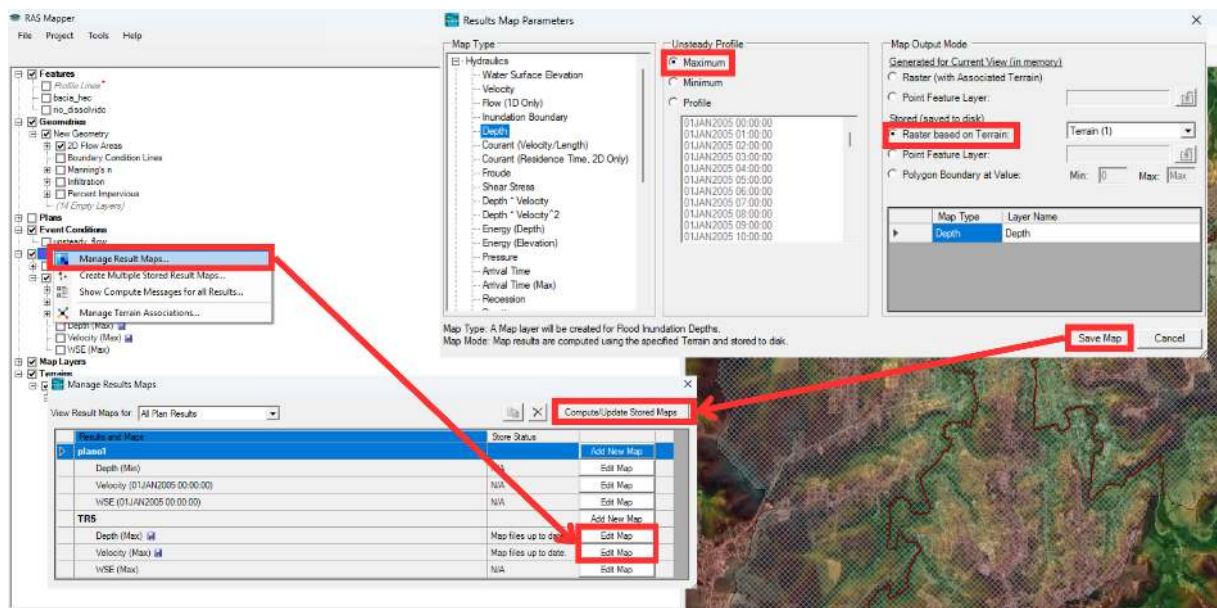
Os mapas de **velocidade máxima** e **profundidade máxima** deverão ser obtidos para os TRs de 5, 20 e 100 anos. Estes mapas serão processados para a criação dos mapas de perigo de inundação. Perceba que estes arquivos se encontraram em uma pasta dentro do diretório de onde o HEC-RAS foi salvo.

Figura 4.58 – Visualização dos resultados do percentual de tempo inundado.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4.59 – Janela Add New Results Map Layer.



Fonte: Próprios autores.

5 MAPA DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

Obtenção do MPI a partir das informações obtidas ao longo do curso.

O mapa de inundação pode ser criado de duas maneiras diferentes, através da confecção de uma mancha de inundação a partir de dados observados da inundação ou através da modelagem hidrodinâmica. O primeiro método fornece um mapa com mais exatidão, porém é de difícil criação, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundação [Giglio and Kobiyama \[2011\]](#). Ainda, pode-se recuperar os dados das inundações através de registros deste evento, ou seja, além da coleta em campo, estes dados também podem ser recuperados através de fotografias, vídeos, jornais ou declaração de pessoas presentes no evento. Outro ponto negativo deste método é a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos.

O segundo método, referente à modelagem hidrodinâmica, utiliza modelos físicos ou matemáticos para a criação dos mapas de inundação. Na metodologia utilizada pelo presente trabalho, este mapa é resultado da modelagem hidrodinâmica. De qualquer forma, para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, é recomendada a utilização cotas do evento de inundação.

O mapa de inundação sempre está relacionado a um período de retorno que é utilizado diretamente na confecção do mapa de perigo. A qualidade do mapa depende da qualidade dos procedimentos que o antecedem, e é muito sensível ao modelo digital de terreno.

5.1 MAPA DE PERIGO DE INUNDAÇÃO

O mapa de perigo é o produto final desta metodologia. Para sua criação é necessário quantificar este perigo, pois existem diferentes níveis de perigo que podem causar diferentes tipos de dano (tabela [5.1](#)).

[PREVENE \[2001\]](#) propôs uma caracterização do mapa de perigo de inundação que estabelece três zonas para identificar os diferentes níveis de perigo, que variam com o período de retorno. Desta forma, o mapa de perigo é uma função de frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo).

Tabela 5.1 – Definição do Perigo de Inundação

Nível de Perigo	Cor do Mapa	Descrição
Alto (3)	Vermelho	As pessoas estão em perigo, tanto dentro quanto fora de suas casas. As construções estão em alta possibilidade de serem destruídas.
Médio (2)	Laranja	As pessoas correm possibilidade de fatalidades fora de suas casas. Construções talvez sofram danos e podem ser destruídas.
Baixo (1)	Amarelo	A possibilidade de fatalidades é baixa ou inexistente. Construções podem sofrer danos.

5.1.1 Índice e Nível de Perigo

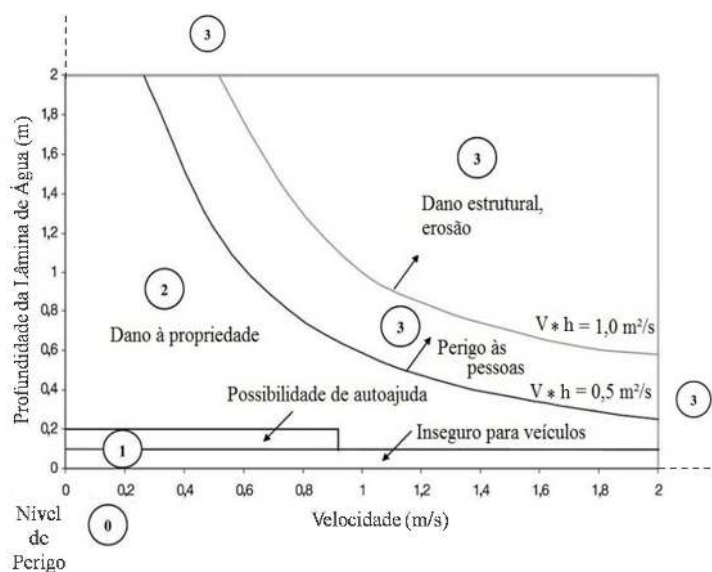
O Índice de Perigo (IP) proposto por [Stephenson \[2002\]](#) é expresso por:

$$IP = h \cdot v, \quad (5.1)$$

onde h é a profundidade de inundação em metros e v é a velocidade do escoamento em m/s . Percebe-se que o IP é expressado pela vazão unitária. Este índice está ligado diretamente à energia do escoamento, ou seja, ao seu potencial destrutivo.

O IP foi inicialmente criado para indicar qual o local mais adequado para o desenvolvimento urbano. Utilizando esse índice, [Stephenson \[2002\]](#) propôs diferentes tipos de perigos (figura 5.1), que pode ser relacionado aos níveis apresentados na tabela 5.1.

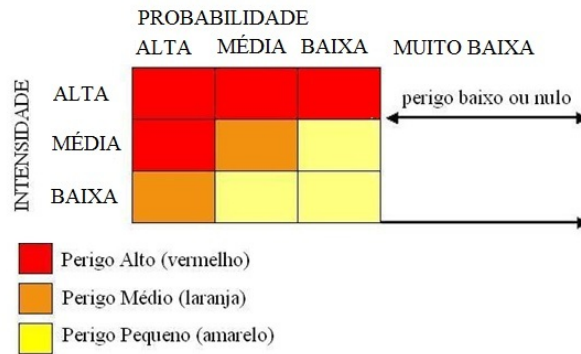
Figura 5.1 – Diagrama do perigo de inundação.



Fonte: Adaptação e modificação de [Stephenson \[2002\]](#).

Eventos mais severos, com maior profundidade da lâmina da água e velocidade, ocorrem com menor frequência. Pequenos eventos de inundação são mais frequentes, porém possuem um menor potencial destrutivo. Desta forma, o mapa de perigo de inundação é elaborado como a combinação de intensidade e período de retorno de diversos mapas de inundação (figura 5.2).

Figura 5.2 – Níveis de perigo discretizados.



Fonte: PREVENE [2001]

Os valores do período de retorno podem ser alterados conforme o interesse do estudo. Embora PREVENE [2001] adote períodos de retorno de 10, 100 e 500 anos, o presente trabalho adota os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos para adequar o método à realidade brasileira, onde precipitações com alta intensidade ocorrem com uma frequência elevada. Assim, modificando a figura 5.2 para a metodologia do presente trabalho obtemos a figura 5.3

Figura 5.3 – Níveis de perigo discretizados adaptado.



Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Criando o Mapa de Perigo

Com a metodologia a pouco apresentada, é possível criar mapas de perigo caso se possua as mapas de profundidade e velocidade das áreas inundadas para os três períodos de retornos diferentes. Observa-se que os períodos extremos, no caso 5 e 100 anos, possuem apenas dois níveis de perigo cada um, laranja e vermelho para o de 5 anos e amarelo e vermelho para o de 100 ano. Com os três mapas de nível de perigo (um para cada período de retorno), se cria um único mapa de perigo, sobrepondo-os. O nível 3 será sobressaliente aos níveis 2 e 1, o nível 2 se sobressairá ao nível 1.

Os mapas obtidos pelo modelo hidrodinâmico podem ser manuseados no programa de geoprocessamento. Para transformar estes mapas em um único mapa de perigo é necessário algum algebrismo. Observando a figura 5.4 se nota que condições diferentes devem ser definidas dependendo do período de retorno do mapa a ser manuseado.

Inicialmente, devemos criar um mapa com os níveis de perigo especificados para cada período de retorno. Assim, siga as instruções a seguir:

- Mapa de perigo para o $TR = 100$ anos: uma única condição é suficiente para definir o nível de perigo em cada célula:

se $V \cdot h \geq 0,5$ então a célula terá o nível de perigo 3, **se não** ela terá o nível de perigo 1.

- Para o mapa com $TR = 5$ anos, são necessárias uma condicional simples e uma condicional dupla para definir o nível de perigo em cada célula:

se $V < 0,9$ e $h < 0,2$ ou se $h < 0,1$ então o nível na célula será 2, **caso contrário** será 3.

- Para o mapa com $TR = 20$ anos, são necessárias duas condicionais simples e uma condicional dupla para definir o nível de perigo em cada célula:

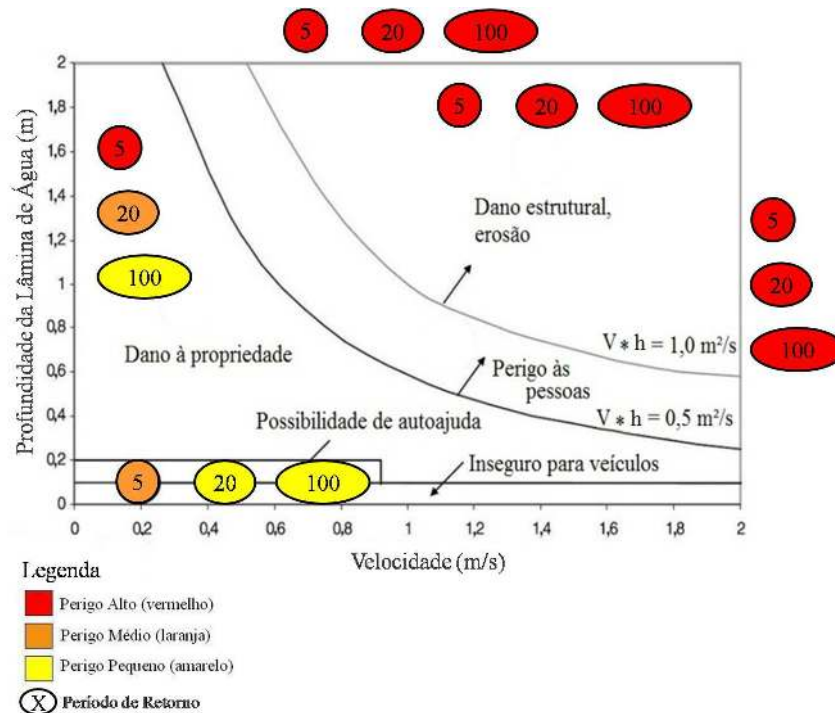
se $V < 0,9$ e $h < 0,2$ ou se $h < 0,1$ então o nível na célula será 1, **caso contrário se $V \cdot h \geq 0,5$ então** a célula terá o nível de perigo 3, **se não** ela terá o nível de perigo 2.

- Ainda para TODOS os casos utiliza-se:

se $V > 2$ ou $h > 2$ então o nível na célula será 3.

Por fim, para criar um único mapa de perigo os mapas criados anteriormente devem ser unidos, de forma que as células com o nível de perigo 3 se sobressaiam as células com nível de perigo 2 ou 1. De forma semelhante, as células com nível de perigo 2 devem sobrepor as com nível de perigo 1. Desta forma o mapa de perigo estará finalizado.

Figura 5.4 – Níveis de perigo para determinado período de retorno.



Fonte: Próprio autor.

5.2 EXEMPLO PRÁTICO

Inserí-los no QGIS os arquivos de *Depth*, *Velocity* e *Depth*Velocity* dos TR's que criamos anteriormente (Figura 4.59). Como temos esses *rasters* para TR5, TR20 e TR100 recomenda-se que renomeie eles adequadamente para não causar problemas futuros, um exemplo seria "Depth_TR5". Com todos os *rasters* inseridos no QGIS iremos na *Raster Calculator*:

- *Raster » Raster Calculator*

Na Calculadora *Raster* criaremos as condicionais:

- Condição 1:

```
("DV_TR100@1" <= 0.5) * 1 + ("DV_TR100@1" > 0.5) * 3
```

- Condição 2:

```
("Velocity_TR5@1" > 0) * 3 - ((( "Velocity_TR5@1" <= 0.9) and  
("Depth_TR5@1" <= 0.2)) or ("Depth_TR5@1" <= 0.1)) * 1
```

- Condição 3:

```
("DV_TR20@1"> 0) * 3 - (((("Velocity_TR20@1"<= 0.9) and
("Depth_TR20@1"<= 0.2)) or "Depth_TR20@1"<= 0.1) * 1 -
("DV_TR20@1"<= 0.5) * 1
```

- Condição 4:

```
((("Depth_TR100@1"> 2) or ("Velocity_TR100@1"> 2)) * 3
```

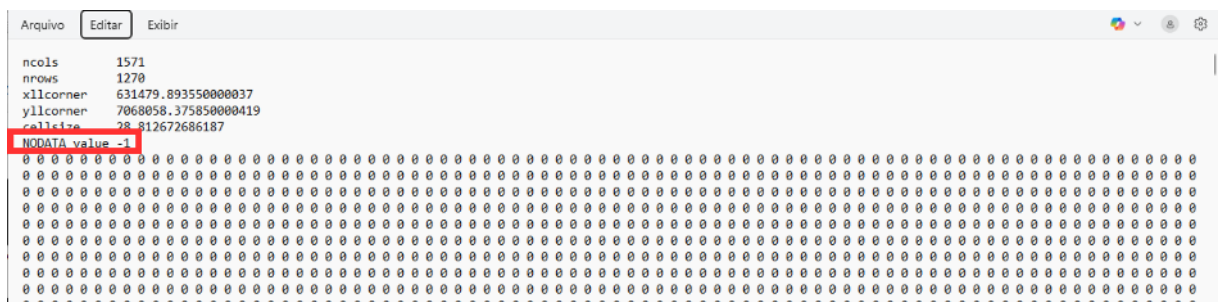
Para as condições 2 e 3 será necessário converter o *raster* para a extensão ".asc". Após, no bloco de notas salva-se o valor do "NODATA_value" e acesse "Editar » Substituir", assim, inserirá o valor copiado substituindo ele por 0. No lugar do "NODATA_value" coloque o valor -1. Este procedimento serve para que na calculadora *raster*, os lugares que não tenham valores válidos possam proporcionar valores válidos e um procedimento lógico.

Figura 5.5 – Bloco de notas do *raster*.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.6 – Valores do *raster* substituídos.



Fonte: Próprio autor.

Feito isso, continuamos na Calculadora *Raster*:

- Condição 5:

```
("Cond4@1">= "Cond3_conv@1") * "Cond4@1"+ ("Cond4@1"<
"Cond3_conv@1") * "Cond3_conv@1"
```

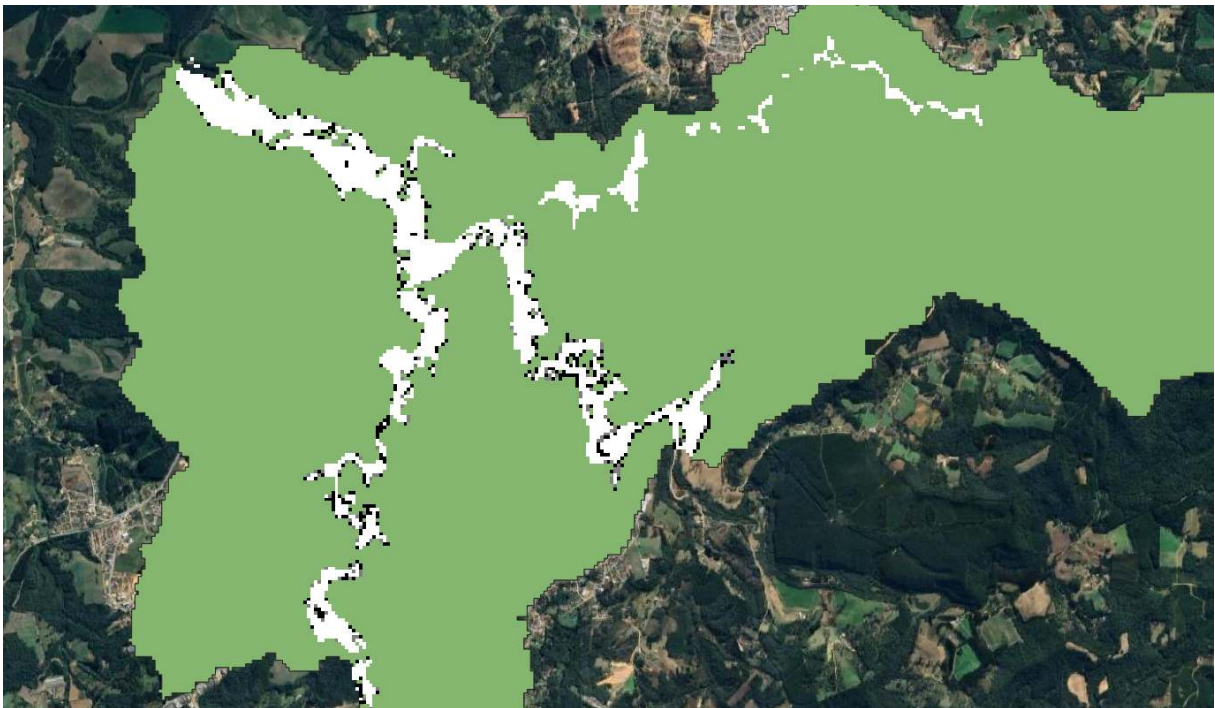
- Condição 6:

```
("Cond2_conv@1">= "Cond1@1") * "Cond2_conv@1"+ ("Cond2_conv@1"<
"Cond1@1") * "Cond1@1"
```

Agora, o último passo, a criação do mapa de inundação:

- ("Cond6@1">= "Cond5@1") * "Cond6@1"+ ("Cond6@1"< "Cond5@1") * "Cond5@1"

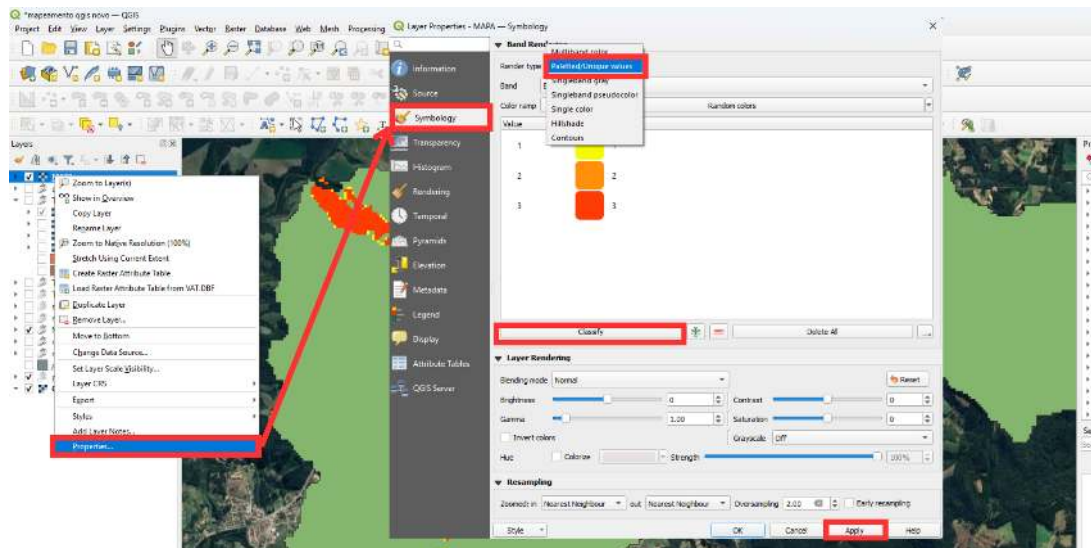
Figura 5.7 – Mapa de Inundação.



Fonte: Próprio autor.

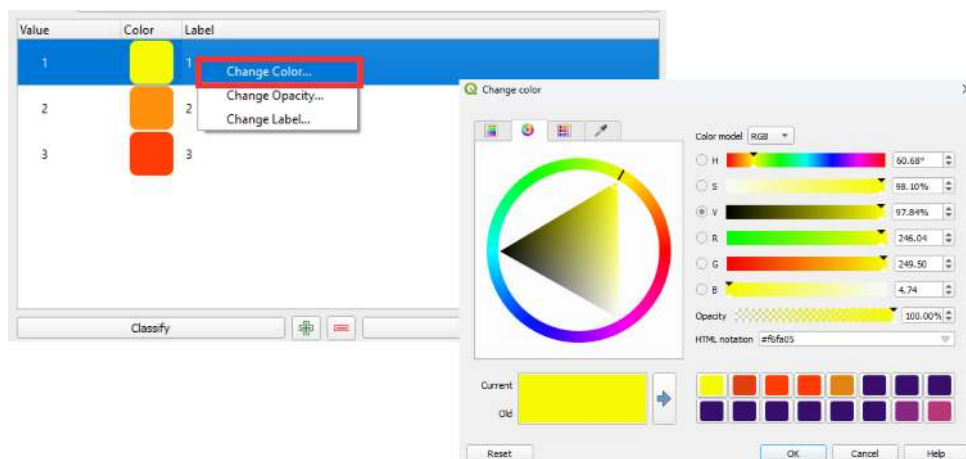
Para um modo de visualização melhor e estética iremos modificar as cores do *raster*. Após clicar com o botão direito *mouse* no mapa que criamos, iremos em "*Properties...* » *Symbology* » *Render Type* » *Paletted/Unique values* » *Classify* onde em *Value* editaremos as cores das células de 1 a 3, com o 1 sendo amarelo, 2 é laranja e 3 é vermelho, para isso com o botão direito *mouse* clique em algum dos números e depois vá em *Change Color* (Figura 5.9). Concluído com todos vá em *Apply*. O valor zero pode-se colocar como "No data value" na aba "Transparency".

Figura 5.8 – Colorindo o Mapa de Inundação.



Fonte: Próprio autor.

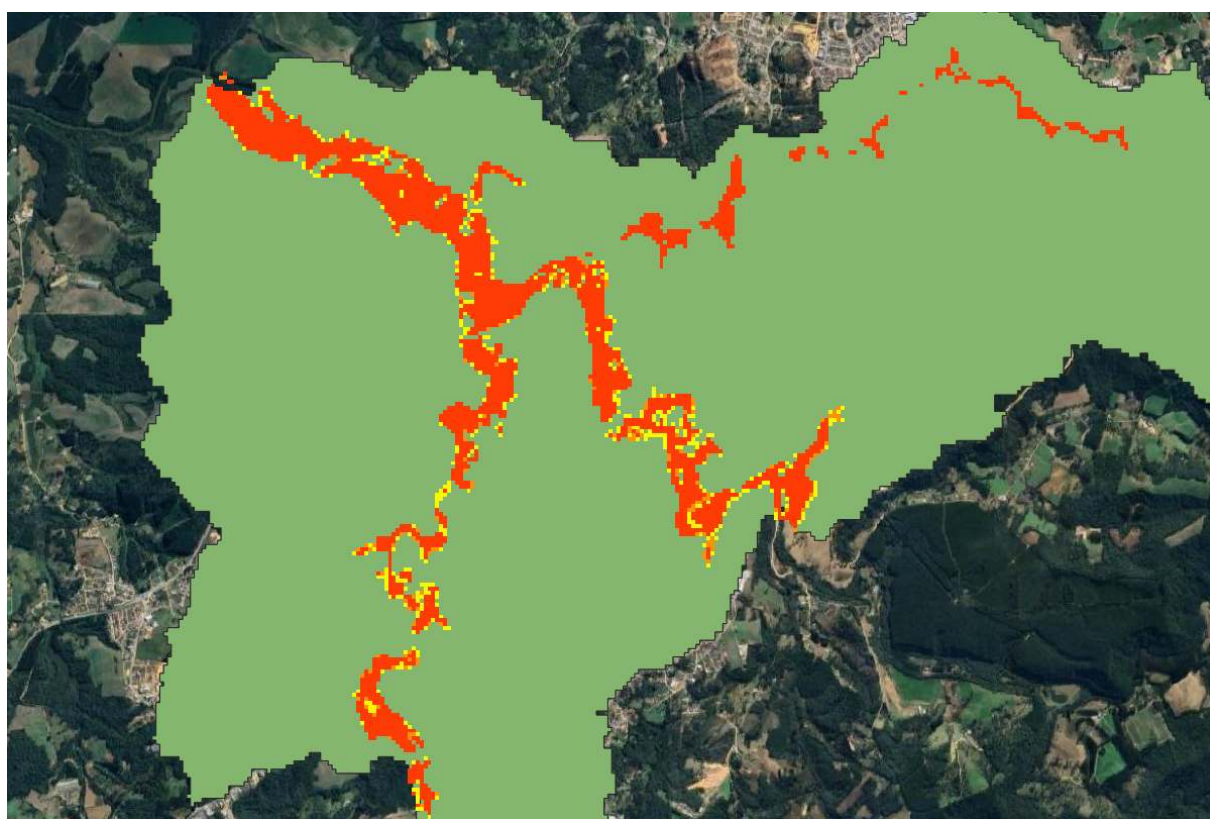
Figura 5.9 – Aba Change Color.



Fonte: Próprio autor.

Após os passos anteriores, temos um mapa que nos possibilita uma melhor visualização e compreensão.

Figura 5.10 – Mapa de Inundação.



Fonte: Próprio autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

FRANCIELE MARIA VANELLI

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

Objetivo do capítulo: reflexões sobre a aplicação do MPI.

A influência dos rios no comportamento dos grupos populacionais é reconhecida ao longo da história, assim como a influência das populações nos rios e no ciclo hidrológico, tanto quantitativa quanto qualitativamente [Koutsoyiannis, 2014, Vogel et al., 2015]. Essas interações entre o ser humano e os fenômenos hidrológicos podem gerar impactos positivos e negativos, como, por exemplo, o transbordamento dos rios pode enriquecer o solo colaborando com o plantio agrícola ou inviabilizar o trânsito de veículos, respectivamente. Portanto, as inundações são fenômenos hidrológicos naturais que podem se tornar desastres quando interagem com condições sociais resultem em impactos negativos ao funcionamento de uma comunidade ou sociedade.

O desastre “natural” não é produto unicamente de uma dimensão natural, mas se constitui de interações mútuas ao longo do tempo e do espaço entre componentes sociais e físicos que desempenham papel importante na definição dos riscos e dos impactos dos desastres [Vanelli, 2023]. As mudanças climáticas e as modificações aceleradas no uso e ocupação do solo tem contribuído para alterações no regime hidrológico resultando no aumento de frequência e intensificação de eventos de inundação e de seca [Brêda et al., 2020, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021] que combinados com a complexidade das sociedades podem amplificar os impactos ou resultar impactos em cascata.

No Brasil, a ocorrência de desastres com danos materiais e perdas de vida, como o da Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, motivou a criação da Política Nacional de Proteção de Defesa Civil (PNPDEC), a Lei Federal nº 12.608/2012 Brasil [2012], visando uma abordagem preventiva ao invés de apenas reativa. Dentre as diretrizes da PNPDEC, destaca-se que a gestão deve contar com a atuação articulada entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios para redução de desastres e apoio às comunidades atingidas; e a participação da sociedade civil. Nesse sentido, as responsabilidades são compartilhadas entre os entes federativos que devem contribuir para o cumprimento dos objetivos da PNPDEC, sendo um deles: promover a autoproteção das comunidades como um comportamento adequado de prevenção e de resposta em situação de desastre Brasil [2012].

A nível municipal, o artigo 8º da referida lei menciona ações associadas a minimização dos “riscos de desastres”, tais como:

- Identificar e mapear as áreas de risco de desastres;

- Promover a fiscalização das áreas de risco de desastre e vedar novas ocupações nessas áreas;
- Vistoriar edificações e áreas de risco e promover, quando for o caso, a intervenção preventiva e a evacuação da população das áreas de alto risco ou das edificações vulneráveis;
- Manter a população informada sobre áreas de risco e ocorrência de eventos extremos, bem como sobre protocolos de prevenção e alerta e sobre as ações emergenciais em circunstâncias de desastres;

Sendo a inundação um fenômeno natural que pode se tornar um desastre, o que são áreas de risco de inundação? O que é risco de inundação? Como identificar e mapear áreas de risco de inundação? Quais informações são necessárias para que as comunidades sejam capazes de se autoprotger? As respostas dessas perguntas são relevantes para que o leitor compreenda como os resultados dessa apostila podem ser aplicados para a elaboração de produtos essenciais ao cumprimento da PNPDEC.

Partimos assim, para a definição de alguns conceitos fundamentais, de acordo com a [United Nations Office for Disaster Risk Reduction \[2017\]](#)

- Risco é definido como a probabilidade de ocorrência de perdas de vidas ou lesões, destruição ou danos materiais decorrentes da interação entre **perigos naturais, vulnerabilidade, exposição e capacidade**.
- Perigo natural se trata de um processo ou fenômeno natural que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos à saúde, danos materiais, perturbação social e econômica ou degradação ambiental.
- Vulnerabilidade se refere às características e condições determinadas por fatores ou processos sociais, econômicos, físicos (infraestrutura) e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, de uma comunidade, de bens ou de sistemas aos impactos negativos de eventos perigosos.
- Exposição se trata da existência de pessoas, infraestruturas, habitações, capacidades produtivas e outros ativos humanos tangíveis em áreas suscetíveis a perigos.
- Capacidade é a combinação de todos os pontos fortes, atributos e recursos disponíveis em uma organização, comunidade ou sociedade para gerir e reduzir riscos de desastres e fortalecer a resiliência. A capacidade pode incluir infraestrutura, instituições, conhecimentos e habilidades humanas, bem como atributos coletivos, como relações sociais, liderança e gestão.

Portanto, o risco pode ser expresso como:

$$R = f(H, V, E, C) \quad (6.1)$$

onde R é o risco, H é o perigo (*hazard*), V é a vulnerabilidade, E é a exposição e C é a capacidade.

Apesar da definição que evidencia o risco como resultado da interação entre a dimensão física (perigo natural) e a dimensão social (vulnerabilidade, exposição e capacidade), não existe um consenso sobre os componentes do risco e, consequentemente, uma metodologia padrão para estimar o risco de forma quantitativa. Assim como, os componentes sociais também são representados de diferentes formas. Abaixo é exemplificada uma metodologia em que o risco foi obtido pelo cruzamento entre mapas de perigo de inundação e mapas de vulnerabilidade.

Moreira et al. [2021] investigaram sobre a quantificação da vulnerabilidade e os resultados denotam a sua obtenção por meio da elaboração de um índice. No Brasil, a maior parte dos estudos revisados por Moreira and Kobiyama [2021] utilizaram dados censitários na escala de setor censitário para elaboração do índice de vulnerabilidade. A revisão sistemática de Moreira et al. [2021] evidenciou os indicadores mais utilizados e avaliou a sensibilidade dos pesos de cada indicador, bem como o efeito de diferentes métodos de normalização, agregação e classificação tendo o município de Maquiné/RS como área de estudo. Na construção do índice de vulnerabilidade, a exposição foi tratada como intrínseca, por meio da inclusão do indicador "densidade populacional".

Vanelli et al. [2023a] adaptou a metodologia de Moreira et al. [2021] para obtenção do mapeamento da vulnerabilidade na área urbana de Rio Negrinho/SC. O produto entre os mapas de perigo de inundação (Monteiro et al. [2023]) e de vulnerabilidade resultou no mapa de risco (Vanelli et al. [2023b]). A exposição foi considerada intrínseca ao índice de vulnerabilidade, no entanto, a a partir do mapa de risco foi analisada a exposição de infraestruturas críticas, tais como escolas, centro de saúde, locais utilizados para abrigos, Estação de Tratamento de Água e de Esgoto, subestações de energia elétrica e postos de trabalho de agentes atuante na resposta ao desastre, como defesa civil, bombeiros e polícia civil, militar e rodoviária. Além disso, Vanelli [2023], integrando métodos e dados quantitativos e qualitativos sob a perspectiva da socio-hidrologia, investigou a capacidade institucional da sociedade de Rio Negrinho/SC lidar com as inundações, avaliando mudanças organizacionais e implantações de medidas estruturais e não-estruturais ao longo do tempo. Nesse estudo de caso, o mapeamento de risco a inundação forneceu dados que podem nortear decisões de uso e ocupação do solo, embasar estudos de mobilidade urbana em situações de inundações, bem como incentivar não somente instituições, mas também aos moradores, a buscarem a elaboração de planos de ação para autoproteção, visando aumentar a preparação da população.

Por fim, reitera-se que as técnicas apresentadas nessa apostila para mapear áreas de inundações com uso de HEC-HMS e HEC-RAS são ferramentas para o mapeamento de áreas de perigo de inundação. Caso o objetivo dos leitores seja a elaboração de mapas de risco de inundação,

é necessário ir além e elaborar mapas de vulnerabilidade (e exposição e capacidade) para que então a partir desses mapeamentos de componentes físicos e sociais seja possível a obtenção do mapeamento de risco. A PNPDEC exige que cada município tenha mapas de risco de desastres, porém ainda não existe uma metodologia consensual, e isso pode ser um grande desafio para a comunidade brasileira.

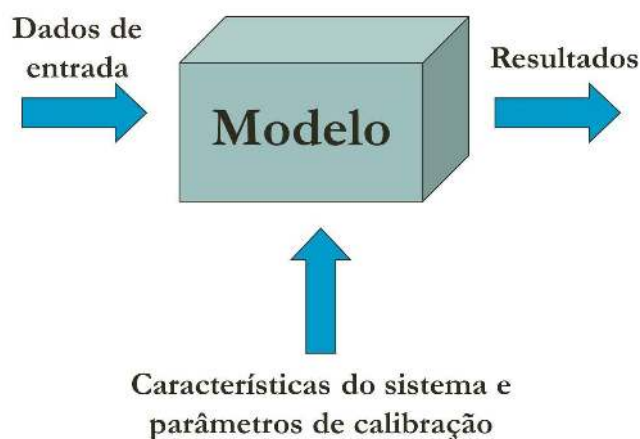
Por fim, os autores do presente trabalho acreditam que o mesmo pode contribuir para o desenvolvimento das comunidades tanto local quanto científica. Pretendendo melhorar este trabalho, os autores esperam receber comentários críticos em relação ao conteúdo do texto que podem ser enviados para o e-mail: *leonardo.monteiro@udesc.br*.

APÊNDICE A – NOÇÕES DE MODELAGEM

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

O que é a modelagem? No âmbito científico das ciências exatas, a modelagem é uma **tentativa** de representar a realidade, relacionando algo conhecido (dados de entrada e características do sistema e parâmetros) a algo que se quer conhecer (dados de saída ou resultados) (figura A.1). Em outra palavra, modelar é a ação de criar um modelo, e o modelo pode ser considerado um sistema simplificado obtido para a tentativa de representar a realidade.

Figura A.1 – Representação esquemática de um modelo.



Fonte: Próprio autor.

Os modelos são aplicados para diversas ocasiões, como no planejamento de cidades, no projeto de grandes construções, na avaliação da operação de mecanismos, e, amplamente, na pesquisa científica. Nas mais diversas engenharias, na física, na matemática, na química, na medicina, na biologia e em outras diversas áreas da ciência a modelagem é utilizada, ou para auxílio de alguma atividade, ou como o próprio fim.

A.1 TIPOS

Dentre as diversas classificações dos modelos, podem dividir eles em tipos, onde os principais são:

Modelo Físico - representa os fenômenos de interesse geralmente em escala reduzida (reservatório, barragem, eclusas ...). Ao se trabalhar em escala reduzida é necessário realizar o procedimento de análises dimensionais e de semelhança do problema em questão, que permita

efetuar a conversão da escala mantendo os padrões do fenômeno de interesse. Os modelos físicos são muito mais comuns em hidrodinâmica do que em hidrologia, pois em hidrologia existe a necessidade de simular uma parte importante do ciclo hidrológico, enquanto que em hidrodinâmica se simula o comportamento do fluido para uma situação específica.

Modelo Análogo - parte do pressuposto de que as características a serem analisadas de um determinado fenômeno podem ser obtidas ao se analisar outro fenômeno, que muitas vezes não possui semelhança física direta (circuitos elétricos podem ser elaborados para representar analogias com circuitos hidráulicos superficiais e subsuperficiais). Modelos análogos são utilizados quando se tem interesse em um fenômeno complexo ou de difícil obtenção de dados que é de alguma forma semelhante a outro fenômeno, que por sua vez é mais simples, ou mais fácil de se trabalhar.

Modelo Matemático - representa fenômenos e processos por meio de equações que os descrevem matematicamente. A representação dos processos pode possuir uma abordagem física, física e estatística ou somente estatística.

Modelo Numérico - baseado em modelos matemáticos, utilizando aproximações numéricas, representam as derivadas e integrais discretizadamente. Este artifício é utilizado para problemas que, atualmente, são muito difíceis ou até impossíveis de serem resolvidos analiticamente. Todo modelo número é um modelo matemático.

Em recursos hídricos, os modelos numéricos são, em sua maioria, modelos hidrodinâmicos que simulam o escoamento da água (figura A.2). No caso da hidrologia para casos mais simplificados, trabalha-se muito pouco com derivadas e integrais e, normalmente, estes modelos são apenas modelos matemáticos. Hoje em dia, já existem diversos modelos hidrológicos que também são numéricos, entretanto são utilizados para casos mais complexos.

Figura A.2 – Visualização da discretização numérica de um canal.



Fonte: Próprio autor.

Para dar continuidade ao tema, a partir daqui, focaremos apenas à modelagem matemática e numérica e principalmente na modelagem hidrológica e hidrodinâmica.

A.2 CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DE UM MODELO

Antes de se adotar um modelo, devemos saber **quais são os resultados que queremos obter**. Na *modelagem hidrológica*, podemos obter a intensidade de precipitação para uma determinada área, a vazão fornecida pela exutória de uma bacia depois de uma tempestade, o fluxo de água subterrâneo, entre outros. Na *modelagem hidrodinâmica*, podemos ter interesse na velocidade do escoamento em determinado local, no nível da água, na tensão de cisalhamento, entre outros. São diversos os resultados possíveis e devemos estudar com empenho para entender as ciências para compreender qual abordagem devemos seguir para resolver nossos problemas.

Além de se saber que tipo de dado que desejamos obter, também devemos saber quais as suas características como a precisão, o intervalo de tempo e a discretização espacial. Como exemplo, temos os dados de vazão de uma bacia medidos em um exutório. O exutório é visto como um dado pontual, sem discretização espacial.

Caso esta bacia seja pequena, muitas vezes, dados como a variação temporal de um dia (dados diários) não são suficientes para detalhar o hidrograma adequadamente, porém, para bacias grandes a variação diária pode ser suficiente para tal tarefa. Entendemos, neste exemplo, que a definição de bacia pequena ou grande está intimamente ligada ao tempo de resposta da bacia aos fenômenos que provocam a variação da vazão. No caso de bacias costeiras, mesmo que elas sejam muito grandes, elas sofrem com o feito de maré que possui variações expressivas no ciclo de aproximadamente 12 horas, pela maré astronômica. Nestes casos, claramente precisamos de uma análise de intervalo temporal mais detalhada.

Ao selecionar um modelo, devemos nos atentar ao esforço, tanto na obtenção de dados detalhados quanto no processamento computacional, que uma simulação mais detalhada requer. As seguintes perguntas devem ser respondidas: Estes custos auxiliarão na obtenção dos resultados desejados, sem inviabilizar o estudo?; Resultados adequados podem ser obtidos com modelos mais simples ou com dados menos detalhados?

Nunca se deve esquecer as hipóteses nas quais o modelo é baseado, suas simplificações, e, consequentemente, as condições nas quais ele pode ser utilizado. Não se deve ajustar o problema ao modelo, mas sim selecionar um modelo que seja adequado ao problema. Assim, fica claro que a escolha de um modelo para resolver um problema deve ser feita por um especialista e caso tenhamos dificuldades, devemos buscar os especialistas da área.

A modelagem possui limites de aplicação, muitas vezes ligadas a simplificações matemáticas ou falta de conhecimento da natureza. As limitações do modelo também podem estar ligadas aos operadores do modelo, pois estes podem não ter o conhecimento necessário para a sua correta aplicação.

Adquirir dados de qualidade talvez seja um dos grandes dificultadores na aplicação de modelos práticos. A precisão e a exatidão dos resultados de uma simulação estão intimamente ligadas à qualidade dos dados de entrada. Logo, para um modelo utilizado adequadamente, a

qualidade dos resultados é proporcional a qualidade dos dados de entrada.

A.3 TIPOS DE DADOS NA MODELAGEM

Para a realização da modelagem computacional são necessários os dados de entrada. Estes dados podem ser separados em três tipos:

- Dado de campo: Aquele que o próprio pesquisador ou sua equipe adquire no local de estudo, utilizando equipamentos ou por observação. Também pode ser chamado de dado com fonte primária;
- Dado estimado: Aquele que é obtido utilizando deduções matemáticas que podem ser baseadas em outros dados ou hipóteses. Também denominado de dado calculado;
- Dado adquirido: É o dado adquirido de outras fontes sem serem as descritas nos itens anteriores, normalmente comprados ou cedidos por órgãos governamentais, empresas, universidades, pessoas físicas, entre outros. Também pode ser chamado de dado com fonte secundária.

Os dados de campo possuem maior confiabilidade, porém quando difíceis ou impossíveis de serem obtidos, se utiliza os dados estimados ou adquiridos.

A.4 CALIBRAÇÃO

A calibração é um procedimento de otimização utilizado para buscar a melhor solução do modelo para representar determinado fenômeno. Assim, a otimização busca o valor de um ou mais parâmetros, que proporcionem o melhor resultado, este obtido pela comparação do resultado calculado e de um resultado observado (medido). Só podemos fazer a calibração se conhecemos qual o resultado de saída desejado para o caso simulado.

A calibração pode ser realizada de forma manual ou automática utilizando um modelo de otimização. Para verificar se a calibração teve sucesso, indicadores de desempenho como os coeficientes de R , R^2 e Nash-Sutcliffe podem ser utilizados. O melhor indicador de desempenho depende de caso a caso.

Normalmente, adotamos uma função objetivo que identifica a similaridade entre os dados simulados e os dados observados. Existem diversas funções objetivo e indicadores de desempenho e suas formulações e aplicações são detalhadas no Capítulo 4.

Alguns cuidados devem ser tomados ao se calibrar um modelo. Apenas os valores dos parâmetros que se tem menos confiança devem ser modificados em busca do resultado otimizado. De uma forma geral, os *dados de campo* não devem ser modificados, enquanto que os *dados estimados*, que normalmente são os mais incertos, possuem prioridade a serem os parâmetros

modificados para a otimização. Caso a calibração não apresente os resultados otimizados desejados, devemos considerar a mudança o modelo utilizado.

A.5 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Testes de verificação são necessários para identificar se a implementação de um modelo matemático foi realizada de forma coerente. A verificação avalia se as formulações matemáticas e numéricas foram aplicadas corretamente, ou seja, se o código é consistente. Os testes de verificação são muito comuns para desenvolvedores de códigos. Já, os testes de validação são necessários para avaliar se a teoria que envolve as equações aplicadas são adequadas para um fenômeno específico. Então, a validação avalia a exatidão do resultado de um modelo, baseando-se na comparação entre os resultados computacionais e os dados experimentais ou observados. Sendo assim, verificação e validação são processos primários para quantificar e qualificar a precisão e a exatidão dos resultados computacionais de determinado código.

[Fortuna \[2010\]](#) menciona que a verificação determina se o modelo, representado por equações, parâmetros e métodos numéricos adotados, corresponde a sua descrição conceitual, isto é, se o modelo está corretamente implementado. Os resultados fornecidos pela implementação do modelo são comparados a outras soluções, consideradas "de referência" e podem ser analíticas, numéricas, experimentais ou medições de campo. Já, a validação quantifica o grau de representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real. Essa análise é normalmente realizada por comparações sistemáticas com dados experimentais já consagrados ou dados de campo representativos dos tipos de fenômenos nos quais se espera simular. Após se calibrar um modelo hidrológico, este deve ser validado para outro evento similar, mostrando a efetividade da calibração e delimitando a abrangência de aplicação do modelo calibrado.

Por ou outro ponto de vista, na verificação, a associação ou relação da simulação para o mundo real não é uma questão. Já na validação esta relação é a questão. A essência de cada conceito é captada na expressão compacta: verificar é resolver a equação corretamente; validar é resolver a equação correta [Oberkampf and Roy \[2010\]](#).

A.6 COMENTÁRIOS

Um dos principais problemas ao se utilizar um modelo é acreditar que o modelo não representa a realidade e sim é a realidade, porém a realidade nunca é tão simples. Efeitos que não são considerados na modelagem podem ser importantes, como o da turbulência, afetando negativamente a representação do modelo. Assim, nunca se deve forçar a realidade para que se encaixem em um modelo, e sim, deve-se entender tanto o fenômeno a ser simulado quanto o modelo a ser utilizado e identificar se este é válido (está validado).

APÊNDICE B – MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO (MDE)

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

ANA LUIZA SCHREIBER CORDEIRO

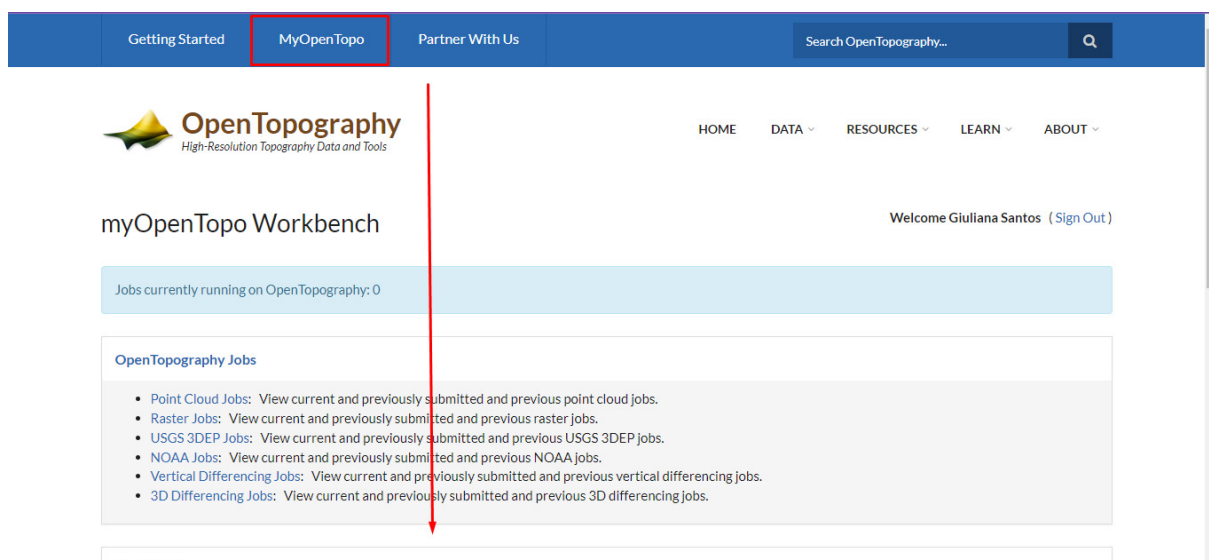
O modelo digital de elevação é o dado topográfico mais importante para o nosso trabalho, já que é a representação do relevo da bacia hidrográfica. Ele será utilizado tanto no modelo hidrológico quanto no modelo hidrodinâmico. Para o primeiro, o MDE deve possuir o tamanho de toda a bacia hidrográfica considerada, enquanto no segundo o MDE pode conter apenas a região onde a inundação será avaliada. Opte pelo uso de um MDT em vez de MDE caso exista a possibilidade. A seguir, serão apresentadas diferentes fontes gratuitas para a obtenção deste dado.

B.1 OPENTOPOGRAPHY

Uma maneira simplificada de encontrar o MDE é através do *plugin* no QGIS **OpenTopography DEM**. Para utilizá-lo, deve-se:

- Fazer um cadastro no *site* "Open Topography" (Figuras B.1 e B.2).

Figura B.1 – Feito o cadastro, clique em MyOpenTopo e role para baixo.



Fonte: Próprio autor.

Figura B.2 – My Account » Login OpenTopography

OpenTopography
High-Resolution Topography Data and Tools

HOME DATA RESOURCES LEARN ABOUT

Log In

Log in to OpenTopography with your email and password.

Username (Email) *

Password *

☒ Remember my login

LOG IN

[Forgot my password](#) [Create new account](#)

Citation Policy | FAQ | Media | Donate | Contact Us

OpenTopography is supported by the National Science Foundation under Award Numbers 1948997, 1948994 & 1948857
OpenTopography Facility, San Diego Supercomputer Center, University of California San Diego, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0505
Copyright © opentopography.org. All Rights Reserved. Terms of Use | Privacy Policy

Fonte: Próprio autor

- Com isso realizado, baixe sua chave de acesso (*API key*) em "*Get an API Key*" (Figura B.3).

Figura B.3 – Para obter a *API key*, clique em "*Request key*", depois copie a chave.

OpenTopography
High-Resolution Topography Data and Tools

HOME DATA RESOURCES LEARN ABOUT

myOpenTopo Workbench

Welcome Hugo Gobel | Sign Out

OpenTopography Systems Load Status - Low

My OpenTopography Jobs View my previously submitted jobs.

My Differencing Jobs View my previously submitted differencing jobs.

My Usage Statistics My submitted jobs analytics dashboard.

Get an API Key OpenTopography's available API require a key (e.g. use in blender).

My Contributions

User: [username]

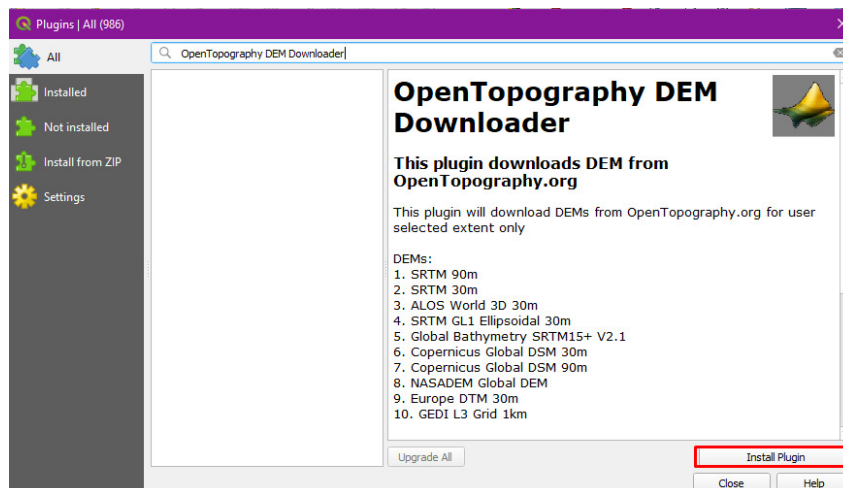
- Access to 250 million points per point cloud & processing job.
- Personalized point cloud and raster jobs interface.
- Point Cloud & Raster bulk data downloads.

[Update Profile](#)
[Change Password](#)
[Customize processing services](#)
[Power User](#)

Fonte: Próprio autor.

- Para inseri-la no *Open Topography* dentro do QGIS, dentro do QGIS, clique na aba "Complementos", no canto superior do programa, em seguida, clique em "Gerenciar e Instalar Complementos...", depois, em "Tudo" e, por fim, pesquise o *OpenTopography* ou similar para instalá-lo (Figura B.4).

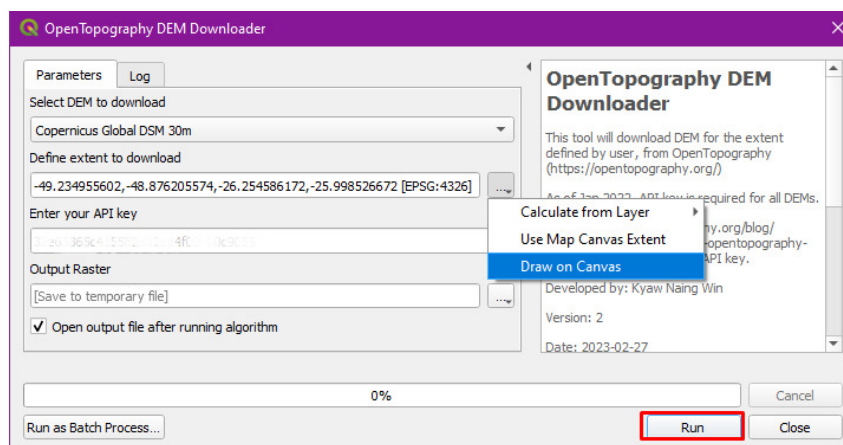
Figura B.4 – Download do plugin.



Fonte: Próprio autor.

- Após a instalação, aparecerá na segunda camada de ferramentas um ícone pertencente a extensão, selecionar-se-á o formato de Copernicus na resolução desejada (quanto menor, melhor). Deverá também ser definida a extensão do *download* segundo a região de interesse, para isso, selecione a opção de "Desenhar na tela". Por fim, basta ser colada a chave API obtida, conforme a Figura B.5.

Figura B.5 – Configurações para adicionar o MDE na região.



Fonte: Próprio autor.

Assim, basta configurá-lo para criar o MDE de forma adequada no programa. Sendo essa uma ferramenta que permite baixar dados de modelos digitais de elevação (DEM) de fontes

como o USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos), a Agência Espacial Europeia (ESA) e a NASA (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço) de diversas resoluções.

B.2 SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO - SGB

Outra maneira é através do site do GeoSGB, na parte de "[Gestão Territorial](#)", ou ainda, pesquise no *Google* "[SGB Gestão Territorial](#)" e encontre o *site*;

- Clique em **Prevenção de Desastres** no menu central (Figura B.6);

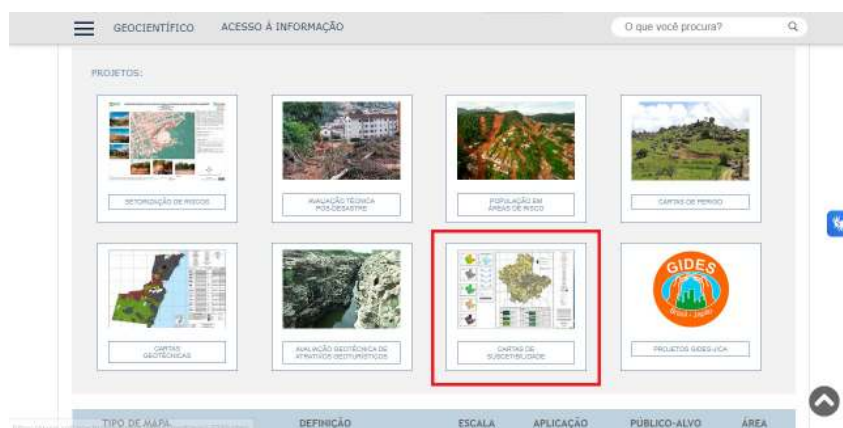
Figura B.6 – Página de Gestão Territorial do site do GeoSGB.



Fonte: Próprio autor.

- Feito isso, clique no link **Cartas de Suscetibilidade**, presente na parte inferior da página (Figura B.7);

Figura B.7 – Página de Prevenção de Desastres do site do GeoSGB.



Fonte: Próprio autor.

- Clique em **Produtos** e depois no **Estado** de interesse, na parte inferior da página (Figura B.8);

Figura B.8 – Página de Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações do site do GeoSGB.



Fonte: Próprio autor.

- Selecione a cidade de interesse, para este estudo, Joinville;
- Por fim, selecione a opção com o *link* "Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE" na coluna "Produtos" conforme a Figura B.9 ao lado do nome da cidade e faça o *download* de "Produtos MDE" , (perceba que existem diversas outras informações que podem ser de interesse nesta página).

Figura B.9 – Página de *download* do MDE.

	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE, Equações IDF
Hapema	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE, Equações IDF
Ituporanga	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE
Jaborá	Mapa, SIG (vetores), Produtos MDE
Jacinto Machado	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE, Equações IDF
Jaraguá do Sul	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE
Joaçaba	Mapa, SIG (vetores), Produtos MDE
Joinville	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE, Equações IDF
José Boiteux	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE, Equações IDF
Lages	Mapa, SIG (vetores), Base Cartográfica, Imagens, Produtos MDE
Lajeado Grande	Mapa, SIG (vetores), Produtos MDE, Geofísica
Lauro Muller	Mapa, SIG (vetores)
Lebon Régis	Mapa, SIG (vetores), Produtos MDE

Fonte: Próprio autor.

B.3 SRTM

Um MDE pode estar disponível gratuitamente em quase todo o mundo é o obtido pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O SRTM consistiu em um sistema de radares especialmente modificados que voou acoplado ao Ônibus Espacial *Endeavour* durante uma missão de 11 dias em fevereiro de 2000. Os dados foram publicados em uma grade com arco de 1 segundo (resolução de 30 metros) para os EUA e com um arco de 3 segundos (resolução de 90 metros) para o resto do globo da latitude de 56°S até a de 60°N [Rabus et al. \[2003\]](#).

Estas são algumas fontes (além do *OpenTopography*) para fazer *download* dos dados do SRTM:

- Topodata - Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil (TOPODATA): <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>;
- Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS): <https://www.usgs.gov>;

B.4 OUTROS

Ainda podem existir outras formas de obter estas informações, dependendo do estado ou país com que se quer trabalhar. Como exemplo, temos que o estado de Santa Catarina possui o MDT e MDS de todo o estado com resolução de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS) (<http://sigsc.sc.gov.br/>). Outros MDTs podem ser encontrados no site dos Mapas Digitais de Santa Catarina (<https://ciram.epagri.sc.gov.br/>). Também é possível contratar serviços específicos para a obtenção desta informação, embora seja bastante custoso.

APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÕES DE HUFF

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

Tabela C.1 – Distribuição de Huff para bacias menores do que 25,9 km².

Proporção de tempo min./min.	Proporção de Precipitação 100×mm/mm			
	Primeiro Quartil	Segundo Quartil	Terceiro Quartil	Quarto Quartil
	%	%	%	%
0/24	0,00	0,00	0,00	0,00
01/24	8,36	2,29	2,05	2,31
02/24	9,37	2,53	2,26	2,48
03/24	10,38	2,96	2,36	2,33
04/24	10,22	3,55	2,45	2,66
05/24	9,12	4,46	2,59	2,75
06/24	8,05	5,60	2,65	2,70
07/24	6,75	7,02	2,55	2,68
08/24	4,97	8,03	2,73	2,42
09/24	3,60	8,85	3,14	2,50
10/24	3,35	9,06	3,55	2,58
11/24	2,80	8,03	4,60	2,94
12/24	2,84	7,38	5,42	2,90
13/24	2,74	5,72	7,57	2,65
14/24	2,63	4,90	8,19	2,43
15/24	2,22	4,32	8,91	2,28
16/24	2,07	3,11	8,87	2,63
17/24	1,70	2,41	8,30	3,84
18/24	1,53	1,95	6,73	6,21
19/24	1,33	1,64	4,82	8,02
20/24	1,33	1,48	3,37	9,88
21/24	1,20	1,28	2,23	10,86
22/24	1,18	1,17	1,72	9,66
23/24	1,11	1,10	1,50	6,33
24/24	1,15	1,16	1,44	3,96

Tabela C.2 – Distribuição de Huff para bacias maiores do que 25,9 km² e menores do que 129,5 km².

	Proporção de Precipitação 100×mm/mm			
Proporção de tempo	Primeiro Quartil	Segundo Quartil	Terceiro Quartil	Quarto Quartil
min./min.	%	%	%	%
0/24	0,00	0,00	0,00	0,00
01/24	6,41	1,48	1,33	1,48
02/24	9,28	2,09	1,69	1,86
03/24	11,76	2,82	2,11	2,38
04/24	11,46	3,63	2,40	2,84
05/24	10,43	4,69	2,48	3,13
06/24	9,21	6,18	2,64	2,50
07/24	7,33	8,02	2,59	3,00
08/24	5,22	8,64	2,93	2,50
09/24	3,82	9,31	3,29	2,58
10/24	3,38	9,39	3,90	2,54
11/24	2,86	8,59	4,54	2,65
12/24	2,59	8,06	5,70	2,87
13/24	2,45	6,17	7,82	2,09
14/24	2,44	4,90	8,76	1,86
15/24	2,17	3,61	9,70	2,61
16/24	1,77	3,09	9,93	2,84
17/24	1,41	2,09	8,62	4,12
18/24	1,20	1,83	6,82	6,02
19/24	1,16	1,38	4,76	9,06
20/24	0,92	1,13	3,03	10,92
21/24	0,76	0,89	1,86	12,51
22/24	0,71	0,73	1,32	10,23
23/24	0,63	0,67	0,99	5,37
24/24	0,63	0,61	0,79	2,04

Tabela C.3 – Distribuição de Huff para bacias maiores do que 129,5 km² e menores do que 1036 km².

	Proporção de Precipitação 100×mm/mm			
Proporção de tempo	Primeiro Quartil	Segundo Quartil	Terceiro Quartil	Quarto Quartil
min./min.	%	%	%	%
0/24	0,00	0,00	0,00	0,00
01/24	4,59	0,88	0,72	0,90
02/24	8,90	1,50	1,13	1,39
03/24	12,45	2,55	1,62	2,07
04/24	13,23	3,59	2,10	2,74
05/24	11,87	4,67	2,71	2,83
06/24	9,75	6,40	2,68	2,91
07/24	8,47	7,87	2,83	2,62
08/24	5,54	9,71	2,56	2,37
09/24	3,94	10,60	3,31	2,29
10/24	3,46	10,41	3,80	3,00
11/24	2,93	9,46	4,61	2,64
12/24	2,25	8,22	5,99	2,50
13/24	2,20	6,18	8,24	2,73
14/24	1,87	4,88	9,72	2,69
15/24	1,90	3,41	10,74	2,44
16/24	1,45	2,76	10,04	2,95
17/24	1,19	1,73	9,47	3,86
18/24	0,95	1,43	6,92	6,05
19/24	0,76	1,09	4,41	10,24
20/24	0,65	0,87	2,73	12,44
21/24	0,51	0,62	1,64	13,52
22/24	0,42	0,47	1,01	9,46
23/24	0,38	0,37	0,60	4,13
24/24	0,34	0,33	0,42	1,23

APÊNDICE D – MODELAGEM HIDRODINÂMICA 1D

LEONARDO ROMERO MONTEIRO

GIULIANA CRISTOFOLINI DOS SANTOS

JOÃO LUIZ DA ROCHA BORIN

D.0.1 Modelagem 1D

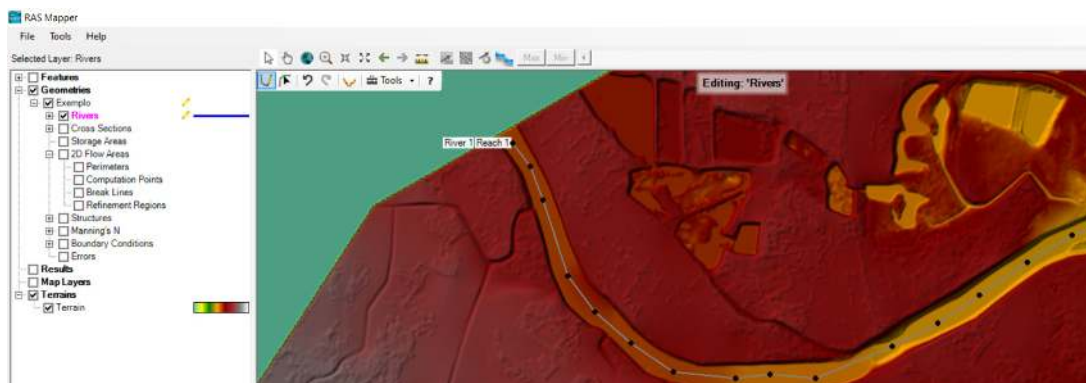
Neste item, aborda-se como manusear de forma adequada as ferramentas do programa para introdução de dados 1D, processamento dos mesmos e análise de seus resultados. O exemplo aplicado não se refere ao de Rio Negrinho, como no resto do presente documento.

Geometria

No RAS Mapper, com o MDT já inserido, com o botão direito do *mouse*, clica-se em *Geometries* e, então, em *Add New Geometry*, que abrirá uma janela para se inserir o nome da geometria; depois de inserido, clica-se em "OK" e terá uma nova geometria criada para moldar e editar o rio escolhido.

Com o botão direito do *mouse*, clica-se em *Rivers*, depois, em *Edit Geometry*, assim, se entrará no modo de edição da geometria, nele primeiro se criará o caminho do rio. Para isso, clica-se com o botão esquerdo do *mouse* sobre o mapa e cria-se o caminho do rio. Ao fazer isso, tente manter o caminho no meio do rio mostrado no mapa, para que o rio fique bem representado. No último ponto do rio, dê dois cliques com o botão esquerdo do *mouse* para encerrar sua trajetória, então, abrirá uma janela para inserir o nome do rio, ao clicar em "OK" finaliza-se o posicionamento do caminho dele (Figura D.1).

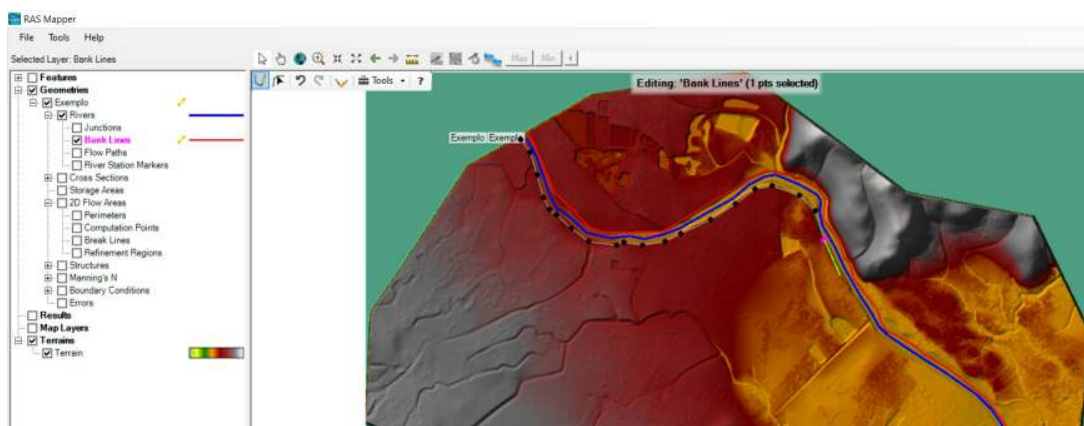
Figura D.1 – Criando o caminho do rio.



Fonte: Próprios autores.

Clica-se no ícone "+" ao lado esquerdo de *Rivers* e abre-se uma aba com os demais elementos do rio. Clicando em *Bank Lines*, começa-se a editar as margens do rio, como feito para o caminho do mesmo, segue-se clicando com o botão esquerdo do *mouse* sobre o mapa para fazer o caminho da margem seguindo o rio do mapa como base. Feito isso, ainda é preciso adicionar a margem esquerda e a direita do rio, fazendo duas *Bank Lines*, tendo em mente que a ordem deve começar da esquerda para a direita, seguindo a vista para jusante do rio (Figura D.2).

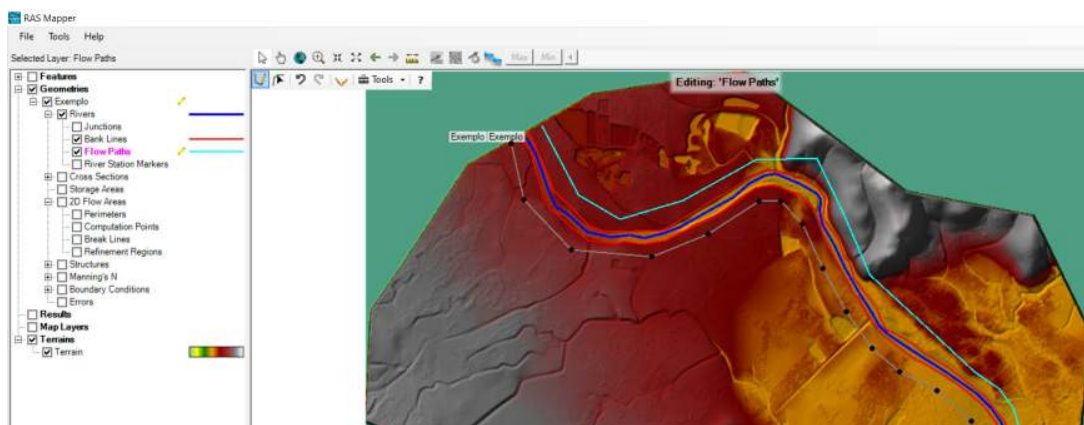
Figura D.2 – Criando *Bank Lines*.



Fonte: Próprios autores.

Após esse passo, clica-se em *Flow Paths* para criar e editar o caminho dos extremos do rio. Assim, cria-se um *Flow Path* para cada lado do rio, pois eles determinarão as distâncias entre as extremidades ou direita ou esquerda de duas sessões do rio. Para criá-las, o processo é o mesmo das *Bank Lines*. Quando forem criados os *Flow Paths*, tenha em vista que eles devem representar o possível caminho que o rio vai passar, então, crie-os com formas simples e afastadas das *Bank Lines*, porém seguindo a forma do rio. Assim, como nas *Bank Lines* a ordem de criação dos *Flow Paths* deve ser da esquerda para a direita olhando para jusante do rio (Figura D.3).

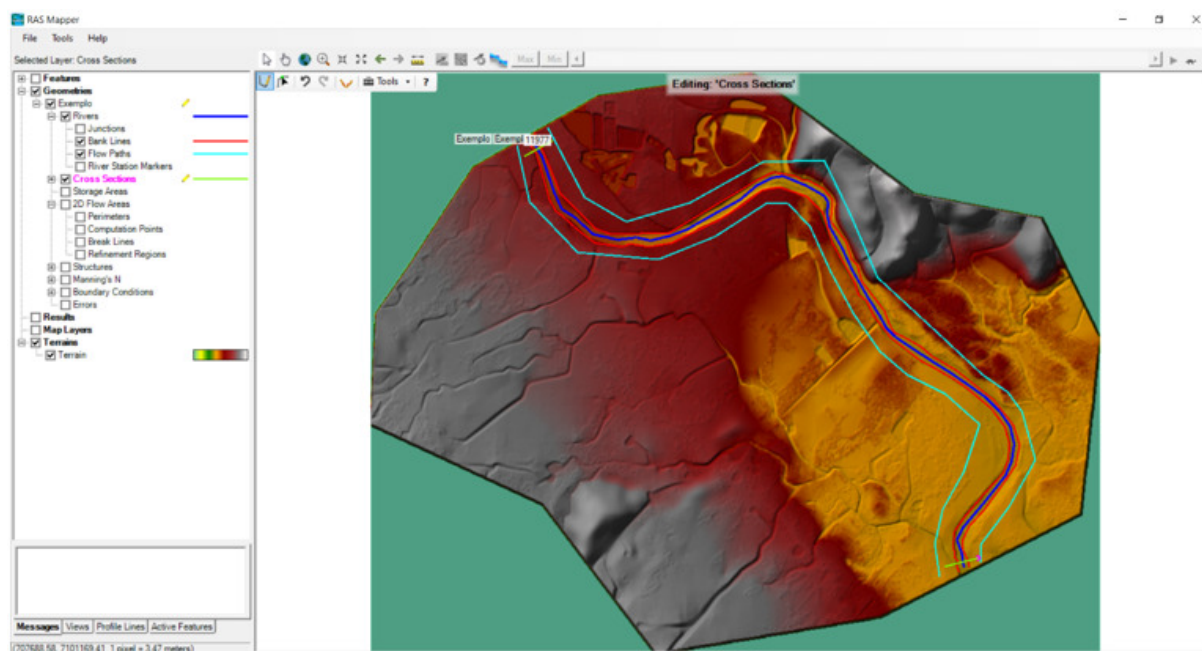
Figura D.3 – Criando *Flow Path*.



Fonte: Próprios autores.

Agora serão criadas as sessões transversais do rio, que representa por onde a água passará. Para isso, clica-se sobre *Cross Sections*, na aba da "geometria", para entrar na criação e edição das sessões transversais. Começa-se criando a sessão mais a montante do rio, clicando com o botão esquerdo do *mouse* no lado esquerdo e, então, direito do rio para se criar o perfil da sessão, dando dois cliques no último ponto para finalizar a sessão. Os pontos devem sempre estar fora das *Bank Lines* e ser posicionados da esquerda para direita para quem olha para jusante do rio, buscando também gerar uma perpendicularidade da sessão com a linha do caminho do rio (*Reach*). Pode-se fazer uma sessão com mais pontos para fazer formas com mais de uma reta, porém deve-se sempre respeitar os requisitos acima citados (Figura D.4). É interessante notar que sessões com mais de dois pontos podem representar melhor rios que extrapolam a sua margem com fluxo em mais de uma direção. Após criar a sessão mais a montante do rio, cria-se da mesma forma a sessão mais a jusante do rio. Depois de posicionadas as duas sessões principais do rio, clica-se com o botão direito do *mouse* sobre *Cross Sections* na aba da sua geometria e clica-se também em *Stop Editing*, que abrirá uma janela perguntado se deseja salvar as alterações na suas geometria, clica-se em *Yes* e ela se fechará salvando as suas criações e edições.

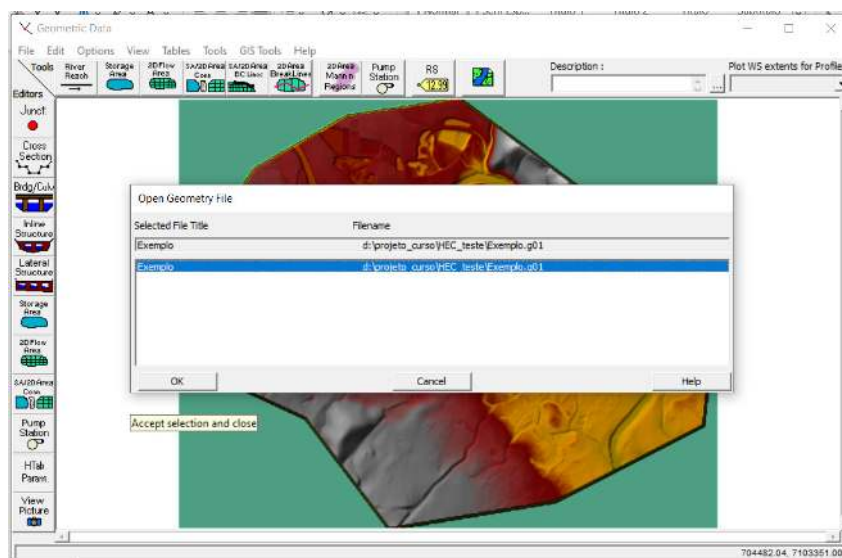
Figura D.4 – Criando a primeira e a última sessão do rio no *RAS Mapper*.



Fonte: Próprios autores.

Fecha-se o *RAS Mapper*, feito isso, pode-se voltar para a interface inicial do HEC-RAS, onde clica-se no ícone  para abrir o *Geometric Data*, que é uma janela somente para criação e edição de geometrias. Dessa forma, abre-se uma janela do editor, nela clica-se em "File" e, então, em "Open Geometry Data", depois seleciona-se a geometria criada no *RAS Mapper* (Figura D.5) e clica-se em "OK", isso carregará no editor a sua geometria, com todos os itens criados até agora.

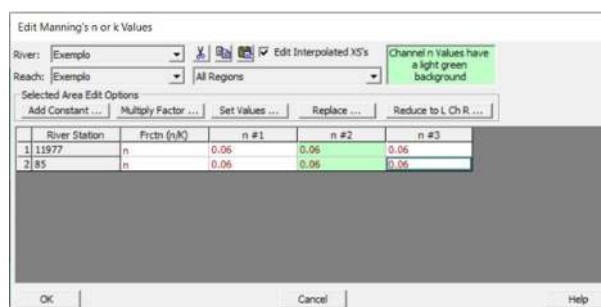
Figura D.5 – Selecionando a geometria criada no *RAS Mapper* no *Geometric Data*.



Fonte: Próprios autores.

Clica-se na aba superior em "*Tables*" e, depois, em "*Manning's n or k values*", isso abrirá uma tabela dos valores de Manning do centro e das margens de cada sessão (Figura D.6), então, insire-se o valor de Manning de cada parte em cada sessão e clica-se em "OK", para fechar a janela e salvar os valores.

Figura D.6 – Tabela dos valores de *Manning* preenchida.

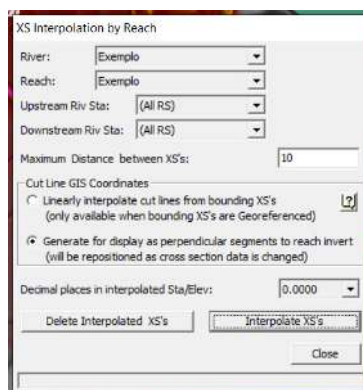


Fonte: Próprios autores.

Na interface de edição da geometria, na aba superior, clica-se em *Tools* e com o *mouse* em cima de *XS Interpolation*, e clica-se em *Within a Reach...* para abrir uma janela que lhe possibilite interpolar as sessões transversais criadas anteriormente (Figura D.7). Em *Maximum Distance between XS's*, pode-se introduzir a distância máxima entre cada sessão transversal, sendo elas as criadas na interpolação ou por que está criando o projeto. Assim, se a distância entre as sessões for superior a esse valor, em metros, ele criará sessão(ões) entre as duas. Em *Cut Line GIS Coordinates*, seleciona-se *Linearly interpolate cut lines from bounding XS's* para criar sessões em uma linha reta entre o centro das duas sessões (isso não seria muito conveniente para a maioria dos casos). Caso seja selecionado o *Generate for display as perpendicular segments to reach invert*, ele criará sessões no caminho do rio criado anteriormente e, ainda,

perpendiculares a essa linha, logo, sendo bem mais proveitoso para todos os casos. Depois de selecionado o método de interpolação, clica-se em *Interpolate XS's* e, em seguida, *Close* e todas as sessões criadas pela interpolação já irão aparecer na geometria.

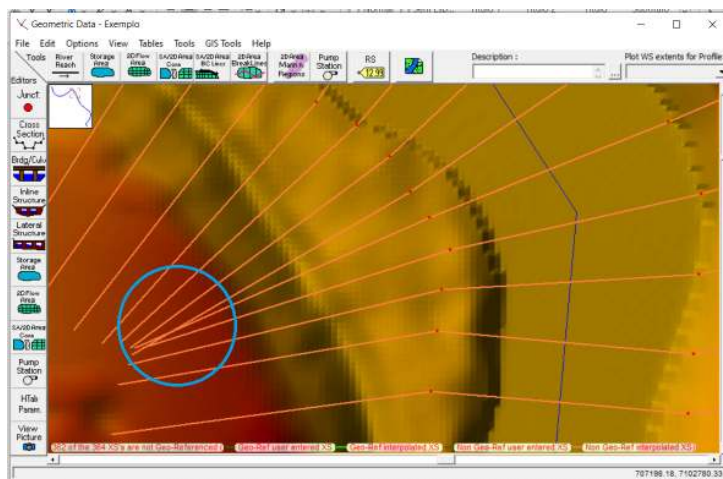
Figura D.7 – Janela da interpolação de sessões transversais.



Fonte: Próprios autores.

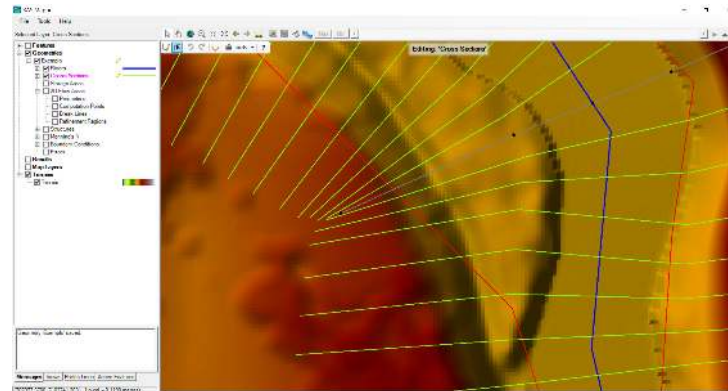
Ao fazer a interpolação, pode ocorrer a criação de sessões que cruzam (Figura D.8), principalmente, nas partes internas das curvas dos rios. Caso isso ocorra, pode ser consertado entrando novamente na janela de interpolação, clicando em *Delete Interpolated XS's* e, em seguida, repetindo o processo de criação de interpolação, porém com uma distância máxima entre sessões maior. Caso isso não resolva o problema ou não seja suficiente, altera-se a geometria dessas sessões que estão se cruzando no *RAS Mapper*, clicando com o botão direito do mouse em *Cross Sections* e selecionando *Edit Geometry*, depois vá até a sessão que está com problema e clica-se duas vezes sobre ela. Isso fará com que você possa alterar a posição dos pontos dela, podendo movê-los para que não cruze mais outra sessão, depois, clica-se com o botão direito sobre a *Cross Section* e em *Stop Editing* (Figura D.9).

Figura D.8 – Sessões transversais se cruzando, impedindo a simulação.



Fonte: Próprios autores.

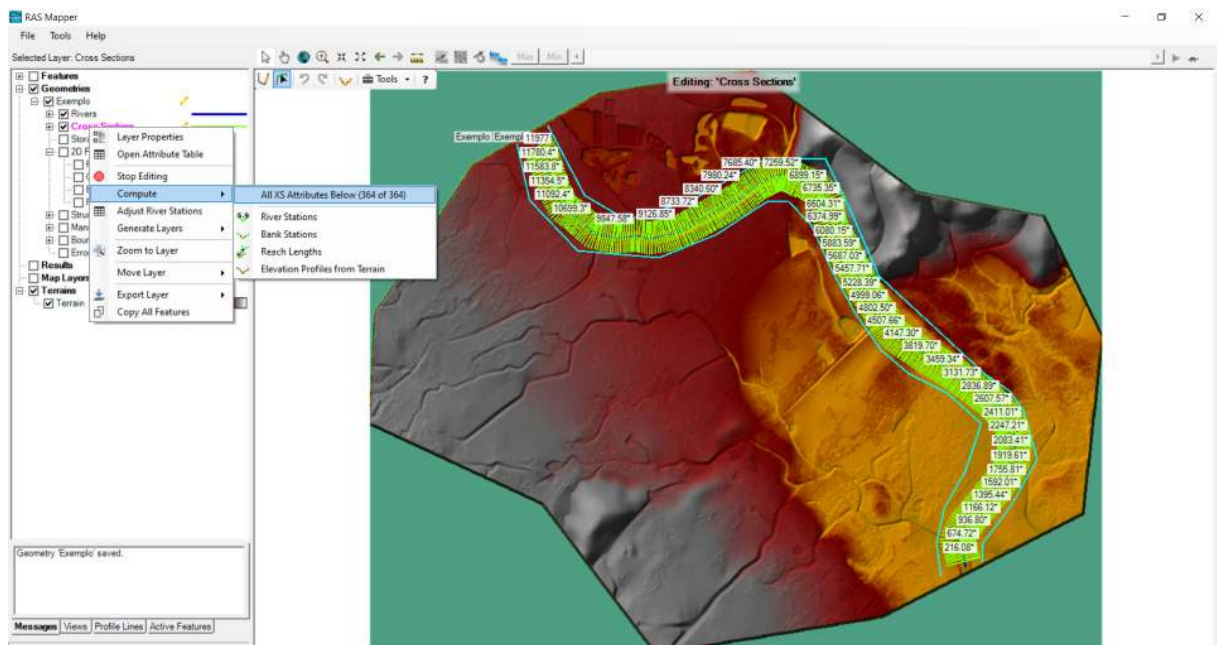
Figura D.9 – Sessões transversais concertadas não se cruzando mais.



Fonte: Próprios autores.

Entra-se no *RAS Mapper* e clica-se com o botão direito do *mouse* sobre *Cross Sections* na aba da sua geometria. Então, seleciona-se *Edit Geometry*, em seguida, clica-se novamente com o botão direito sobre *Cross Sections*, passa-se o *mouse* sobre *Compute* e seleciona-se *All XS Attributes Below* (Figura D.10). Depois, clicando sobre *Cross Sections* com o botão direito do *mouse*, seleciona-se *Stop Editing* e clica-se em *Yes* na caixa de pergunta que irá aparecer.

Figura D.10 – Computando as sessões transversais.



Fonte: Próprios autores.

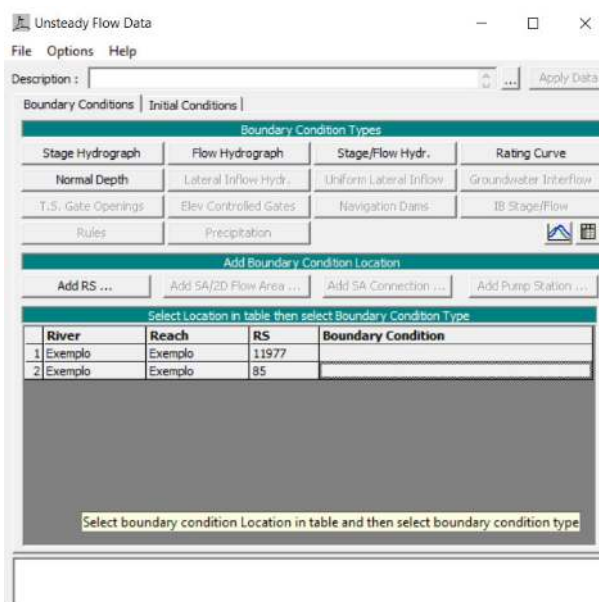
Assim, se terá montada toda geometria do rio. Nota-se que ao computar no *RAS Mapper*, as sessões interpoladas foram criadas conforme o terreno que elas estão cruzando.

Fluxo

Dados de fluxo podem vir de várias formas, podendo ser provenientes de outros *softwares* como o HEC-HMS, tabelas fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) de estações fluviométricas e também por medições em campo. No exemplo deste documento, utiliza-se uma série de dados fornecida pela ANA.

Para inserir as condições de fluxo no seu modelo, deve-se ir para a interface inicial e clicar no ícone  para abrir a janela de *Unstead Flow Data* (Figura D.11). Esta janela será onde você poderá inserir e editar fluxos em regime não permanente, que é o interessante para o alvo desse curso que são **rios**.

Figura D.11 – Janela de *Unsteady Flow Data*.



Fonte: Próprios autores.

Nessa nova janela, estarão listadas todas as sessões que são entradas ou saídas de fluxo do sistema, começa-se com a condição de entrada. Para isso, clica-se na linha da sessão de entrada para selecioná-la, então, pode-se escolher que tipo de condição que essa sessão estará selecionando entre as opções que ficaram destacadas acima da lista de sessões. Feito isso, clica-se sobre *Flow Hidrograph* e abre-se uma nova janela (Figura D.12), onde podem serem inseridos os valores de vazão para cada intervalo de tempo. É possível inserir os dados de vazão para iniciar no momento que será escolhido posteriormente como horário de início da simulação ou, ainda, pode-se escolher um horário específico para início e fim da propagação do hidrograma, mas note que a primeira opção acaba resolvendo possíveis problemas de incompatibilidade de horário da simulação e dados de vazão. Pode-se também inserir apenas alguns dados de vazão em horários específicos na tabela e se interpolar os valores faltantes clicando em *Interpolate Missing Value*. Depois de inserido todos os valores de vazão desejados, clica-se em "OK" para fechar a janela e salvar os valores para aquela sessão.

Figura D.12 – *Flow Hydrograph* preenchido.

Flow Hydrograph

2D: Perimeter 1 BCLine: entrada 1

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☒ Use Simulation Time: Date: Time:

☐ Fixed Start Time: Date: Time:

	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	31Dec0999 2400	0:00:00	3.3
2	01Jan1000 0100	1:00:00	3.3
3	01Jan1000 0200	2:00:00	3.2
4	01Jan1000 0300	3:00:00	3.2
5	01Jan1000 0400	4:00:00	3.2
6	01Jan1000 0500	5:00:00	3.1
7	01Jan1000 0600	6:00:00	3.1
8	01Jan1000 0700	7:00:00	3
9	01Jan1000 0800	8:00:00	3
10	01Jan1000 0900	9:00:00	3
11	01Jan1000 1000	10:00:00	2.9
12	01Jan1000 1100	11:00:00	2.9
13	01Jan1000 1200	12:00:00	2.8
14	01Jan1000 1300	13:00:00	2.8
15	01Jan1000 1400	14:00:00	2.8

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.0005 ☐ TW

Fonte: Próprios autores.

Já para adicionar a condição de saída, deve-se voltar a tela de *Unsteady Flow Data* e, então, clica-se na sessão de saída para selecioná-la. Seleciona-se entre as opções que se destacaram acima a *Normal Depth*, assim, abre-se uma nova janela onde pode-se inserir a inclinação do fundo da sessão de saída (Figura D.13), para o programa calcular como é a profundidade normal do rio neste ponto. Após isso, clica-se "OK" para salvar a condição normal na saída.

Figura D.13 – Janela para o escoamento normal.

Normal Depth Downstream Boundary

River: Exemplo Reach: Exemplo RS: 85

Friction Slope: 0.0005

2D Flow Area Boundary Condition Parameters

☒ Compute separate water surface elevation per face along BC Line

☐ Compute single water surface for entire BC Line

Fonte: Próprios autores.

Para salvar a condição de fluxo criada, clica-se em *File* na aba superior, então, seleciona-se

a opção *Save Unsteady Flow As ...*, que abrirá uma janela para se nomear e salvar a condição criada.

Assim, finaliza-se de inserir as condições de fluxo do modelo. Dessa forma, foram listadas aqui as condições usuais de entrada e saída para a simulação de rios, mas pode ser utilizada qualquer outra condição de fluxo, tanto na entrada, quanto na saída, para melhor representar o modelo desejado de modo personalizado.

Processamento

O processamento pode ser alterado conforme cada modelo para que se possa ser mais eficiente, trazendo maior estabilidade e rapidez.

Para abrir a ferramenta de processamento, deve-se, na interface inicial do HEC-RAS, clicar no ícone  para abrir a janela do *Unsteady Flow Simulation*, onde pode-se alterar os parâmetros dos cálculos e iniciar o processo de simulação.

Na aba superior, clica-se em *File* e, então, em *New Plan*, que abrirá uma janela onde deve-se inserir o nome do plano de simulação e onde se quer salvá-lo. Após nomear o novo plano e escolher a sua pasta destino, clica-se em "OK", isso abrirá uma nova janela onde se pede para pôr um *Short ID* do plano. Logo, insere-se um nome no campo em branco e clica-se em "OK".

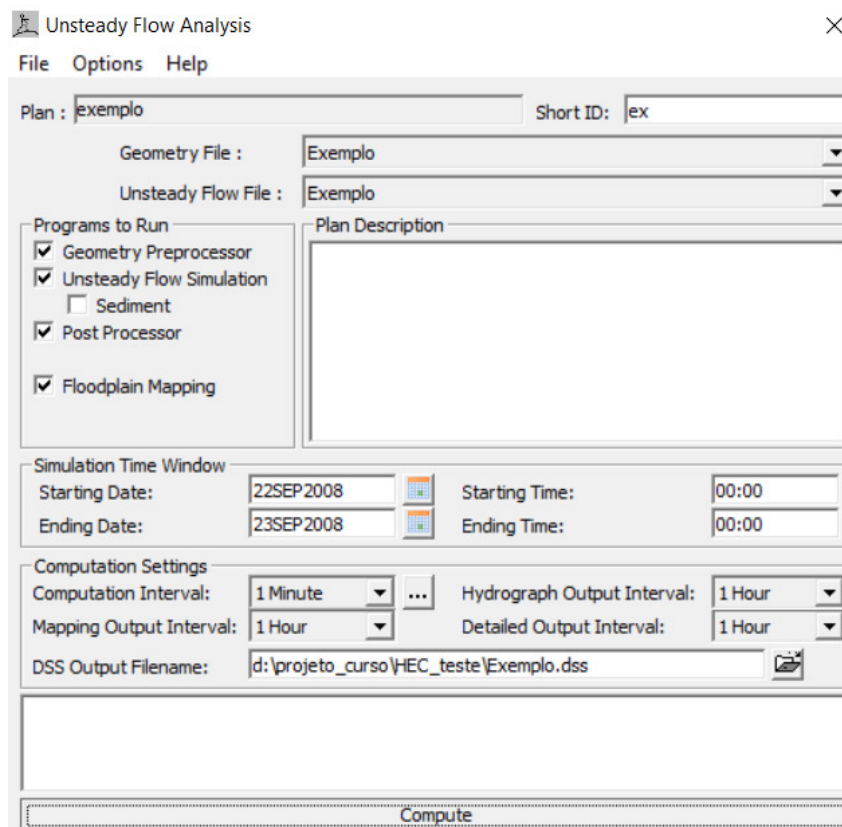
Para um primeiro processamento, seleciona-se as quatro opções principais da área *Programs to Run*, apenas não selecionando o campo *Sediment*. Posteriormente, caso seja feita uma alteração no modelo que não envolva a geometria, pode-se deixar em branco o campo *Geometry Processor*.

Na área *Simulation Time Window*, determina-se o momento de início e fim do período o qual se deseja simular. Após serem introduzidos esses valores, as vazões serão referenciadas neste tempo, assim, encerrando todos os dados faltantes da parte de fluxo (Figura D.14).

Clica-se na aba superior da janela em *Options*, depois, em *Calculation Options and Tolerances...*, para abrir uma janela onde será possível alterar alguns parâmetros do cálculo do modelo. Nessa janela, se terão cinco abas, algumas delas servem para modelos 1D, outras para 2D e outras ainda para modelos mistos. Dito isso, comentam-se nesta parte os itens importantes para o modelo 1D.

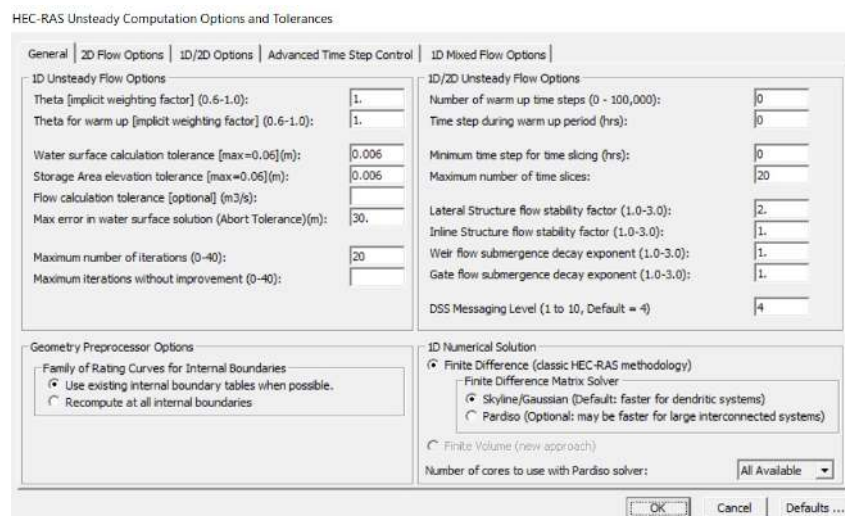
Em *General*, é possível alterar uma série de coisas. Alterando o "*theta*", modifica-se o fator de implicidade do sistema, pois é possível fazer os cálculos de forma totalmente implícita com (*theta*=1) ou parcialmente implícita com (*theta* < 1). Além disso, é possível alterar algumas tolerâncias adotadas no cálculo e o número de interações feitas em cada cálculo. Sendo possível aumentar o número de interações, pode-se melhorar a estabilidade do modelo, entretanto, aumenta-se significativamente o tempo de processamento. Nesta aba, também é possível configurar um *warm up*, que é um pré processamento no modelo para que ele inicie já de um ponto específico e esse pré processamento não é explicitado nos resultados. O *warm up* pode ser útil quando se quer encher o rio antes de introduzir o hidrograma nele, como uma condição inicial ou para solucionar algumas instabilidades geradas no início do processamento (Figura D.15).

Figura D.14 – Janela do *Unsteady Flow Simulation* preenchida.



Fonte: Próprios autores.

Figura D.15 – Aba General em *Computation Options and Tolerances*.



Fonte: Próprios autores.

Na aba *Advanced Time Step Control*, pode-se alterar o passo de tempo que é utilizado no cálculo. Pode ser utilizado um passo de tempo fixo determinado antes de iniciar a simulação ou um passo de tempo variável, conforme o "Coeficiente de Courant", ou ainda, um passo que se altere em determinado tempo da simulação (Figura D.16). A opção mais estável é a segunda, pois ela reconhece quando o sistema está encontrando dificuldades de calcular os valores para um passo de tempo específico e diminui o passo pela metade e, caso o sistema esteja mais estável e sem necessidade de um passo tão curto, ele dobra o passo de tempo.

Para configurar o passo de tempo variável pelo Coeficiente de Courant, deve-se primeiro selecionar a opção *Adjust Time Step Based on Courant*, em seguida, define-se o valor máximo e mínimo de Courant, quando os cálculos do sistema chegarem no Courant máximo, ele dividirá o tempo pela metade e quando chegar no Courant mínimo, ele dobrará o tempo. Lembre-se que o Courant vai de uma escala de 0 a 1, então, tenha em mente valores dentro deste intervalo e fora dos seus limites. Na linha *Number of steps below minimum before doubling*, insere-se o número de vezes que o sistema deve obter o Courant limitante com o passo de tempo antes de dobrá-lo. Em *Maximum number of doubling base time step* e *Maximum number of doubling base time step*, deve-se inserir um multiplicador máximo para o valor base, de forma a definir o passo mínimo e máximo que o sistema pode utilizar, sendo mostrado na caixa do lado o valor do máximo ou mínimo.

Figura D.16 – Aba *Advanced Time Step Control* em *Computation Options and Tolerances*.

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General | 2D Flow Options | 1D/2D Options | **Advanced Time Step Control** | 1D Mixed Flow Options

☐ Fixed Time Step (Basic method) 1 Minute

☒ **Adjust Time Step Based on Courant**

Maximum Courant: 0.9

Minimum Courant: 0.3

Number of steps below Minimum before doubling: 3

Maximum number of doubling base time step: 2 240.00 sec

Maximum number of halving base time step: 5 0.94 sec

Courant Methodology

☒ Velocity/Length (face velocity * dt / cell to cell distance)

☐ Residence Time (cell outflow * dt / cell volume)

☐ Adjust Time Step Based on Time Series of Divisors Verify Dates ...

Time Step	Date(ddMM/yyyy hhmm)	Divisor
1		0
2		0
3		0
4		0
5		0
6		0
7		0
8		0
9		0
10		0
11		0
12		0
13		0

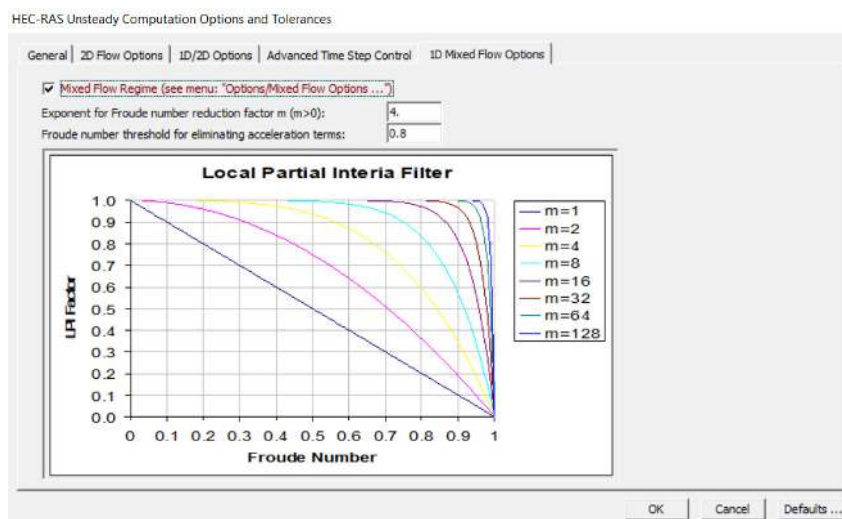
OK Cancel Defaults ...

Fonte: Próprios autores.

Passando para a última aba, *1D Mixed Flow Options* (Figura D.17), pode-se escolher se deseja utilizar um recurso no cálculo o qual permite que sejam abordados regimes subcríticos e supercríticos, no mesmo modelo, e inclusive a passagem de um para outro. Para ativá-lo, seleciona-se a caixa de *Mixed Flow Regime*. A lacuna referente ao *Exponent for Froud number reduction factor m* serve para selecionar qual linha do gráfico deseja-se que o sistema adote. Já

a lacuna *Froude number threshold for eliminating acceleration terms* é para introduzir o número de Froude, o qual acima dele o fator de aceleração é desconsiderado na fórmula de energia do sistema. Feito isso, ativa-se o *Mixed Flow Regime*, que é um recurso importante para modelos que lidam com mudanças de regime, como cachoeiras, a fim de reduzir instabilidades geradas pela mudança de regime.

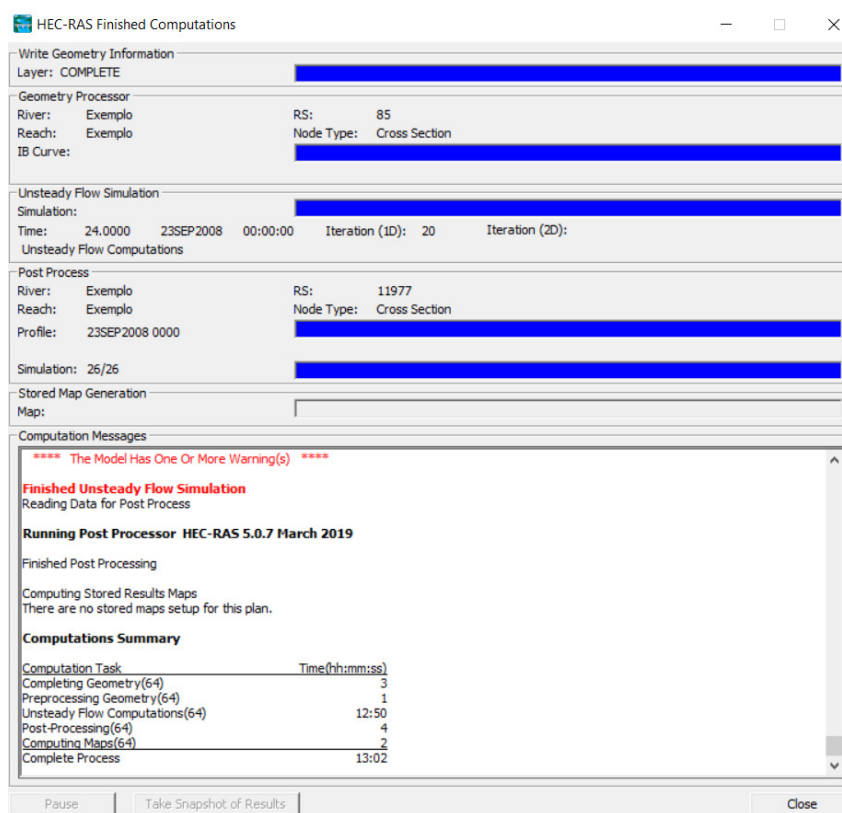
Figura D.17 – Aba 1D *Mixed Flow Options* em *Computation Options and Tolerances*.



Fonte: Próprios autores.

Após se ter configurado todos os parâmetros de cálculos desejados, clica-se em "OK" para fechar a janela salvando suas configurações. Com isso, o modelo está pronto para ser rodado. Na janela de *Unsteady Flow Analysis*, clica-se em *Compute*, para abrir uma janela onde pode-se acompanhar como está o processamento da simulação, bem como pausá-la ou pará-la (Figura D.18). Ao clicar em *Compute*, pode aparecer uma janela acusando possíveis erros na criação do modelo, portanto, deve-se corrigi-los antes de poder computar o modelo, se não ele não iniciará a simulação.

Figura D.18 – Janela do processamento após terminar a simulação com sucesso.



Fonte: Próprios autores.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Dados de Recursos Hídricos - SNIRH, 2025. URL <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 06 mar. 2025.
- A. S. Alsharhan and Z. E. Rizk. *Seasonal Floods: Harvesting and Contribution to Aquifers' Recharge*, pages 195–230. Springer International Publishing, 2020. ISBN 978-3-030-31684-6. doi: 10.1007/978-3-030-31684-6_6. URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-31684-6_6.
- A. J. Back. Hidrochusc 2.0, 2021. URL <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/solucoes/tecnologias/software/>. Acessado em: 26/02/2025.
- E. Baltas, N. Dervos, and M. Mimikou. Determination of the scs initial abstraction ratio in an experimental watershed in greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6):1825–1829, 2007.
- Brasil. Lei no. 12.608, de 10 de abril de 2012. institui a política nacional de proteção de defesa civil., 2012. URL http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em 02 de novembro de 2012.
- J. P. L. F. Brêda, R. C. D. de Paiva, W. Collischon, J. M. Bravo, V. A. Siqueira, and E. B. Steinke. Climate change impacts on south american water balance from a continental-scale hydrological model driven by cmip5 projections. *Climatic Change*, 159(4):503–522, 2020.
- C. B. Caballero, D. de Menezes, K. Campagnolo, G. Censi, H. Schwarz, and M. Kobiyama. Dimensão fractal e análise geomorfológica de bacias hidrográficas brasileiras. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 17(2020), 2020.
- V. T. Chow et al. Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. Technical report, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering ?, 1962.
- A. Christofolletti. *Geomorfologia*. Edgar Blücher, 1980.
- W. Collischonn and F. Dornelles. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*, volume 336. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.
- R. Cronshey. Urban hydrology for small watersheds. Technical report, US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1986.
- J. Faustino. Planificación y gestión de manejo de cuencas. *Turrialba: CATIE*, 1:90, 1996.

- A. O. Fortuna. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações*. EdUSP, São Paulo, 2010.
- E. J. Franco and H. Fill. Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional. *Universidade Federal do Paraná*, 2004.
- W. E. Fuller. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77(1): 564–617, 1914.
- A. d. O. Germano, C. E. M. Tucci, and A. L. L. d. Silveira. Estimativa dos parâmetros do modelo iph ii para algumas bacias urbanas brasileiras. *Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 3, n. 4 (out./dez. 1998), p. 103-120*, 1998.
- J. N. Giglio. Caracterização das Áreas de inundação em rio negrinho - sc. Master's thesis, Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- J. N. Giglio and M. Kobiyama. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de rio negrinho. In *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2011:Maceió) Maceió: ABRH, XIX:17*, 2011.
- J. V. Z. Godoy, M. Kobiyama, K. Campagnolo, and M. R. Fagundes. Utilização do termo "bacia de ordem zero" no brasil. *Revista Geográfica Acadêmica*, 15(2):89–107, 2021.
- K. A. Hoffman and S. T. Chiang. *Computational Fluid Dynamics: Volume I*. Engineering Education System, Texas, USA, 2000.
- R. E. Horton. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. America Bulletin*, 56/3:175–370, 1975.
- F. A. Huff. Time distribution of rainfall in heavy storms. 3/4:1007–1019, 1967.
- F. A. Huff and J. R. Angel. Frequency distributions and hydroclimatic characteristics of heavy rainstorms in illinois. *Bulletin (Illinois State Water Survey) no. 70*, 1989.
- Hydrology Studio. Scs nrcs hydrographs, 2025. URL <https://learn.hydrologystudio.com/hydrology-studio/knowledge-base/scs-nrcs-hydrographs-2/>. Accessed: 2025-03-06.
- C. Innocente, L. R. Monteiro, C. W. Corseuil, M. Kobiyama, and P. L. B. Chaffe. Um estudo sobre a definição da duração crítica da chuva de projeto na bacia da ufsc, florianópolis-sc. *Encontro Nacional de Desastres (1., jul. 2018, Porto Alegre). Anais. Porto Alegre: ABRHidro,[2018].*, 2018.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2021.
- D. Koutsoyiannis. Reconciling hydrology with engineering. *Hydrology Research*, 41(1):2–22, 2014.
- H. C. L. Leonardo. Indicadores de qualidade de solo e água para avaliação do uso sustentável da microbacia hidrográfica do rio passo cue, região oeste do estado do paraná. Master’s thesis, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura - Luiz de Queiroz, 2003.
- D. R. Maidment. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, 1993.
- F. F. N. Marcuzzo et al. *Bacias hidrográficas e regiões hidrográficas do Brasil: cáculo de áreas, diferenças e considera es*. ABRH, 2017.
- L. R. Monteiro and M. Kobiyama. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. *REGA*, 10/2:13–25, 2013.
- L. R. Monteiro and M. Kobiyama. Influência da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação. *REGA*, 11/2:25–35, 2014.
- L. R. Monteiro, C. I. d. Santos, M. Kobiyama, C. W. Corseuil, and P. L. B. Chaffe. Effects of return periods on flood hazard mapping: an analysis of the ufsc campus basin, florianópolis city, brazil. *RBRH*, 26:e9, 2021.
- L. R. Monteiro, B. C. Duarte, and F. M. Vanelli. Mapeamento de perigo de inundação para rio ngrinho/sc. In *Anais do III Encontro Nacional de Desastres*, pages 1–4, Niterói, RJ, 2023. ABRHidro.
- L. L. Moreira and M. Kobiyama. Panorama de estudos sobre  ndice de vulnerabilidade às inundações no brasil através de revisão bibliográfica. *Revista Caminhos da Geografia*, 22 (79):309–320, 2021.
- L. L. Moreira, M. M. de Brito, and M. Kobiyama. A systematic review and future prospects of flood vulnerability indices. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21:1513–1530, 2021.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3):885–900, 2007.
- A. d. A. Mota and M. Kobiyama. Reconsidera  es sobre a fórmula de kirpich para o c culo de tempo de concentração. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 20, n. 1 (jan./mar. 2015), p. 55-59*, 2015.

- W. L. Oberkampf and C. J. Roy. *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York, USA, 2010.
- J. B. D. d. Paiva and E. M. C. D. Paiva. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. *Porto Alegre: ABRH*, page 367, 2001.
- A. R. d. Paz. *Modelos digitais de elevação para estudos ambientais*. ABRHidro, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2024.
- PREVENE. Contribution to “natural” disaster prevention in venezuela. Technical report, Venezuela - Switzerland - PNUD, 2001.
- B. Rabus, M. Eineder, A. Roth, and R. Balmer. The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 7:214–262, 2003.
- H. H. G. Savenije. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *HP*, 18:1507–1511, 2004.
- J. T. Schaefer. The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather Forecast.*, 5 (4):570–575, 1990.
- E. A. Silva and C. E. M. Tucci. Relação entre as vazões máximas diária e instantânea. *Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 3, n. 1 (1998), p. 133-151, 1998.
- A. L. L. Silveira. Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10/1:5–23, 2005.
- V. P. Singh. *Handbook of Applied Hydrology, Second Edition*. McGraw-Hill Education, New York, 2nd edition. edition, 2017.
- D. Stephenson. Integrated flood plain management strategy for the vaal. 4:425–430, 2002.
- A. N. Strahler. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Amer. Geoph. Union Trans*, 38:913–920, 1957.
- K. C. Tonello. *Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhanês, MG. 2005. 69p.* PhD thesis, Tese (Doutorado em Ciências Florestal)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- C. Tucci. Modelos precipitação-vazão. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS: ABRH. cap, 6:227–312, 1998.
- C. E. Tucci. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no brasil. *Rega/Global Water Partnership South América*, 1(1):59–73, 2004.

- C. E. Tucci, J. C. Bertoni, A. L. Da Silveira, A. Benetti, A. E. Lanna, F. Bidone, F. Semmelman, J. A. Louzada, L. Beltrame, et al. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: EDUSP, 1993.
- C. E. M. Tucci, R. L. L. Porto, and M. T. Barros. *Drenagem Urbana*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. The sendai framework terminology on disaster risk reduction: Vulnerability. <https://www.undrr.org/terminology/vulnerability>, 2017. Accessed: 7 July 2026.
- USACE-HEC. *HEC-HMS - User's Manual*, 2021.
- USACE-HEC. *HEC-RAS - User's Manual*, 2023.
- F. M. Vanelli. *Contribuições da socio-hidrologia na redução de riscos e desastres associados a perigos naturais*. Tese (doutorado em recursos hídricos e saneamento ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2023.
- F. M. Vanelli, F. M. Fan, and M. Kobiyama. Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. *Rega: revista de gestión del agua de America Latina. Porto Alegre. Vol. 17 (jan./dez. 2020),[artigo] e24, 19 p.*, 2020.
- F. M. Vanelli, B. C. Duarte, L. R. Monteiro, M. Kobiyama, and M. M. de Brito. Mapeamento da vulnerabilidade para análise do risco a inundações em rio ngrinho/sc. In *Anais do III Encontro Nacional de Desastres*, pages 1–4, Niteroi, RJ, 2023a. ABRHidro.
- F. M. Vanelli, L. R. Monteiro, B. C. Duarte, M. M. de Brito, and M. Kobiyama. Análise socio-hidrológica dos riscos a inundação em rio ngrinho/sc: Estudo preliminar da infraestrutura crítica. In *Anais do III Encontro Nacional de Desastres*, pages 1–4, Niteroi, RJ, 2023b. ABRHidro.
- R. M. Vogel, U. Lall, X. Cai, B. Rajagopalan, P. K. Weiskel, R. P. Hooper, and N. C. Matalas. Hydrology: The interdisciplinary science of water. *Water Resources Research*, 51(6):4409—4430, 2015.
- WMO. Guide to hydrological practices. volume i: Hydrology—from measurement to hydrological information. *World Meteorological Organization Report No. 168*, page 296, 2008.
- D. E. Woodward, R. H. Hawkins, R. Jiang, A. T. Hjelmfelt, Jr, J. A. Van Mullem, and Q. D. Quan. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. In *World water & environmental resources congress 2003*, pages 1–10, 2003.