

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

Filipe Viezzer da Silva

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO NA ZONA
URBANA DO MUNICÍPIO DE RIO DOS CEDROS (SC) POR
MEIO DO MODELO HEC-RAS.**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos
para Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Nadia Bernardi Bonumá

Florianópolis (SC)
Julho/2013


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO NA ZONA
URBANA DO MUNICÍPIO DE RIO DOS CEDROS (SC) POR
MEIO DO MODELO HEC-RAS.**

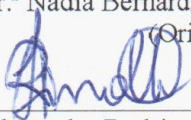
Filipe Viezzer da Silva

Trabalho submetido à Banca Examinadora como
parte dos requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental-TCC II


BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª Dr.ª Nadia Bernardi Bonumá
(Orientadora)



Prof.ª Dr.ª Alexandra Rodrigues Finotti
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe
(Membro da Banca)

Florianópolis (SC)
Julho/2013

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus familiares pela convivência descontraída e amável, em especial à minha mãe Vera, pelo apoio incondicional às minhas escolhas e conselhos.

À minha namorada, Patrícia, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Nadia, pelos conselhos e ensinamentos.

Aos docentes da UFSC, especialmente aos professores do ENS.

À SDS pelo fornecimento dos dados essenciais à realização do estudo.

Aos colegas do LabHIDRO e LabHIDRA pelo companheirismo e prestatividade.

Aos brasileiros que contribuem diretamente e indiretamente ao desenvolvimento científico da nação e do mundo.

RESUMO

O vale do Rio Itajaí é notoriamente conhecido por eventos de inundação desde sua ocupação e figura entre as áreas com mais registros de inundações em Santa Catarina. O objetivo deste estudo foi mapear as áreas de inundação na zona urbana de Rio dos Cedros, médio vale do Itajaí, por meio do modelo matemático hidrodinâmico HEC-RAS. Para isso, foram utilizados um modelo numérico do terreno, hidrografia e ortofotos da área, em escala 1:10.000, série histórica de vazão do Rio dos Cedros e medições de vazão em campo. Foram realizadas simulações para eventos com período de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, e para um evento de inundação ocorrido em 08/09/2011. Os resultados mostraram que as vias de tráfego e edificações no entorno da ponte do Rio dos Cedros e na região da confluência do Arroio do Ouro e seu tributário são mais suscetíveis à inundação. Todavia, o modelo apresentou um resultado subestimado quando comparado com as áreas inundadas registradas no evento de 08/09/2011. Isto pode ter ocorrido devido a fenômenos que não foram considerados na simulação, tais como alagamentos causados pelo retorno da água do Rio dos Cedros pelo sistema de drenagem urbana, e o possível remanso do Rio dos Cedros no Arroio do Ouro e seus afluentes.

Palavras-chave: Mapa de inundação, HEC-RAS, Rio dos Cedros.

ABSTRACT

The Itajaí River Valley is known for flood events since its occupation and figures among the areas with the highest number of flood records in Santa Catarina. The aim of this study was to map the flood extent of Rio dos Cedros urban area, medium Itajaí Valley, through the hydrodynamic mathematical model HEC-RAS. For this purpose, the following data were used: digital terrain model, hydrography map and orthorectified aerial image (1:10,000 scale), Cedros River discharge time series and discharge measurements in the field. Simulations were performed for events with return period of 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years, and a flood event occurred on 08/09/2011. The results indicated that the roads and buildings in the surroundings of the Cedros River bridge and the Ouro Creek and its tributary confluence region are more susceptible to flooding. However, the model presented an underestimated result when compared to the flooded areas recorded in the 09/08/2011 event. This behavior may be due to conditions not considered in the simulation, such as flooding caused by the return of the Cedros River water by urban drainage system, and the possible backwater of the Cedros River in the Ouro Creek and its tributary.

Keywords: Flood mapping, HEC-RAS, Cedros River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Ilustração de enchente e inundação.....	16
Figura 3.2: Elementos geométricos de um canal.....	21
Figura 3.3: Representação dos termos da equação da energia.	24
Figura 3.4: Subdivisões da seção para o cálculo da capacidade de escoamento no canal.....	26
Figura 4.1: Localização da zona urbana de Rio dos Cedros.....	28
Figura 4.2: Mapa altimétrico da bacia hidrográfica do Rio dos Cedros.	30
Figura 4.3: Fluxograma metodológico.	32
Figura 4.4: Curva-chave da estação Arrozeira	36
Figura 4.5: Representação dos termos do método da seção média para cálculo de vazões.....	38
Figura 4.6: Sistema de hidrografia e sua divisão nos trechos de modelagem.	42
Figura 4.7: Seções de simulação.	43
Figura 4.8: Características geométricas de uma seção.	43
Figura 4.9: Localização dos pontos de controle e fotografias da inundação registrada.....	46
Figura 5.1: Mapa de uso e cobertura do solo.....	47
Figura 5.2: Localização dos pontos de medição de vazão.....	50
Figura 5.3: Extensão da inundação com período de retorno de 5 anos.	54
Figura 5.4: Extensão da inundação com período de retorno de 20 anos.	55
Figura 5.5: Extensão da inundação com período de retorno de 50 anos.	56
Figura 5.6: Extensão da inundação com período de retorno de 100 anos.	57
Figura 5.7: Extensão das inundações com períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.	58
Figura 5.8: Extensão da inundação simulada e real, ocorrida em 08/09/2011.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do Rio dos Cedros.	29
Tabela 4.2: Valores para cálculo da rugosidade de Manning.	35
Tabela 4.3: Espaçamento recomendado para as verticais.	37
Tabela 4.4: Número de pontos de medição de velocidade em cada vertical no Método Detalhado.	38
Tabela 5.1: Cobertura da área para de cada uso do solo.	48
Tabela 5.2: Parâmetros calculados para o método de Gumbel.....	49
Tabela 5.3: Vazões máximas estimadas para a estação Arrozeira.	49
Tabela 5.4: Vazões de simulação.	51
Tabela 5.5: Resultados das simulações.	53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas

EM-DAT - *Emergency Disaster Database*

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

GPS - *Global Positioning System*

HEC-RAS - *River Analysis System*

MNT - Modelo Numérico de Terreno

SDS - Secretaria de Desenvolvimento Sustentável

SIG - Sistema de Informações Geográficas

TIN - *Triangular Irregular Network*

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área molhada	[m ²]
A _i	Área molhada da iésima subdivisão	[m ²]
A _{cp}	Área molhada da subdivisão do canal principal	[m ²]
A _{md}	Área molhada da subdivisão da margem direita	[m ²]
A _{me}	Área molhada da subdivisão da margem esquerda	[m ²]
A _t	Área molhada total da seção	[m ²]
a	Coefficiente de correção da energia cinética	-
B	Largura de topo	[m]
C	Coefficiente de expansão e contração	-
g	Aceleração da gravidade	[m.s ⁻²]
h	Altura de escoamento da seção	[m]
h _e	Perda de carga	[m]
I _o	Declividade de fundo	[m.m ⁻¹]
L	Distância ponderada entre seções	[m]
L _{cp}	Distância entre o canal principal das seções	[m]
L _{md}	Distância entre margem direita das seções	[m]
L _{me}	Distância entre a margem esquerda das seções	[m]
N	Número de revolução por segundo	[Hz]
n	Coefficiente de rugosidade de Manning	-
n _i	Coefficiente de rugosidade de Manning da iésima subdivisão	-
P	Perímetro molhado	[m]
P _i	Perímetro molhado da iésima subdivisão	[m]
p	Probabilidade	-
Q	Vazão	[m ³ .s ⁻¹]

\bar{Q}_{cp}	Vazão média aritmética entre o canal principal das seções	$[m^3.s^{-1}]$
\bar{Q}_{md}	Vazão média aritmética entre a margem direita das seções	$[m^3.s^{-1}]$
\bar{Q}_{me}	Vazão média aritmética entre a margem esquerda das seções	$[m^3.s^{-1}]$
q	Capacidade de escoamento no canal	$[m^3.s^{-1}]$
q_i	Capacidade de escoamento da iésima subdivisão	$[m^3.s^{-1}]$
q_{cp}	Capacidade de escoamento do canal principal	$[m^3.s^{-1}]$
q_{md}	Capacidade de escoamento da margem direita	$[m^3.s^{-1}]$
q_{me}	Capacidade de escoamento da margem esquerda	$[m^3.s^{-1}]$
q_t	Capacidade total de escoamento na seção	$[m^3.s^{-1}]$
R_h	Raio hidráulico	$[m]$
R_{hi}	Raio hidráulico da iésima subdivisão	$[m]$
S_f	Declividade da linha de energia	$[m.m^{-1}]$
T	Período de retorno	$[anos]$
t	Tempo	$[s]$
U	Número de revoluções	-
V	Velocidade média do escoamento na seção	$[m.s^{-1}]$
v	Velocidade do fluxo d'água	$[m.s^{-1}]$
Y	Altura d'água na seção	$[m]$
y	Altura d'água	$[m]$
y_h	Altura hidráulica	$[m]$
Z	Elevação do fundo do canal principal	$[m]$
α	Parâmetro de escala	-
β	Parâmetro de posição	-
σ	Desvio padrão	-
θ	Ângulo de inclinação do canal	$[rad]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 Inundações	16
3.1.1 Mapa de Inundação.....	18
3.1.2 Estimativa de Eventos Extremos	19
3.2 Hidráulica de Canais Abertos	20
3.2.1 Elementos Geométricos dos Canais Abertos	20
3.2.2 Tipos de Escoamento em Canais Abertos.....	22
3.3 Modelagem Matemática.....	23
3.3.1 HEC-RAS	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Área de Estudo.....	28
4.2 Materiais Utilizados.....	31
4.3 Métodos	32
4.3.1 Elaboração do Mapa de Uso e Cobertura do Solo	32
4.3.2 Definição dos Coeficientes de Rugosidade de Manning	34
4.3.3 Preparação do Modelo Digital de Elevação.....	35
4.3.4 Determinação da Vazão nos Cursos D'água.....	36
4.3.5 Estimativa de Vazões Máximas.....	40
4.3.6 Aplicação do HEC-GeoRAS	41
4.3.7 Aplicação do modelo HEC-RAS	44
4.3.8 Avaliação da Simulação	45
5 RESULTADOS.....	47
5.1 Mapa de Uso e Cobertura do Solo	47
5.2 Vazões Máximas.....	49
5.3 Mapas de Inundação	51

5.4 Avaliação da Simulação.....	59
6 CONCLUSÃO	61
7 REFERÊNCIAS BIBIOGRÁFICAS.....	63
ANEXO.....	69

1 INTRODUÇÃO

A inundação   um evento natural que ocorre principalmente pelo extravasamento das águas do canal principal de drenagem, de sistemas naturais ou artificiais, para as áreas adjacentes, passando a ocupar áreas ribeirinhas, várzeas e planícies de inunda o. Quando ocorre em áreas ocupadas pelo homem e interage negativamente com a sociedade, passa a ser considerado um desastre natural.

Este tipo de desastre pode ter sua intensidade ampliada por a o es antrópicas que interfiram no ciclo hidrológico, como a impermeabiliza o do solo, remo o da cobertura vegetal, altera o es dos canais, constru o de reservatórios, ou pela ocupa o de áreas suscetíveis às inunda o es.

Segundo o EM-DAT (2012), as inunda o es ocorridas no Brasil, em 2011, afetaram cerca de 2,5 milhões de pessoas, causando 900 mortes e seus prejuízos econ micos chegaram a 1 bilhão de dólares. No estado de Santa Catarina, durante o período 1991-2010, cerca de 5,7 milhões de pessoas foram afetadas e foram registrados 4.054 óbitos em decorrência de inunda o es (CEPED UFSC, 2012).

Para o controle das inunda o es, podem ser tomadas medidas de caráter estrutural, quando são construídas obras de engenharia, ou de caráter não estrutural, quando são realizadas a o es preventivas em rela o aos eventos visando minimizar os prejuízos. As medidas preventivas, podem ser divididas em a o es de planejamento territorial, a o es de monitoramento, sistemas de alerta e evacua o. Uma ferramenta que pode apoiar ou fundamentar essas a o es são os mapas de inunda o.

Os mapas de inunda o podem auxiliar a tomada de decisões em rela o ao ordenamento urbano, aumentar a conscientiza o da popula o em rela o às áreas de risco e formas de evacua o. Além disso, pode melhorar o entendimento da dinâmica do extravasamento das águas nas áreas ribeirinhas auxiliando no planejamento de a o es de resgate e na defini o de áreas seguras para alocar pessoas afetadas.

Para prever a extensão da inunda o e elaborar mapas de inunda o podem ser utilizados modelos matemáticos, que representam o evento real por meio de equa o es matemáticas que relacionam seus parâmetros e comportamentos. O Modelo HEC-RAS tem sido usado com sucesso em estudos de previsão e reconstitu o de eventos

extremos de inundação (GHANBARPOUR, 2011; TIMBADIYA, 2011; TATE, 2002).

Como estudo de caso, foi escolhida a zona urbana do município Rio dos Cedros, no médio vale do Rio Itajaí, SC. O vale do Rio Itajaí é notoriamente conhecido por eventos de inundação desde sua ocupação por imigrantes europeus nos séculos passados e figura entre as áreas onde foram registrados os maiores números de inundações segundo CEPED UFSC (2012).

O objetivo geral deste estudo é gerar mapas de inundação de eventos com diferentes frequências de ocorrência para área urbana de Rio dos Cedros através de simulações com o modelo HEC-RAS.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Mapear as áreas de inundação na zona urbana do município de Rio dos Cedros (SC) por meio do modelo HEC-RAS.

2.2 Objetivos Específicos

- Estimar as vazões máximas para diferentes períodos de retorno para a bacia do Rio dos Cedros com base na série histórica;
- Gerar mapas de inundação para diferentes períodos de retorno para a bacia do Rio dos Cedros por meio do modelo HEC-RAS;
- Comparar os pontos de controle da inundação registrada pela Defesa Civil de Rio dos Cedros com a extensão da área gerada por meio do modelo HEC-RAS para o evento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inundações

Desastres naturais são eventos naturais que causam impacto na sociedade alterando o funcionamento dos sistemas vitais e infligindo perdas financeiras, físicas e humanas à população afetada (BENSON & CLAY, 2003; KOBAYAMA *et al.*, 2006). Segundo ECLAC (2003) e UNDP (2004), a magnitude dos desastres pode ser exacerbada pelas intervenções humanas no ambiente, tais como degradação ambiental e urbanização.

Inundação é o termo que define o extravasamento das águas do canal de drenagem principal de rios e córregos para as áreas adjacentes, tais como várzeas e planície de inundação ou leito maior (AMARAL & RIBEIRO, 2009). Tucci (2005) apresenta o fenômeno sobre uma perspectiva de desastre natural, definindo-o como a situação na qual o transbordamento do leito de escoamento passa a ocupar o espaço utilizado pela população para habitação, transporte, recreação, trabalho e etc.

A enchente, elevação temporária do nível d'água do canal de drenagem pelo aumento da vazão (BRASIL, 2007), é o processo que antecede a inundação, estes dois fenômenos ilustrados na Figura 3.1.

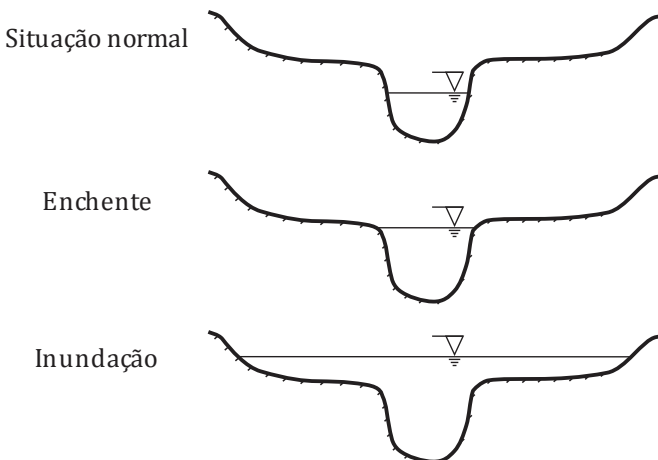


Figura 3.1: Ilustração de enchente e inundação.

Estes fenômenos de natureza hidrometeorológica estão relacionados, na maioria das vezes, com chuvas intensas, degelo ou outros eventos climáticos como furacões, tempestades e tornados, podendo ser agravados pelas ações antrópicas (BRASIL, 2007). Tucci (2011) afirma que as condições físicas da bacia também são importantes: tipo e cobertura do solo e características geomorfológicas (área, declividade e comprimento do rio).

Segundo Findlay & Taylor (2006), o aumento da impermeabilização do solo devido à urbanização modifica o regime hidrológico, diminuindo a infiltração e, conseqüentemente, elevando a vazão do escoamento superficial e reduzindo o tempo de concentração da bacia durante um evento de chuva, favorecendo a ocorrência de inundações. Além disso, desmatamento, mudanças nas práticas de agricultura, construção de reservatórios e mudanças nos canais e naturais de drenagem, como, retificações, canalizações, também são fatores contribuintes (TUCCI, 2011).

UFSC CEPED (2011) classifica os eventos relativos às inundações em dois grupos: inundações bruscas, que engloba também alagamentos e enxurradas; e inundações graduais, entendendo-se esta como sinônimo de enchente. Segundo Castro *et al.* (2007), estes fenômenos podem ser classificados quanto a sua evolução e magnitude. Quanto à magnitude podem ser divididos em inundações excepcionais, de grande magnitude, normais ou de pequena magnitude. Quanto à evolução são caracterizadas da seguinte maneira:

- Enchentes ou inundações graduais: o nível d'água aumenta lentamente, mantendo-se em situação de cheia por um período, e posteriormente, decresce gradualmente. Este tipo de inundação é normalmente cíclica e sazonal.
- Enxurradas ou inundações bruscas: são decorrentes de precipitações intensas e concentradas, em áreas de relevo acidentado, caracterizadas por elevações rápidas e violentas do nível d'água. Este tipo de fenômeno geralmente se apresenta furtivamente, requerendo um monitoramento intenso da bacia hidrográfica.
- Alagamentos: decorrentes do acúmulo de águas nas vias e perímetros urbanos, durante um evento de chuva, ocasionados pela deficiência do sistema de drenagem de águas pluviais.

- Inundações litorâneas: provocadas pela súbita invasão do mar: São provocados por fenômenos meteorológicos como ciclones tropicais, tempestades marinhas, ressacas e etc., que ocorrem normalmente em encostas pouco elevadas de continentes ou de ilhas rasas.

3.1.1 Mapa de Inundação

Medidas de controle de inundações podem ser classificadas em estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são obras de engenharia que interveem na bacia, interferindo nas relações chuva-vazão e/ou no rio, desenvolvendo-se na forma de construção de diques e reservatórios, desvio do escoamento e modificação da seção do rio. As medidas não estruturais estão ligadas à mitigação do evento de inundação e suas principais ferramentas são o zoneamento de áreas de inundação, seguro de enchente, previsão e sistemas de alerta de inundações (TUCCI, 2003).

Para que sejam tomadas decisões políticas na esfera do ordenamento territorial como meio de implementação de medidas não estruturais, tais como as apresentadas anteriormente, é necessária a elaboração do mapa de inundação (TUCCI, 2011). Todavia, Japan (2005) define como utilidade principal do mapa de inundação, melhorar a comunicação de informações sobre desastres e facilitar a evacuação segura dos residentes em situações de emergências, aumentando assim a atenção da população em relação à prevenção de desastres e prejuízos relacionados aos mesmos.

Um mapa de inundação é um mapa que apresenta a área que tem possibilidade de ser inundada em eventos de baixa, média e alta probabilidade de ocorrência e ainda pode ser complementados com: tipo de inundação, extensão, profundidade da lâmina d'água, velocidade e direção do fluxo (EXCIMAP, 2007). De acordo com Tanaka (2008) um mapa de inundação deve conter minimamente a área de inundação e informações úteis para a segura evacuação da população. Por outro lado, Tucci (2003), os divide em dois tipos, de planejamento quando apresenta as áreas atingidas para dado tempo de retorno e de alerta quando informa em cada ponto de controle o nível da régua limnimétrica necessário para que a inundação alcance aquele ponto.

3.1.2 Estimativa de Eventos Extremos

Para elaborar um mapa de inundação deve ser primeiramente estimada a grandeza do evento que se quer representar de acordo com sua probabilidade de ocorrência. O termo período de retorno, ou intervalo de recorrência, é amplamente utilizado em análise de frequência hidrológica e designa um valor médio do período de ocorrência do evento associado relacionando-o com sua probabilidade de ocorrência, conforme mostra a Equação 3.1.

$$T = \frac{1}{p} \quad (3.1)$$

onde T é o período de retorno; e p é a probabilidade.

Colocado de outra maneira, um evento que supere a média de 1 ano em 10 anos de registros tem uma probabilidade percentual de 10% de ser superada em qualquer ano (SINGH, 1992).

A partir da definição do período de retorno e uma série histórica de observações de vazão no rio de interesse pode ser estimada a magnitude de um evento extremo, com período de retorno definido, através de teoria de probabilidades e matemática estatística. Segundo Naghettini & Pinto (2007), a distribuição de valores extremos mais utilizada em estudos de vazões de enchentes, é a distribuição de valores extremos tipo I, mais conhecida como distribuição de Gumbel. Na distribuição de Gumbel a função de probabilidades acumuladas é dada por:

$$F(Q) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{Q-\beta}{\alpha} \right) \right] \quad \begin{array}{l} \text{para } -\infty < Q < \infty; \\ -\infty < \beta < \infty; \text{ e } \alpha > 0 \end{array} \quad (3.2)$$

onde Q é vazão; α é o parâmetro de escala; e β é o parâmetro de posição. Os parâmetros se relacionam da seguinte maneira:

$$\bar{Q} = \beta + 0,5772\alpha \quad (3.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2\alpha^2}{6} \quad (3.4)$$

onde \bar{y} é a média das vazões; e σ é o desvio padrão. A probabilidade acumulada pode ser descrita como:

$$F(Q) = 1 - \frac{1}{T(Q)} \quad (3.5)$$

3.2 Hidráulica de Canais Abertos

A principal característica do escoamento em canais abertos é a presença da pressão atmosférica atuando sobre a superfície do líquido. A superfície livre apresenta grande deformabilidade, ocasionando uma grande variação das condições de contorno, em nível espacial e temporal, originando uma série de fenômenos específicos, tais como ressaltos hidráulicos e remansos. Além disso, outra característica relevante dos escoamentos livres é a grande variabilidade das paredes e fundo dos canais em relação à sua forma e rugosidade, que também podem variar no tempo e no espaço. Esse conjunto de aspectos leva a complexas formulações matemáticas na solução de questões em relação aos canais abertos (BAPTISTA *et al.*, 2003).

Os canais podem ser naturais, cursos d'água encontrados no ambiente, como córregos, rios, estuários e etc., ou artificiais, construídos pelo homem, como canais de irrigação, de drenagem pluvial, aquedutos e etc. Em adição, podem ser classificados como prismáticos, se ao longo do comprimento têm seção reta e declividade de fundo constante, ou não prismáticos se possuem seção irregular e declividade de fundo variável (PORTO, 2003).

3.2.1 Elementos Geométricos dos Canais Abertos

Independente do tipo de canal estudado, diversos parâmetros são necessários para descrever as seções e declividades de interesse geometricamente. De acordo com a Figura 3.2, os principais elementos geométricos são:

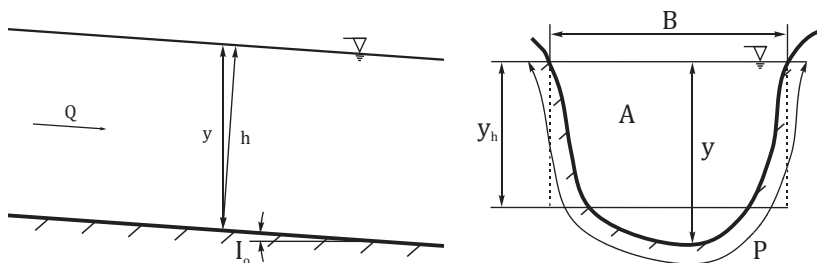


Figura 3.2: Elementos geométricos de um canal.

Fonte: adaptado de Porto (2003).

- a) *Área molhada (A)* é a área da seção transversal, normal à direção do fluxo, que é ocupada pelo líquido;
- b) *Perímetro molhado (P)* é o comprimento relativo ao contato do líquido com o conduto (paredes e fundo do canal);
- c) *Raio hidráulico (R_h)* é a razão entre a área molhada e o perímetro molhado;
- d) *Altura d'água (y)* é a distância vertical do ponto mais baixo do canal até a superfície livre;
- e) *Altura de escoamento da seção (h)* é a altura do escoamento normal ao fundo do canal;
- f) *Largura de topo (B)* é a largura da seção do canal na superfície livre;
- g) *Altura hidráulica (H)* é a razão entre a área molhada e a largura de topo;
- h) *Declividade de fundo (I_0)* é a declividade longitudinal do canal, a qual é geralmente baixa podendo ser expressa por $I_0 = \text{tg } \theta \cong \text{sen } \theta$.

3.2.2 Tipos de Escoamento em Canais Abertos

Segundo Chow (1959), os regimes de escoamento em canais abertos podem ser classificados de acordo com a mudança da altura d'água em relação ao tempo e ao espaço da seguinte forma:

- A. Escoamento permanente
 - 1. Escoamento uniforme
 - 2. Escoamento variado (não uniforme)
 - a. Escoamento gradualmente variado
 - b. Escoamento rapidamente variado
- B. Escoamento variável (não permanente)
 - 1. Escoamento uniforme
 - 2. Escoamento variado (não uniforme)
 - a. Escoamento gradualmente variado
 - b. Escoamento rapidamente variado

Escoamento permanente e escoamento variável: uso o tempo como critério comparativo. O escoamento em um canal aberto pode ser considerado permanente se a altura d'água não muda ou pode ser considerada constante durante o intervalo de tempo analisado. Contudo, se há variação da altura da linha d'água com o tempo, o escoamento é classificado como escoamento variável. Na maioria dos problemas de hidráulica de canais abertos é estudado o comportamento do escoamento sobre a condição de permanente, todavia, quando a maior preocupação é analisar a variação da vazão em relação ao tempo, com é o caso de estudos de inundações, o escoamento deve ser tratado como variável.

Escoamento uniforme e escoamento variado: usa o espaço como critério comparativo. Se a altura d'água é a mesma em cada seção do canal, o escoamento é dito uniforme. Porém, se ocorre mudança na altura da linha d'água nas diferentes seções, o escoamento é chamado de variado. O escoamento variado pode ser ainda classificado em gradualmente ou rapidamente variado, sendo definido como rapidamente variado nos casos onde a altura d'água varia abruptamente no espaço, como por exemplo, em ressalto hidráulicos.

3.3 Modelagem Matemática

Modelos são a representação simplificada de um objeto ou sistema real com o objetivo de prever seu comportamento, sua transformação ou sua evolução (CHISTOFOLETTI, 1999). Eles também podem ser vistos como aproximações seletivas onde, eliminando-se os detalhes incidentais, permitem que alguns aspectos fundamentais ou relevantes sejam percebidos (CHORLEY & HAGGET, 1967).

A modelagem matemática é caracterizada pelo uso de equações matemáticas para representar a natureza de um sistema complexo (FORD, 1999; CLARKE, 1973). Tucci (2005) comenta que estes tipos de modelos são muito versáteis, porque podem ser facilmente modificados para fornecer respostas para diferentes entradas rapidamente.

3.3.1 HEC-RAS

Hydrological Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) é um modelo matemático computacional gratuito desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América. O HEC-RAS possibilita a modelagem unidimensional de perfis d'água em situações de escoamento permanente e variável, transporte de sedimentos e qualidade de água. Para tanto, possui um sistema composto por uma interface gráfica, um módulo independente de análise de componentes hidráulicas e módulos de armazenamento e gerenciamento de dados, e de geração de relatórios em formato gráfico e tabular (USACE, 2010b).

O modelo tem pode ser aplicado em trechos ou sistemas dendríticos de canais naturais ou artificiais e tem como dados básicos de entrada, os aspectos geométricos das seções do canal, e rotinas de cálculos geométricos e hidráulicos comuns. Além das análises hidráulicas, ele ainda possibilita a adição de elementos de engenharia hidráulica aos canais, tais como bueiros, pontes, barragens, bacias de retenção e etc. (USACE, 2010b).

A componente de análise em escoamento permanente (*Steady Flow*) calcula os perfis d'água nas seções considerando o escoamento permanente gradualmente variado e permite a modelagem de regime supercrítico, subcrítico e misto. Esta componente é indicada para

aplicação em gerenciamento de planícies de inundação e estudos de seguro contra inundações.

O Modelo HEC-RAS tem sido usado com sucesso em estudos de previsão e reconstituição de eventos extremos de inundação (GHANBARPOUR, 2011; TIMBADIYA, 2011; TATE, 2002).

A seguir serão expostas as principais equações utilizadas pelo modelo retiradas do seu manual de referência (USACE, 2010b).

Os perfis d'água são calculados de uma seção para a outra pela resolução da equação da energia por meio de um processo iterativo chamado Método do Passo Padrão (*Standard Step Method*). Abaixo é apresentada a equação da energia entre duas seções de um canal e a representação de seus termos (Figura 3.3):

$$Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + h_e \quad (3.6)$$

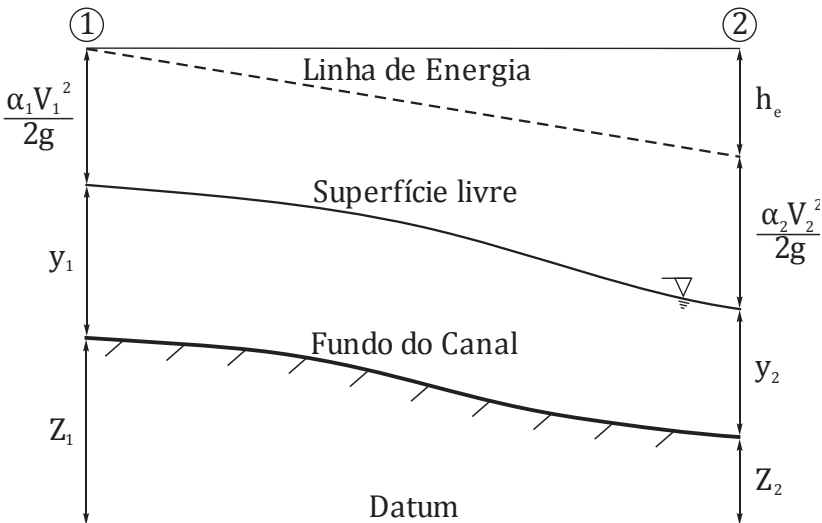


Figura 3.3: Representação dos termos da equação da energia.

Fonte: adaptado de USACE (2010).

onde Z_1 e Z_2 são as elevações do fundo do canal principal (m); Y_1 e Y_2 são as alturas d'água nas seções (m); V_1 e V_2 são as velocidades médias nas seções ($m.s^{-1}$) (razão entre vazão e área molhada); a_1 e a_2 são

os coeficientes de correção da energia cinética; g é a aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$); e h_e é a perda de carga (m).

A perda de carga entre as seções é composta pela perda por atrito e pela perda por expansão e contração e representada pela seguinte equação:

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (3.7)$$

onde L é a distância ponderada entre as duas seções (m); S_f é a declividade da linha de energia entre as duas seções ($m.m^{-1}$); e C é o coeficiente de perda de carga por expansão e contração das seções transversais.

A distância ponderada entre duas seções é calculada da seguinte forma:

$$L = \frac{L_{me} \bar{Q}_{me} + L_{cp} \bar{Q}_{cp} + L_{md} \bar{Q}_{md}}{\bar{Q}_{me} + \bar{Q}_{cp} + \bar{Q}_{md}} \quad (3.8)$$

onde L_{me} , L_{cp} e L_{md} são, respectivamente, a distância entre a margem esquerda, o canal principal e a margem direita das seções; e \bar{Q}_{me} , \bar{Q}_{cp} e \bar{Q}_{md} são, respectivamente, a vazão média aritmética entre a margem esquerda, o canal principal e a margem direita das seções.

Para calcular a capacidade de escoamento no canal (*conveyance*) e o coeficiente de velocidade para uma seção é necessário que o escoamento seja subdividido em escoamentos parciais, onde se assume que a velocidade é uniformemente distribuída. As subdivisões em escoamento parciais são definidas pelos pontos onde há uma mudança no coeficiente de rugosidade de Manning (Figura 3.4) e suas vazões calculadas através da seguinte forma da equação de Manning:

$$Q = q S_f^{1/2} \quad (3.9)$$

$$q_i = \frac{1}{n_i} A_i R_{hi}^{2/3} \quad (3.10)$$

onde q_i é capacidade de escoamento da i ésima subdivisão ($m^3 \cdot s^{-1}$); n_i é o coeficiente de rugosidade de Manning da i ésima subdivisão; A_i é a área molhada da i ésima subdivisão; e R_{hi} é o raio hidráulico da i ésima subdivisão.

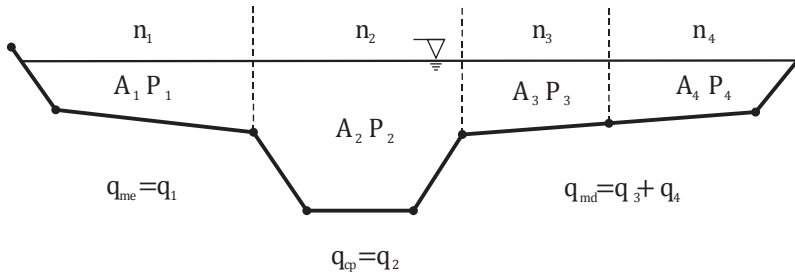


Figura 3.4: Subdivisões da seção para o cálculo da capacidade de escoamento no canal. **Fonte:** Adaptado de USACE (2010b).

As capacidades de escoamento nas subdivisões das margens são somadas para obtenção de um valor único para a margem esquerda e direita, sendo o canal principal geralmente computado como uma única subdivisão. O somatório de todas as capacidades parciais representa a capacidade total de escoamento na seção.

Para calcular o coeficiente de correção da energia cinética é necessário avaliar a energia cinética média para uma dada altura d'água na seção, sendo ela estimada somando-se ponderadamente a energia das três subdivisões principais do escoamento (margem esquerda, margem direita e canal principal). Dessa forma, usa-se a seguinte equação que relaciona a o coeficiente de correção da energia cinética média com a velocidade ponderada do escoamento nas subdivisões:

$$\alpha = \frac{(A_t) \left[\frac{q_{me}^3}{A_{me}^3} + \frac{q_{cp}^3}{A_{cp}^3} + \frac{q_{md}^3}{A_{md}^3} \right]}{q_t^3} \quad (3.11)$$

onde A_t é a área total da seção (m^2); A_{me} , A_{cp} e A_{md} são, respectivamente, a área da subdivisão da margem esquerda, do canal principal e da margem direita (m^2); q_t é a capacidade total de escoamento na seção ($m^3 \cdot s^{-1}$); q_{me} , q_{cp} e q_{md} são, respectivamente, a

capacidade de escoamento na subdivisão da margem esquerda, do canal principal e da margem direita.

A perda de carga por atrito é representada pelo produto da declividade da linha de energia e a distância ponderada entre as duas seções, onde a declividade da linha de energia é calculada pela equação de Manning (Equação 3.9). Sendo assim, ela é avaliada entre duas seções pela equação abaixo:

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{q_1 + q_2} \right)^2 \quad (3.12)$$

A perda de carga por expansão ou contração é assumida toda vez que ocorre mudança de velocidade de montante para jusante, expansão quando aumenta e contração quando diminui, sendo calculada pela seguinte fórmula:

$$h_e = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (3.13)$$

O modelo possui uma interface para ArcGIS, HEC-GeoRAS, que tem como função processar dados geoespaciais para serem utilizados na simulação. Suas ferramentas permitem criar um arquivo de importação do HEC-RAS contendo informações geométricas de um modelo digital de elevação e outros conjuntos de dados, tais como: cursos d'água, trechos, margens, perfis das seções, distância entre seções e coeficientes de rugosidade. Também podem ser adicionadas, bacias de detenção, barragens, pontes e etc. (USACE, 2011).

Os perfis d'água resultantes da modelagem também podem ser processados de modo a permitir a visualização de alturas d'água e limites de inundação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo é constituída pela área central da zona urbana do município de Rio dos Cedros (SC) (Figura 4.1).

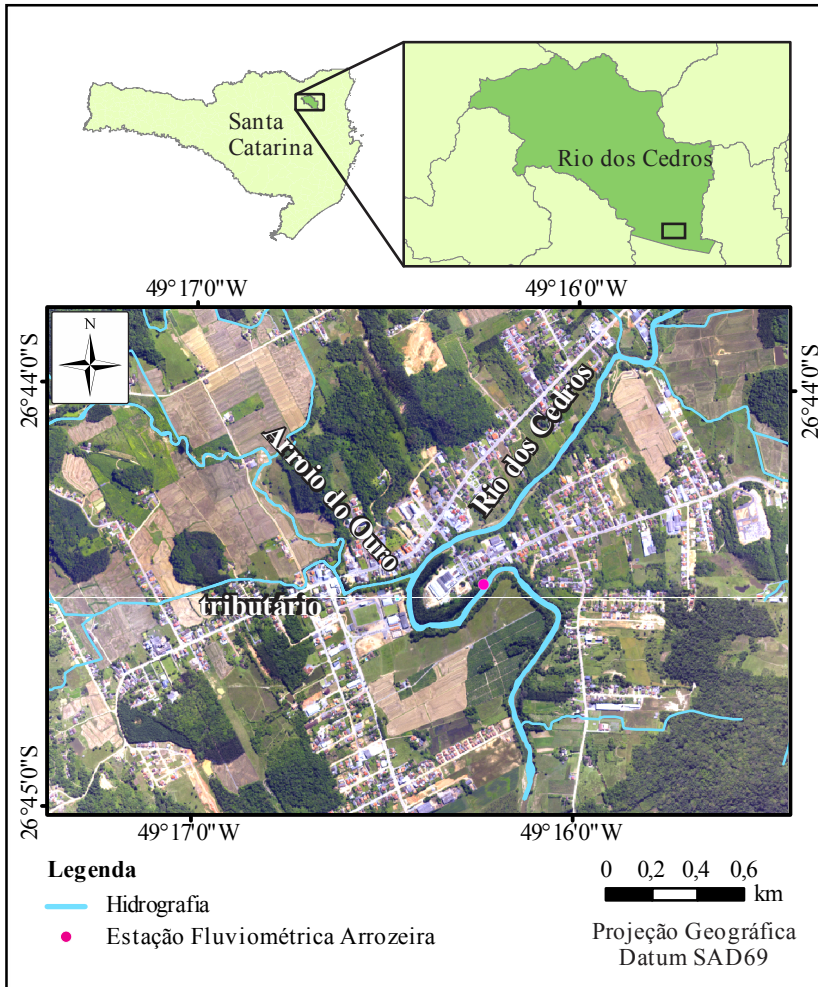


Figura 4.1: Localização da zona urbana de Rio dos Cedros.

O município de Rio dos Cedros está localizado no Médio Vale do Itajaí, entre as longitudes 49°12'50"O e 49°33'57"O e as latitudes 26°29'15"S e 26°46'22"S e sua zona urbana equivale a 2,5% da sua área total, caracterizando-o como rural. Segundo IBGE (2010), 10.284 pessoas residem na cidade, onde pouco mais da metade dos domicílios particulares permanentes estão localizados na zona urbana.

No que diz respeito à área utilizada para atividades agrícolas, 1947 hectares, se destacam as culturas de arroz (56,5%), milho (25,7%), banana (7,7%) e mandioca (6,7%). Além disso, o município possui áreas de silvicultura que produzem 120.064 metros cúbicos de lenha e madeira em tora ao ano (IBGE, 2011).

A bacia hidrográfica do Rio dos Cedros (Figura 4.2) possui área de aproximadamente 537 km² e duas barragens para geração de energia. O Rio dos Cedros é de 6ª ordem, segundo a hierarquia fluvial de Strahler (1952), e possui um comprimento total de cerca de 60,7 km. A seguir, são apresentados alguns dos parâmetros da análise morfométrica de bacias hidrográficas propostos por Christofolletti (1980) e calculados a partir de cartas topográficas digitais em escala 1:50.000 (EPAGRI, 2012)(Tabela 4.1):

Tabela 4.1: Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do Rio dos Cedros.

Parâmetro	Valor
Índice de circularidade	0,38
Fator de forma	0,40
Densidade de rios	2,78 rios.km ⁻²
Densidade drenagem	2,11 km.km ⁻²
Amplitude altimétrica	960 m
Altitude média e mediana	708 m e 783 m
Declividade média e mediana	11° e 9,8°

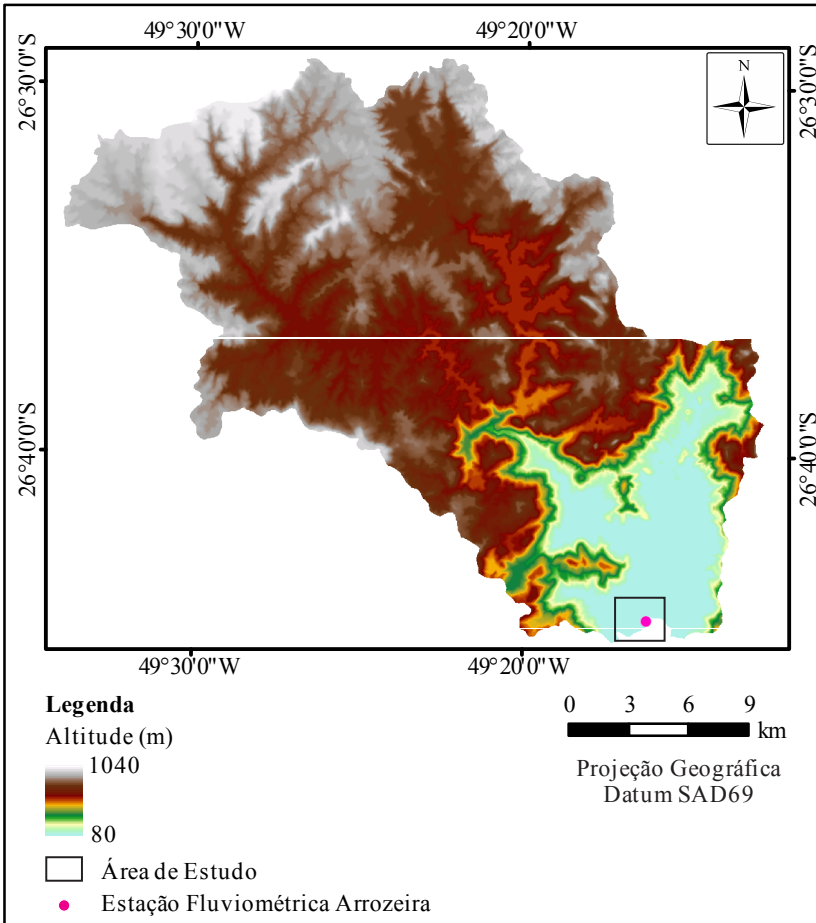


Figura 4.2: Mapa altimétrico da bacia hidrográfica do Rio dos Cedros.

Alguns estudos já foram realizados nesta bacia com o intuito de investigar os desastres naturais. Na subbacia do Rio Cunha, Rocha (2010) utilizou o modelo FLO-2D para simular o fluxo de detritos, Michel (2011) estudou escorregamentos por meio dos modelos SINMAP e SHALSTAB e Bortolotto (2011) realizou modelagem hidrossedimentológica com o SWAT. Corrêa (2011) utilizou o modelo FLO-2D para investigar as inundações na área urbana do município de Rio dos Cedros.

4.2 Materiais Utilizados

Abaixo são apresentados os materiais utilizados para o estudo:

- Software HEC-RAS 4.1.0 para a modelagem hidrodinâmica;
- Software ArcGIS 9.3 para elaboração dos mapas de inundação, extração de dados geométricos e de rugosidade de Manning (Extensão HEC-GeoRAS);
- Software SPRING 5.2.3 para elaboração do mapa de uso e cobertura do solo;
- Série histórica de vazão e curva de descarga da estação Arrozeira (código 83675000), localizada no município de Rio dos Cedros na latitude $26^{\circ}44'27''$ S, longitude $49^{\circ}16'14''$ O e altitude de 80 m. Série histórica de vazão e da estação Timbó Novo (código 83677000), localizada no município de Timbó na latitude $26^{\circ}49'47''$ S, longitude $49^{\circ}16'19''$ O e altitude de 70 m (ANA, 2012);
- Modelo numérico de terreno (MNT) (resolução espacial de 1 m), Hidrografia e ortofotos (RGB de resolução espacial de 0,39 m) da área obtidos do mapeamento aerofotogramétrico em escala 1:10.000, disponibilizado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS) do Estado de Santa Catarina; e
- Levantamento das seções batimétricas do Rio dos Cedros elaborado por Corrêa (2011);
- Informações de inundação presente no Plano de Contingências da Defesa Civil de Rio dos Cedros (PMRC, 2011).

4.3 Métodos

A Figura 4.3 apresenta o fluxograma com o resumo das principais etapas realizadas para o desenvolvimento deste estudo.

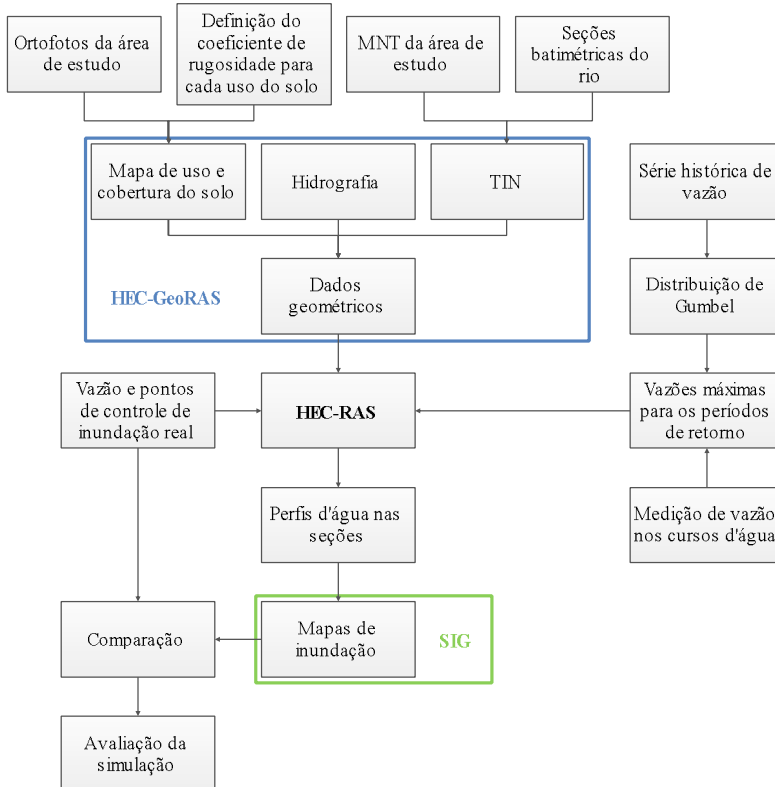


Figura 4.3: Fluxograma metodológico.

4.3.1 Elaboração do Mapa de Uso e Cobertura do Solo

O mapa de uso do solo foi criado a partir da ortofotos da área de estudo. Estas foram processadas no software SPRING 5.2.3 através do método de segmentação por crescimento de áreas e classificação supervisionada posteriormente.

A segmentação é um processo que divide a imagem digital em regiões espectralmente homogêneas, sendo algumas dessas áreas depois utilizadas pelo classificador (INPE, 2013). A segmentação foi realizada por crescimento de regiões onde foi definido o limiar de similaridade (teste de hipótese estatístico que determina a média entre os pixels e os agrupa em função de sua semelhança espectral) e a área mínima para a formação de um segmento.

As amostras de treinamento foram coletadas em função das classes de uso do solo apresentadas abaixo:

- *Curso d'água*;
- *Vegetação arbórea*: áreas com vegetação nativa em diferentes estágios de desenvolvimento;
- *Agricultura*: áreas com diferentes tipos de culturas permanentes e temporárias cultivadas na região;
- *Edificações e vias de tráfego*: áreas construídas, vias de circulação pavimentadas ou não e outras áreas impermeabilizadas;
- *Pastagem e vegetação arbustiva*: área com gramíneas e vegetação de baixo porte.

A partir da seleção de amostras representativas de cada classe e das respectivas bandas das ortofotos, foi realizado procedimento de classificação, segundo o método da distância de Battacharya.

As imagens foram classificadas e posteriormente editadas através de interpretação visual considerando critérios como, textura, cor, padrão, forma, e localização. Além desses critérios, foi considerado o conhecimento da área adquirido no trabalho de campo. Foram adicionadas as delimitações dos principais cursos d'água, obtidas da hidrografia, a fim de se ter uma delimitação mais refinada dos canais de drenagem.

Por fim, foi executado o mapeamento das classes, que permitiu a transformação das imagens em um mapa temático, contendo as diferentes classes de uso do solo da área de estudo.

4.3.2 Definição dos Coeficientes de Rugosidade de Manning

O coeficiente Manning é utilizado no HEC-RAS para calcular a capacidade de escoamento no canal e o coeficiente de velocidade nas seções. Fundamentalmente, o coeficiente é um fator de atrito que representa a resistência da superfície ao escoamento (PORTO, 2004).

A escolha desse parâmetro na calha principal dos cursos d'água seguiu a metodologia proposta por Cowan (1956) *apud* Chow (1959) onde o n é determinado a partir da caracterização física do canal:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad (4.1)$$

onde n_0 é o valor para um canal reto, uniforme, liso e livre de materiais naturais envolvidos; n_1 é o valor para correção dos efeitos das irregularidades da superfície; n_2 é o valor para correção das variações na forma e tamanho do canal através da seção; n_3 é o valor para correção das obstruções; n_4 é o valor para a vegetação e condições de escoamento; e m_5 é o fator de correção para as sinuosidades do canal. Desta maneira, os valores de n_0 , n_1 , n_2 , n_3 , n_4 e m_5 foram determinados por meio da Tabela 4.2.

A caracterização foi realizada com base em observações de campo e da ortofoto, sendo definidos os seguintes valores para o cálculo do n de Manning: canal arenoso ($n_0=0,020$); com grau de irregularidade insignificante ($n_1=0,005$); baixa alteração na seção transversal ($n_2=0,000$); sem efeitos de obstruções ($n_3=0,000$); baixa vegetação ($n_4=0,006$); e grau de sinuosidade apreciável ($m_5=1,150$). Dessa forma, o valor composto utilizado foi $n=0,0036$.

Para os demais usos do solo foram utilizados valores com base em Chow (1959): pastagem ($n=0,02$); vegetação arbórea ($n=0,045$); agricultura ($n=0,04$); e urbano ($n=0,06$).

Tabela 4.2: Valores para cálculo da rugosidade de Manning.

Condições do canal		Valores	
Material envolvido	Terra	n_0	0,020
	Rocha cortada		0,025
	Cascalho fino		0,024
	Cascalho grosso		0,028
Grau de irregularidade	Liso	n_1	0,000
	Insignificante		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variação na seção transversal	Gradual	n_2	0,000
	Alternando ocasionalmente		0,005
	Alternando frequentemente		0,010-0,015
Efeito relativo das obstruções	Desprezível	n_3	0,000
	Insignificante		0,010-0,015
	Apreciável		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetação	Baixa	n_4	0,005-0,010
	Média		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muito alta		0,050-0,100
Grau de sinuosidade	Insignificante	m_5	1,000
	Apreciável		1,150
	Severo		1,300

Fonte: Adaptado de Cowan (1956) *apud* Chow (1959).

4.3.3 Preparação do Modelo Digital de Elevação

O MNT serviu para a extração das características geométricas das seções, para a modelagem no HEC-RAS.

Foi necessária a correção do MNT com as informações das seções batimétricas do Rio dos Cedros, levantadas por Corrêa (2011), em função da falta de informações altimétricas abaixo da superfície do rio. Para tanto, foi adotada uma seção tipo para toda a extensão do rio modelado neste estudo. Foi assumida apenas uma seção como representativa de toda a extensão do canal, devido à semelhança das

seções levantadas e da baixa variabilidade da largura superficial do rio, observada em campo e na ortofoto.

A integração das informações batimétricas com o MNT foi realizada no software ArcGIS 9.3, através da ferramenta de álgebra de imagens, subtraindo-se os valores de profundidade no canal dos pixels de mesma localização geográfica no MNT.

4.3.4 Determinação da Vazão nos Cursos D'água

A determinação das vazões nos cursos d'água teve como objetivo encontrar uma proporção entre as descargas de dois cursos d'água sem monitoramento (Arroio do Ouro e um tributário) e a do Rio dos Cedros (monitorado). Esta proporção foi utilizada para definir vazões extremas no Arroio do Ouro e seu tributário com base nas calculadas para os diferentes períodos de retorno no Rio dos Cedros pela distribuição de Gumbel.

Para tanto, no dia 14 de junho de 2013 foram levantadas informações no Rio dos Cedros, Arroio do Ouro e tributário.

A determinação da vazão no Rio dos Cedros foi realizada pela leitura da régua limnimétrica da estação Arrozeira e posterior conversão da altura d'água medida em vazão através da curva-chave da estação (Figura 4.4).

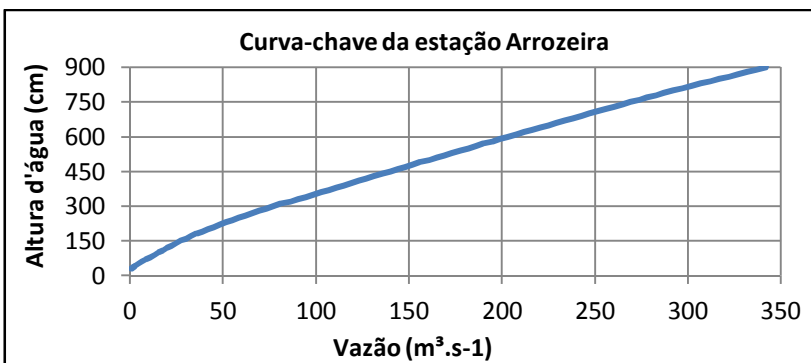


Figura 4.4: Curva-chave da estação Arrozeira

A vazão no Arroio do Ouro foi medida com o uso do molinete hidrométrico modelo OTT C2 e pelo método numérico da seção média.

O micromolinetete OTT C2 foi utilizado para medir o número de revoluções da hélice em um intervalo de tempo e transformar esses valores em velocidade, a partir das seguintes equações:

$$N = \frac{U}{t} \quad (4.2)$$

$$v = 0,1041N + 0,012 \quad \text{para } N \leq 4,0 \quad (4.3)$$

onde U é o número de revoluções; t é o tempo (s); N é número de revoluções por segundo (Hz); e v é a velocidade do fluxo d'água (m.s^{-1}).

O método da seção média foi baseado na determinação da área e velocidade média da seção (MARTINS & PAIVA,2003). Para isso, foram realizadas subdivisões da seção do canal através de verticais, onde foram medidas as velocidades com molinete, em diversos pontos, e altura d'água. A área da seção foi dividida e cada subseção foi limitada por duas verticais ou uma vertical e uma margem. O espaçamento entre as verticais (Tabela 4.3) e o número de medições de velocidade em cada vertical (Tabela 4.4) foi estabelecido de acordo com largura de topo e altura d'água do canal.

Tabela 4.3: Espaçamento recomendado para as verticais.

Largura de Topo (m)	Espaçamento (m)
até 3	0,20
3 a 6	0,50
6 a 15	1
15 a 30	2
30 a 50	3
50 a 80	4
80 a 150	5
150 a 250	8
Maiores de 250	12

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto (1998).

Tabela 4.4: Número de pontos de medição de velocidade em cada vertical no Método Detalhado.

Nº de pontos	Altura d'água ¹ (m)	Posição na vertical ^{2,3}	Cálculo da velocidade média na vertical (m.s ⁻¹)
1	0,15-0,6	0,6 y	$\bar{V} = V_{0,6}$
2	0,6- 1,2	0,2 e 0,8 y	$\bar{V} = \frac{(V_{0,2} + V_{0,8})}{2}$
3	1,2-2,0	0,2; 0,6 e 0,8 y	$\bar{V} = \frac{(V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8})}{4}$
4	2,0-4,0	0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 y	$\bar{V} = \frac{(V_{0,2} + 2V_{0,4} + 2V_{0,6} + V_{0,8})}{8}$
6	>4,0	S; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y e F	$\bar{V} = \frac{[V_S + 2(V_{0,2} + V_{0,4} + V_{0,6} + V_{0,8}) + V_F]}{10}$

¹: Altura d'água na vertical.
²: Posição na vertical em relação à altura d'água.
³: A posição S (Superfície) corresponde à altura d'água de 0,10m abaixo da superfície e a posição F (Fundo) corresponde àquela determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.

Fonte: Adaptado de ANA (2012).

Após as medições nas verticais da seção, a vazão foi calculada em função das velocidades médias em cada vertical, a altura d'água em cada vertical e a distância entre as verticais e a margem. A Figura 4.5 representa os termos do método da seção média e suas equações são apresentadas abaixo:

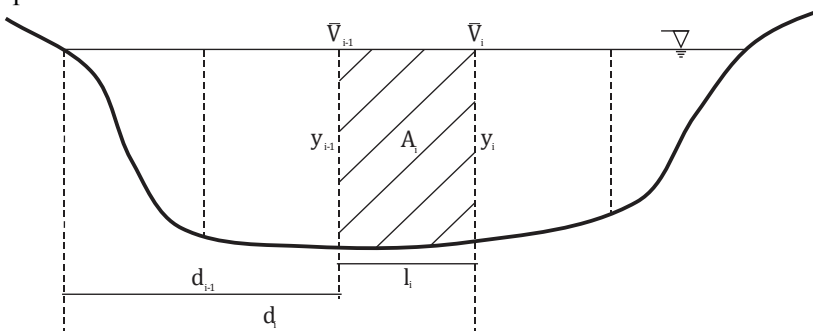


Figura 4.5: Representação dos termos do método da seção média para cálculo de vazões. **Fonte:** Adaptado de Martins & Paiva (2003).

$$\bar{V}_i^s = \frac{(\bar{V}_{i-1} + \bar{V}_i)}{2} \quad (4.4)$$

onde \bar{V}_i^s é a velocidade média na iésima subdivisão ($m.s^{-1}$); \bar{V}_{i-1} é velocidade média na vertical anterior à iésima subdivisão ($m.s^{-1}$); e \bar{V}_i é a velocidade média na vertical posterior à iésima subdivisão ($m.s^{-1}$).

$$l_i = d_i - d_{i-1} \quad (4.5)$$

onde l_i é largura da iésima subdivisão (m); d_{i-1} é a distância entre a margem e a vertical anterior à iésima subdivisão (m); e d_i é a distância entre a margem e a vertical posterior à iésima subdivisão (m).

$$A_i = l_i \frac{(y_{i-1} + y_i)}{2} \quad (4.6)$$

onde y_{i-1} é altura d'água na vertical anterior à iésima subdivisão (m); e y_i é a altura d'água na vertical posterior à iésima subdivisão (m).

$$Q = \sum_{i=1}^n \bar{V}_i^s A_i \quad (4.7)$$

A medição da vazão no tributário do Arroio do Ouro foi realizada com a partir da medição da altura d'água e diâmetro de um bueiro de concreto de seção circular, uma vez que não foi encontrado um trecho adequado para a medição com micromolinete. Foi utilizada a fórmula de Manning para o cálculo a partir dos parâmetros obtidos em campo, a inclinação do terreno no MNT:

$$Q = \frac{1}{n} A R_n^{2/3} S_f^{1/2} \quad (4.8)$$

onde Q é vazão ($m^3.s^{-1}$); n é o coeficiente de rugosidade de Manning; A é a área molhada da seção (m^2); e R_n é o raio hidráulico da seção (m).

4.3.5 Estimativa de Vazões Máximas

A estimativa de vazões máximas foi realizada por meio da distribuição de Gumbel para o Rio dos Cedros.

Para tanto, foi analisada a série histórica da estação Arrozeira para verificar falhas de medição. Posteriormente, foram comparados os hidrogramas das estações Arrozeira e Timbó. A estação de Timbó possui área de contribuição de 1.600 km², sendo a bacia da estação Arrozeira (área de contribuição de 537 km²) sua sub-bacia. Para cada dia com falha na estação Arrozeira foi verificado o valor da descarga medida na estação Timbó. Caso a vazão registrada em Timbó fosse menor que a vazão máxima anual medida na estação Arrozeira, considerou-se que a vazão não registrada em Arrozeira não seria seu evento máximo anual. Para os casos em que a vazão registrada em Timbó foi maior do que a máxima anual em Arrozeira, aquele ano foi retirado da série histórica.

Uma vez excluídos os anos com falhas, foram selecionados os dados de máxima vazão média diária anual e calculadas sua média e desvio padrão de modo a obter os parâmetros α e β pelas Equações 3.3 e 3.4, respectivamente, para por fim calcular as vazões máximas pela equação da distribuição de Gumbel para os períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos (Equações 3.2 e 3.5).

A escolha dos períodos de retorno para o estudo foi feita com base na recomendação de EXIMAP (2007) que sugere que sejam elaborados mapas de inundações para eventos com frequências de ocorrência alta, média e baixa.

Para a estimativa das vazões máximas do Arroio do Ouro e do seu tributário foi calculada a relação de descarga estimada com os dados do dia 14 de junho de 2013:

$$R_{di} = \frac{Q_i}{Q_{RDC}} \quad (4.9)$$

onde R_{di} é a razão entre a vazão do Arroio do Ouro ou tributário; Q_i é a vazão do Arroio do Ouro ou tributário; e Q_{RDC} é vazão no Rio dos Cedros.

Por fim, foram determinadas as vazões máximas no Arroio do Ouro e tributário, multiplicando-se R_{di} pelas vazões máximas calculadas para o Rio dos Cedros pela distribuição de Gumbel.

4.3.6 Aplicação do HEC-GeoRAS

A aplicação do HEC-GeoRAS teve como objetivo auxiliar a extração de dados geométricos das seções dos cursos d'água para entrada no modelo HEC-RAS. O HEC-GeoRAS foi utilizado em ambiente SIG no software ArcGIS 9.3 onde foram necessários o MNT, a ortofoto, a hidrografia e o mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.

Primeiramente, foram criadas linhas que representam o sistema de cursos d'água e suas margens, direta e esquerda, a partir da hidrografia da área. Este processo dividiu o sistema em cinco trechos de modelagem (Figura 4.6): alto Arroio do Ouro, baixo Arroio do Ouro, tributário, alto Rio dos Cedros e baixo Rio dos Cedros. Posteriormente, foram construídas linhas de fluxo onde a linha de fluxo central foi igualada à linha dos cursos d'água e as linhas de fluxo direta e esquerda foram traçadas paralelas às suas respectivas margens.

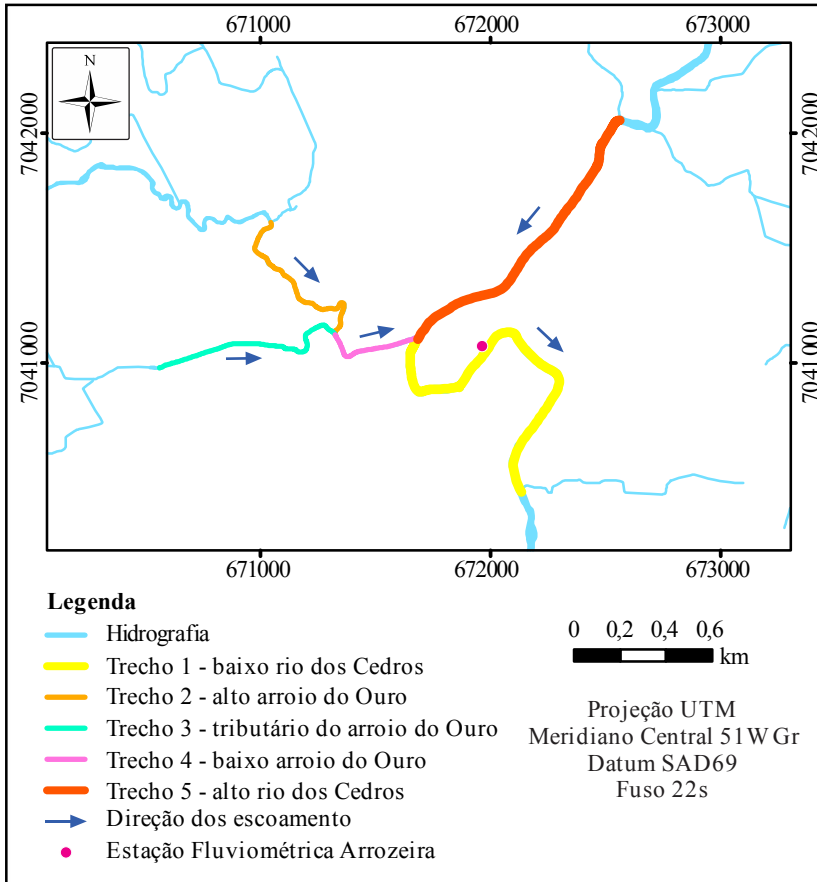


Figura 4.6: Sistema de hidrografia e sua divisão nos trechos de modelagem.

As seções para as simulações no HEC-RAS foram criadas como linhas perpendiculares aos cursos d'água abrangendo o canal e a planície de inundação (Figura 4.7). A definição das extensões destas linhas foi feita com base na visualização do sistema de cursos d'água e suas margens, apresentados na Figura 4.5, e do MNT da área. Foram também traçadas linhas representando as pontes existentes no trecho do baixo Arroio do Ouro e alto Rio dos Cedros com o auxílio da ortofoto.

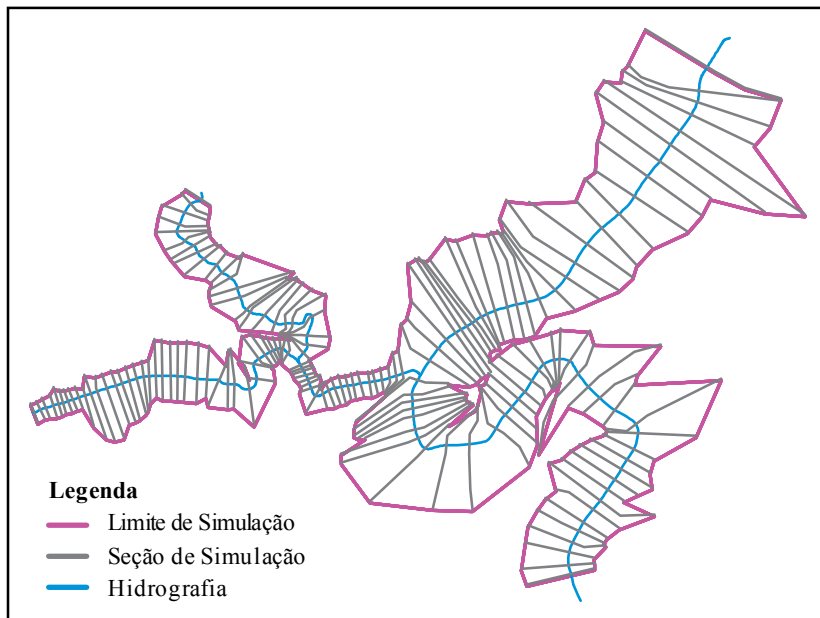


Figura 4.7: Seções de simulação.

O MNT foi transformado em um *Triangular Irregular Network* (TIN) e dele foram extraídas todas as informações geométricas das diversas linhas criadas. Já do mapa de uso e cobertura do solo foram extraídas as características da rugosidade para cada parte das seções de simulação definidas.

Por fim, foram exportadas as informações geométricas das seções e o sistema de cursos d'água, margens e linhas de fluxo em formato compatível com o HEC-RAS. A Figura 4.8 ilustra as características geométricas de uma seção de simulação.

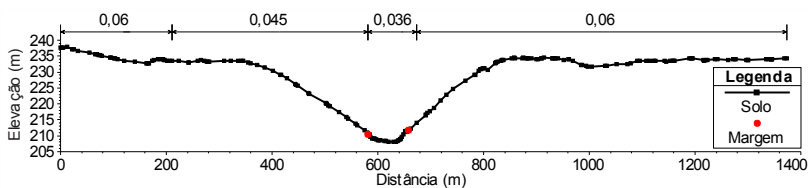


Figura 4.8: Características geométricas de uma seção.

4.3.7 Aplicação do modelo HEC-RAS

As áreas inundadas foram mapeadas por meio do modelo HEC-RAS para os diferentes períodos de retorno. Para isso, os dados geométricos das seções tiveram que ser verificados e trabalhados, e os regimes de escoamento e vazões de simulação definidos.

Os dados geométricos das seções criados no HEC-GeoRAS foram importados para o HEC-RAS e analisados para verificar a efetividade da abrangência do canal e da planície de inundação. As seções das pontes foram também analisadas e modificadas para representar sua geometria real da melhor maneira.

As simulações foram realizadas em regime permanente de escoamento e as vazões de entrada para cada trecho foram inseridas no seu ponto de montante, tornando a modelagem de característica supercrítica. Em cada trecho foi considerada a vazão de simulação constante, ou seja, não foram considerados acréscimos de vazão por decorrentes de fenômenos hidrológicos ou atividades antrópicas.

As vazões de simulação para cada evento extremo foram definidas como:

- Trecho 1 – baixo Rio dos Cedros: vazão estimada pela distribuição de Gumbel;
- Trecho 2 – alto Arroio do Ouro: proporção R_{di} (Equação 4.9) da vazão do Trecho 1;
- Trecho 3 – tributário do Arroio do Ouro: proporção R_{di} (Equação 4.9) da vazão do Trecho 1;
- Trecho 4 – baixo Arroio do Ouro: soma das vazões do Trecho 2 e 3;
- Trecho 5 – alto Rio dos Cedros: diferença entre o Trecho 1 e 4.

Para melhor entendimento desta lógica, sugere-se visualizar a Figura 4.5 onde foram estabelecidos os trechos de simulação e a direção dos fluxos nos cursos d'água.

Depois de inseridos os dados de vazão para os trechos, para cada período de retorno, foi realizada uma simulação, na qual a estimativa dos perfis d'água nas seções foi feita pelo Método do Passo Padrão (*Standard Step Method*). A determinação da altura d'água desconhecida em uma seção é feita no HEC-RAS pela solução iterativa da equação da energia (Equação 3.6) e da equação da perda de carga (Equação 3.7). A

sequência do procedimento computacional para sua estimativa é apresentado abaixo:

- 1) É adotada uma altura d'água na seção de montante ou jusante, dependendo se estiver sendo calculado um perfil subcrítico ou supercrítico, respectivamente;
- 2) A partir da altura d'água definida é calculada a capacidade total do escoamento e velocidade média correspondente;
- 3) Com os valores calculados no passo 2, é estimada a declividade da linha de energia e, assim, é definida a perda de carga pela Equação 3.7;
- 4) Tendo os valores calculados no passo 2 e 3, é resolvida a Equação 3.6 e encontrado um valor de altura d'água para a seção de interesse.
- 5) São comparadas a altura d'água calculada no passo anterior com aquela assumida no passo 1 e, assim, repetem-se os passos de 1 a 5 até que os valores apresentem uma diferença inferior a 0,003 m.

Determinados os perfis d'água nas seções, estes foram importados para o *software* ArcGis 9.3, onde foram elaborados os mapas de inundação.

A importação dos resultados das simulações no HEC-RAS para o SIG permitiu a espacialização dos resultados em forma de vetor e matriz. Isto permitiu a visualização polígonos representando as áreas submersas, assim como uma matriz de pixels com informações de profundidade da água.

4.3.8 Avaliação da Simulação

A avaliação da modelagem por meio do HEC-RAS foi feita através da comparação do resultado de uma simulação de um evento real de inundação com dados obtidos de um registro histórico, documentado no Plano de Contingências da Defesa Civil do município de Rio dos Cedros (PMRD, 2011). O evento real ocorreu em 08/09/2011, sendo registrada a altura da água de 7,73 m na régua limnimétrica da estação Arrozeira e tiradas fotos de diferentes locais da cidade.

A simulação foi executada similarmente aquelas realizadas para os diferentes períodos de retorno, porém, os dados de entrada foram ajustados em relação à vazão gerada no evento pela transformação da

cota máxima medida (7,73 m) em vazão, por meio da curva-chave da estação Arrozeira.

Na Figura 4.9 são apresentadas as localizações das áreas inundadas e posição de tomadas das fotografias registradas durante a inundação de 08/09/2011. As fotografias utilizadas são apresentadas no Anexo.

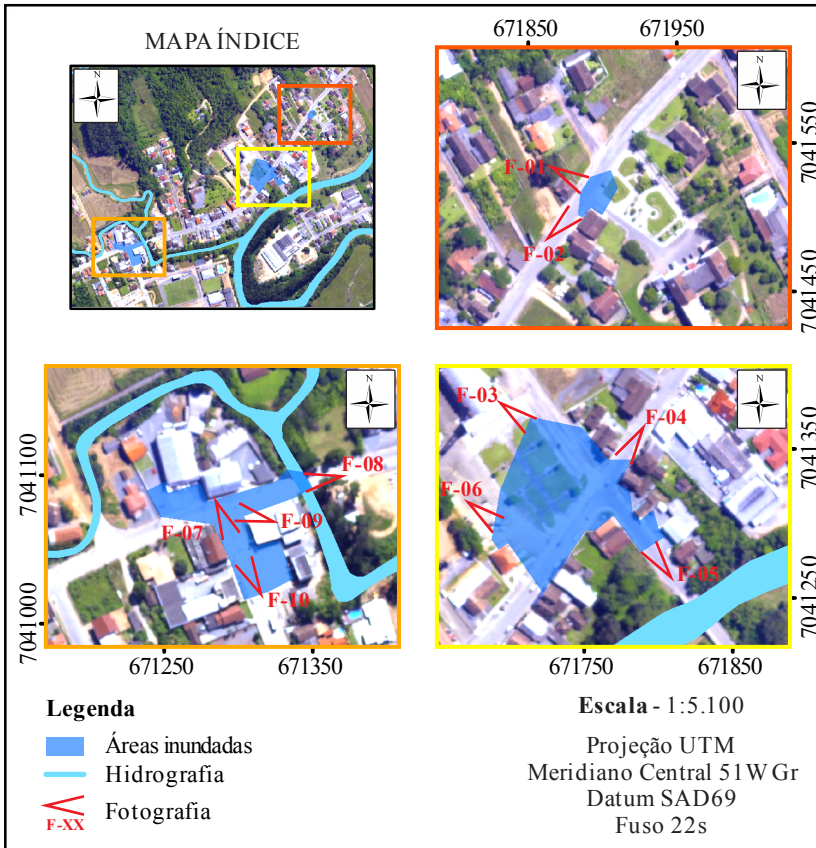


Figura 4.9: Localização dos pontos de controle e fotografias da inundação registrada. **Fonte:** Adaptado de PMRC (2011)

5 RESULTADOS

5.1 Mapa de Uso e Cobertura do Solo

O Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo é representado pela Figura 5.1 e a Tabela 5.1 apresenta porcentagem de cobertura de cada uso do solo.

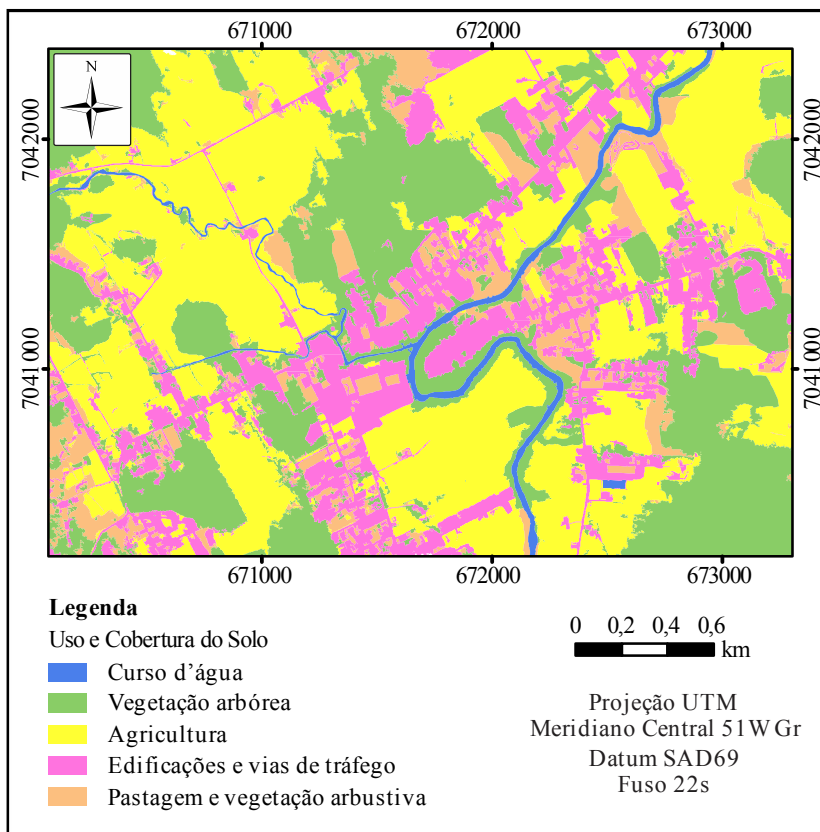


Figura 5.1: Mapa de uso e cobertura do solo.

Tabela 5.1: Cobertura da área para de cada uso do solo.

Uso e Cobertura do Solo	Área (km²)	Área (%)
Curso d'água	1,3	2
Vegetação arbórea	22,0	31
Agricultura	28,3	40
Edificações e vias de tráfego	12,8	18
Pastagem e vegetação arbustiva	7,0	10

As áreas urbanizadas ocupam 18% da área total. É possível observar na Figura 5.1 que estão dispostas próximas aos cursos d'água, ocasionando faixas de mata ciliar estreitas e muitas vezes inexistentes. Esta adjacência evidencia uma susceptibilidade da área urbana à variação do regime fluviométrico do Rio dos Cedros.

Áreas cultivadas apresentaram a maior porcentagem, cobrindo 40% da área de estudo. Estão localizadas em áreas planas e, em alguns pontos, se estendem até as margens dos cursos d'água. Além disso, nesta área do município predomina a rizicultura.

As áreas de vegetação arbórea possui a segunda maior área de cobertura (31%). Estas localizam-se principalmente em morros, em áreas com alta declividade cobertas majoritariamente por vegetação nativa, e nas margens do trecho 1 (baixo Rio dos Cedros) onde há predomínio de eucaliptos plantados.

5.2 Vazões Máximas

A estimativa das vazões máximas da estação Arrozeira, realizada pelo método de Gumbel, utilizou a descarga máxima dos anos de 1930 a 1967, 1978 a 1982, 1984 a 1993, 1996 a 1999 e 2001 a 2004, totalizando 61 registros. A Tabela 5.2 apresenta os principais parâmetros calculados para a aplicação da distribuição de Gumbel (Equação 3.2) e a Tabela 5.3 apresenta os valores estimados para os períodos de retorno definidos.

Tabela 5.2: Parâmetros calculados para o método de Gumbel

Parâmetro	Valor
Média (\bar{Q})	159,7 m ³ .s ⁻¹
Desvio padrão (σ)	60,5 m ³ .s ⁻¹
Parâmetro de escala (α)	47,2
Parâmetro de Posição (β)	132,5

Tabela 5.3: Vazões máximas estimadas para a estação Arrozeira.

Período de retorno (anos)	Vazão (m ³ .s ⁻¹)
2	149,8
5	203,3
10	238,7
20	272,7
50	316,6
100	349,6

As vazões aferidas em campo, no dia 14/06/2013, foram: 0,031 m³.s⁻¹ para o tributário do Arroio do Ouro, 0,089 m³.s⁻¹ para o Arroio do Ouro e 11,940 m³.s⁻¹ para o Rio dos Cedros. Estes valores resultaram nas relações de descarga de 0,26% e 0,75% da vazão do Rio dos Cedros, para o tributário do Arroio do Ouro e Arroio do Ouro, respectivamente. A Figura 5.2 apresenta os locais onde foram realizadas as medições de vazão.

A vazão correspondente ao evento de inundação de 08/09/2011, calculada através do valor da altura da água apresentada no Plano de Contingência do município de Rio dos Cedros, foi de 279,5 m³.s⁻¹. Este

valor corresponde a um evento com período de retorno de cerca de 23 anos, segundo os parâmetros apresentados na Tabela 5.2.

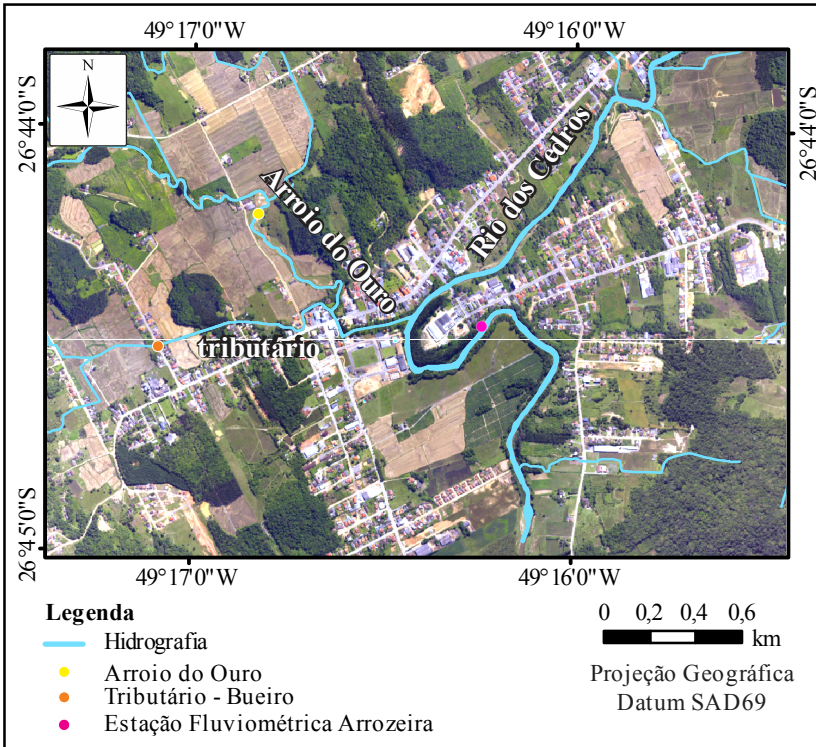


Figura 5.2: Localização dos pontos de medição de vazão.

A partir das vazões máximas calculadas, da vazão registrada em 08/09/2011 e das relações de descarga estabelecidas, foram definidas as vazões de simulação em cada trecho para os diferentes períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos e para o evento de 08/09/2011 (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Vazões de simulação.

Período de retorno (anos)	Vazão (m³.s⁻¹)				
	Trecho 1 baixo Rio dos Cedros	Trecho 2 alto Arroio do Ouro	Trecho 3 tributário do Arroio do Ouro	Trecho 4 baixo Arroio do Ouro	Trecho 5 alto Rio dos Cedros
2	149,8	1,12	0,39	1,51	148,3
5	203,3	1,52	0,53	2,05	201,3
10	238,7	1,78	0,62	2,40	236,3
20	272,7	2,03	0,71	2,75	269,9
50	316,6	2,36	0,83	3,19	313,5
100	349,6	2,61	0,92	3,52	346,1
Evento simulado 08/09/2011	279,5	2,08	0,73	2,82	276,7

5.3 Mapas de Inundação

As Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam a extensão das inundações simuladas para os períodos de retorno de 5, 20, 50 e 100 anos, respectivamente. Os mapas representativos dos eventos de período de retorno de 2 e 10 anos não foram apresentados juntos às figuras abaixo em função de: i) não haver extravasamento do canal para áreas relevantes no evento de 2 anos; ii) os resultados das simulações para 5 e 10 anos foram muito semelhantes, não havendo um aumento representativo da extensão da inundação que justificasse a elaboração de mais um mapa.

Com base na Figura 5.3 é possível perceber que já ocorrem extravasamentos dos canais para áreas edificadas adjacentes aos cursos d'água, sendo identificadas casas atingidas principalmente no ponto de encontro do Arroio do Ouro com seu tributário e logo a jusante desse ponto (trecho do baixo Arroio do Ouro). Também nota-se que a inundação começa a se projetar em áreas de canais naturais de drenagem, especialmente no trecho do baixo Rio dos Cedros, invadindo áreas de agricultura do lado esquerdo e uma via de tráfego do lado

direito. No trecho do alto Rio dos Cedros a água já toma uma grande área de pastagem na margem direita à montante da ponte.

Para o período de retorno de 20 anos (Figura 5.4), o avanço da água sobre os canais de drenagem naturais se intensifica. A inundação sobre a área urbanizada próxima do encontro do Arroio do Ouro com seu tributário aumenta. Ocorre um grande aumento da mancha de inundação na parte de jusante do trecho do alto Arroio do Ouro. No trecho do alto Rio dos Cedros inicia o avanço da água sobre as edificações em sua margem direita,   jusante e   montante da ponte.

A Figura 5.5 mostra a mancha de inundação para o evento de 50 anos, onde a avenida paralela ao trecho do alto Rio dos Cedros começa a apresentar pontos de inundação. Há um crescimento no extravasamento dos canais nos trechos do alto Arroio do Ouro e seu tributário, sendo que pela sobreposição da mancha de inundação   ortofoto, constata-se que na maior parte desses trechos a largura do canal triplica. Na margem direita do trecho do alto Rio dos Cedros, há um notável avanço da água sobre uma área cultivada (localizada na porção nordeste).

O mapa do evento de 100 anos (Figura 5.6) mostra um aumento da área inundada na avenida principal da cidade, especialmente próximo   ponte do Rio dos Cedros. Também   muito pronunciado o aumento da área inundada nos trechos do alto Arroio do Ouro e seu tributário.

A Figura 5.7 apresenta a sobreposição da extensão da inundação de todos os períodos de retorno simulados. A partir deste mapa,   possível entender facilmente a dinâmica da inundação modelada para a área de estudo.

Resumidamente, em relação ao Rio dos Cedros, nota-se um avanço gradual da água sobre os canais naturais de drenagem e sobre as áreas edificadas na margem direita do trecho do alto Rio dos Cedros (próximo   ponte). Na avenida principal (centro da figura), ocorre uma inundação evidente para o evento de 100 anos. No restante; o aumento da extensão da inundação   pequeno.

Nos trechos do alto Arroio do Ouro e seu tributário ocorrem as maiores variações de área, todavia, são cobertas por lavoura e/ou pastagem na maior parte. No trecho do baixo Arroio do Ouro, a mancha de inundação varia pouco a cada evento e a água atinge apenas algumas casas contíguas ao curso d' gua.

Os resultados mostram que as áreas que sofrem maior extravasamento do canal estão nos trechos do alto Arroio do Ouro e seu

tributário. Em relação ao número de edificações atingidas, a inundação de período de retorno 20 anos é a mais significativa, pois atinge 21 das 35 construções atingidas pelo evento de 100 anos. Além disso, o Arroio do Ouro e seu afluente possuem o maior número de edificações atingidas, evidenciando a sua maior importância em relação inundações.

A Tabela 5.5 apresenta os resultados das simulações. Com base nesta, é possível perceber um aumento notável da altura d'água (47%) e da área inundada (72%) entre as simulações de 2 e 100 anos. Este comportamento pode ser explicado pela característica plana do relevo da área de estudo, assim como pela resolução espacial do MNT utilizado (1 m).

Tabela 5.5: Resultados das simulações.

Período de retorno (anos)	Altura d'água[*] (m)	Área inundada (km²)
2	4,57	0,183
5	5,25	0,214
10	5,65	0,235
20	6,01	0,258
50	6,45	0,288
100	6,74	0,314
* : Altura d'água calculada pelo modelo na seção à jusante da estação Arrozeira no trecho do baixo Rio dos Cedros.		

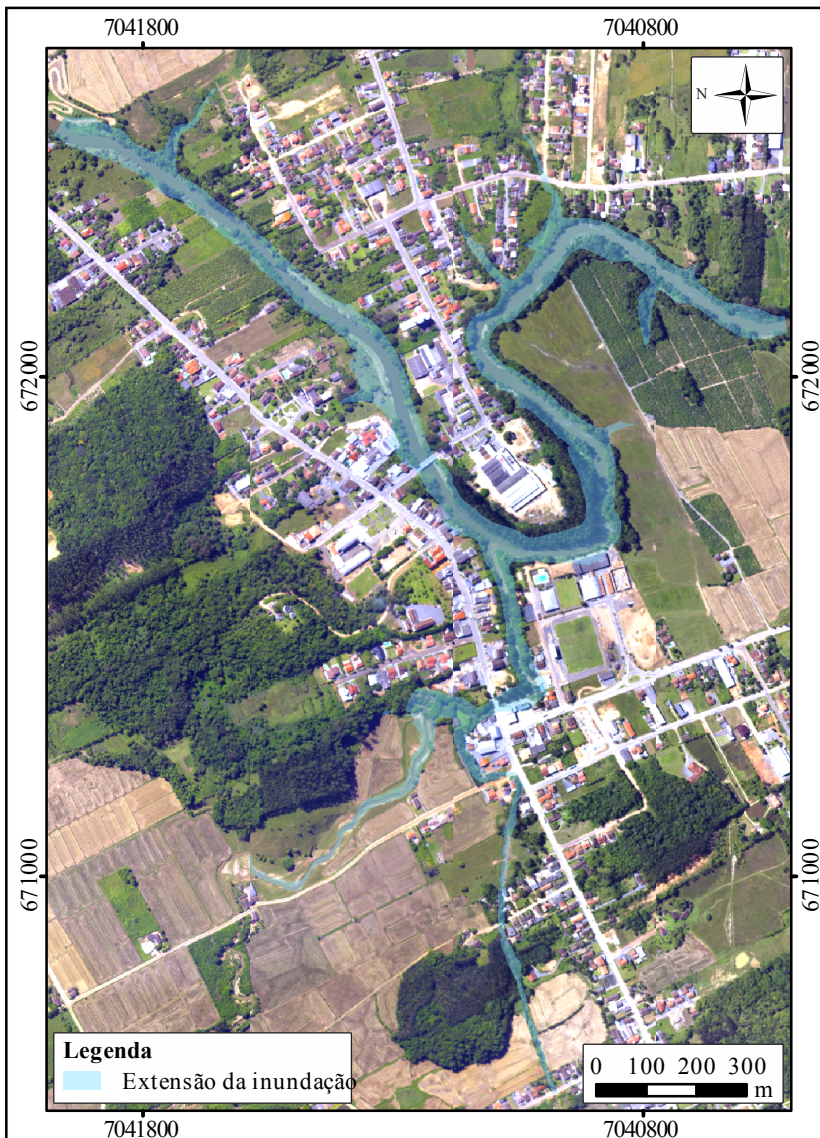


Figura 5.3: Extensão da inundação com período de retorno de 5 anos.



Figura 5.4: Extensão da inundação com período de retorno de 20 anos.



Figura 5.5: Extensão da inundação com período de retorno de 50 anos.

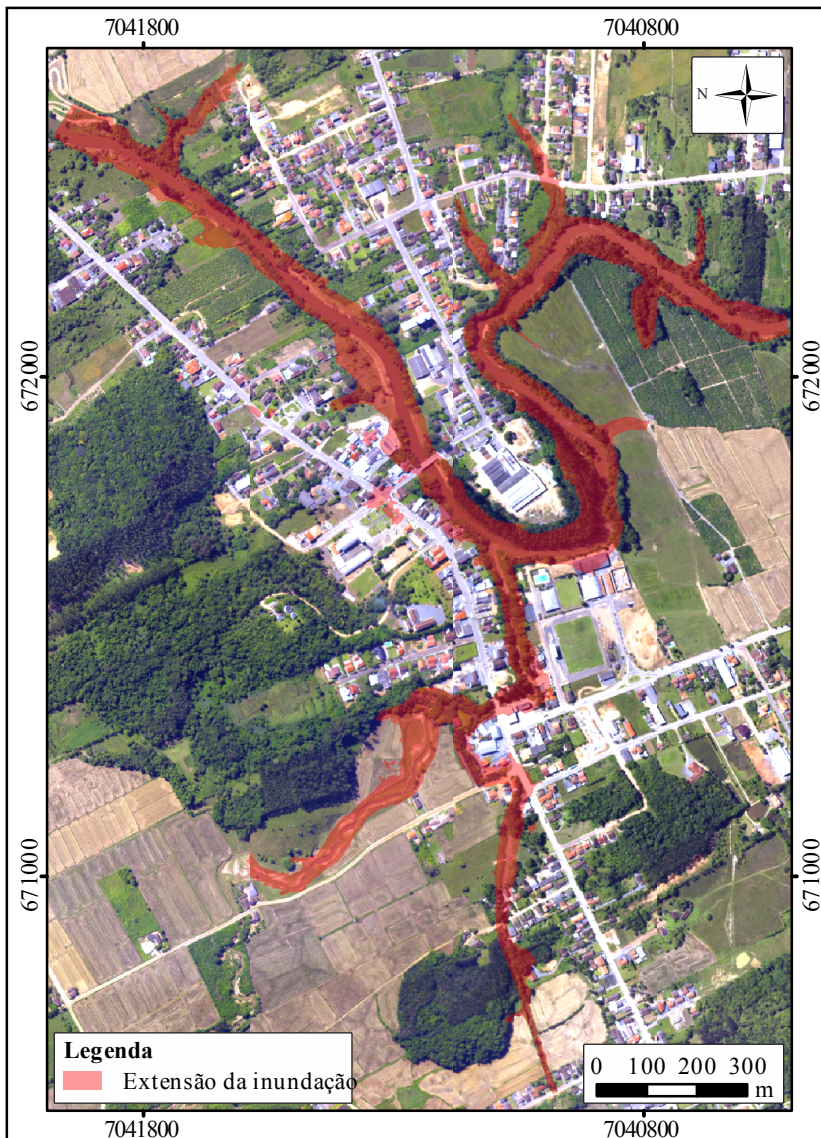


Figura 5.6: Extensão da inundação com período de retorno de 100 anos.

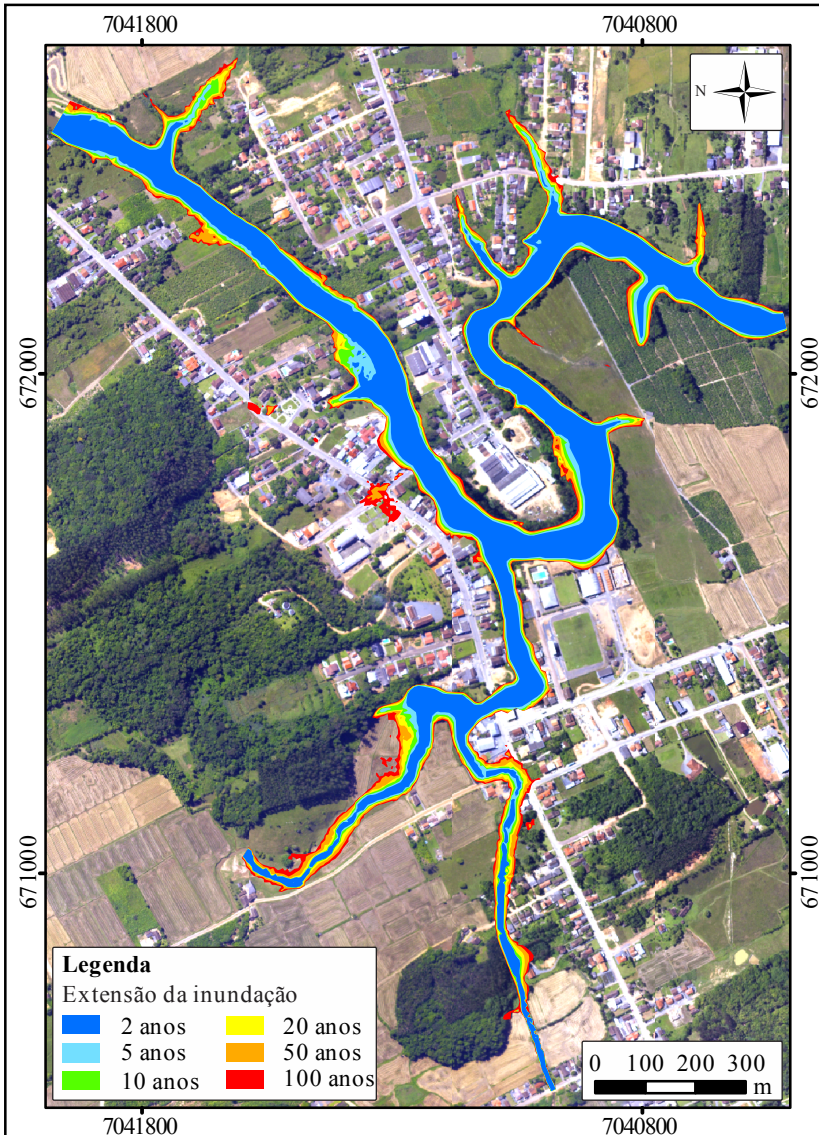


Figura 5.7: Extensão das inundações com períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

5.4 Avaliação da Simulação

A Figura 5.8 apresenta as áreas inundadas para o evento de 08/09/2011 e a extensão da inundação simulada para o mesmo. Nesta figura é possível visualizar que há pequena sobreposição da mancha de inundação simulada sobre a área inundada do evento real em dois pontos na região (b), sendo a mais pronunciada aquela sobre a ponte do Arroio do Ouro. Além desses pontos, é possível visualizar uma mínima sobreposição da mancha modelada e uma proximidade de seus limites em (c). O resultado subestimado da simulação fica mais evidente na região (a), pois o afastamento entre as áreas é cerca de 100 m.

Dentre as hipóteses que podem explicar estas diferenças é que, segundo informações da Defesa Civil, ocorrem alagamentos nas áreas (a) e (b) em decorrência da entrada d'água da enchente no sistema de drenagem de águas pluviais, ou seja, ao invés de drenar, o sistema passa a encher estas áreas mais baixas antes mesmo de haver o extravasamento do Rio dos Cedros. Outra hipótese é que ocorre a invasão das águas do Rio dos Cedros no Arroio do Ouro, causando uma superelevação do nível d'água no canal e, conseqüentemente, um maior extravasamento em (b), todavia não pode ser descartado o acontecimento conjunto da hipótese anterior também para esta região.

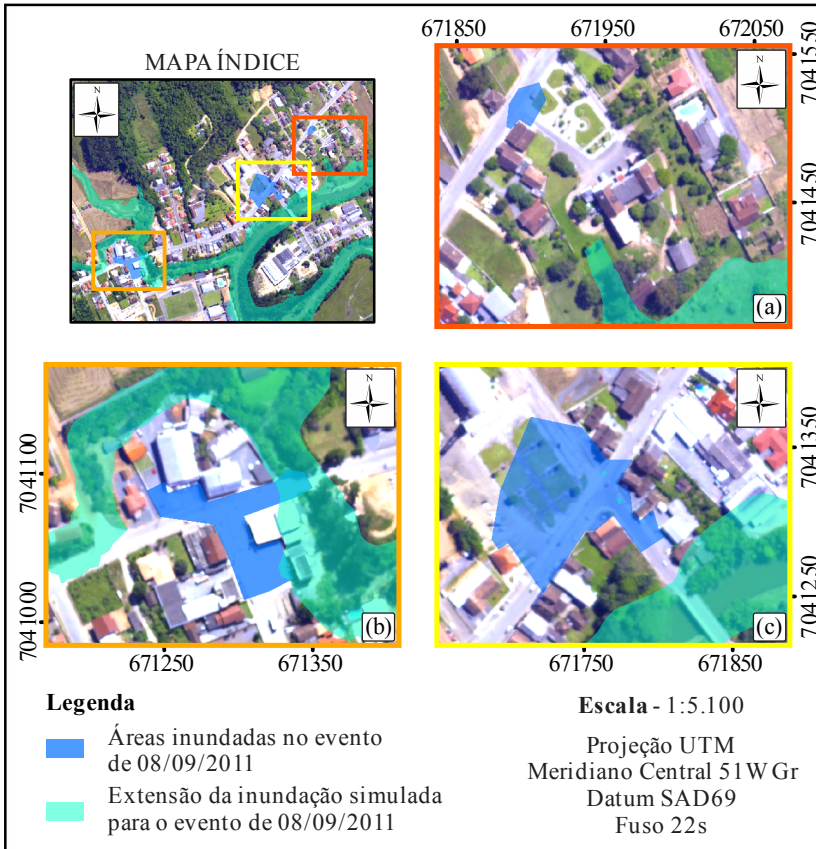


Figura 5.8: Extensão da inundação simulada e real, ocorrida em 08/09/2011.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho mapeou as áreas de inundação na zona urbana do município de Rio dos Cedros a partir de dados fluviométricos, informações de altimetria, hidrografia e ortofotos em escala 1:10.000, aplicados ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS, com suporte de um SIG e ferramentas HEC-GeoRAS.

A partir dos mapas de extensão da inundação simulados para os diferentes períodos de retorno, pode-se perceber a dinâmica do extravasamento dos cursos d'água sobre as áreas contíguas. Todavia, o modelo apresentou um resultado subestimado quando comparadas as áreas inundadas registradas em um evento real com a simulação equivalente. A principal hipótese para este comportamento está relacionada a fenômenos que não foram considerados na simulação, podendo-se citar: os alagamentos causados pelo retorno da água do Rio dos Cedros pelo sistema de drenagem urbana; e o possível remanso do Rio dos Cedros no Arroio do ouro e seus afluentes.

A partir dos mapas obtidos foi possível identificar que, mesmo para os eventos de menores períodos de retorno, algumas áreas são mais suscetíveis à inundação. Dentre elas, destacam-se vias de tráfego e edificações no entorno da ponte do Rio dos Cedros e na região da confluência do Arroio do Ouro e seu tributário. Cabe também destacar o aumento areal acentuado da mancha de inundação nos trechos do alto Arroio do Ouro e seu tributário, apesar do uso do solo ser predominantemente de agricultura e pastagem.

Em relação ao uso do solo, é possível perceber que as áreas edificadas estão localizadas muito próximas aos cursos d'água. Isto evidencia um planejamento urbano inadequado ou até inexistente que acarretou na ocupação de áreas de inundação natural dos rios e arroios.

Para estudos futuros recomenda-se que:

- Realizar um levantamento batimétrico detalhado do Rio dos Cedros;
- Proceder a simulações para ajustar os coeficientes de Manning visando calibrar o modelo;
- Verificar a possibilidade da ocorrência de inundação em função do retorno de água pelo sistema de drenagem de águas pluviais e do remanso causado pelo Rio dos Cedros;

- Executar um levantamento em campo da extensão de um evento de inundação por meio de informações da comunidade utilizando um aparelho de GPS de precisão topográfica;
- Realizar estudos hidrológicos de modelagem chuva-vazão que analisem a influência das barragens, presentes na bacia do Rio dos Cedros, nas enchentes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Orientação para Operação de Estações Hidrométricas**. Brasília: ANA, SGH, 2012. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaOperacaoDeEstacoesHidrometricas-VersaoJun12.pdf>>. Acesso em: Dezembro de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **HidroWeb: Sistema de Informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: Dezembro de 2012.

AMARAL, R; RIBEIRO, R. R. Inundações e enchentes. In: TOMINAGA, L.K; SANTORO, J; AMARAL, R. (orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edigar Blücker Ltda., 1998. 670 p.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P; CIRILO, J. A. (orgs.). CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica Aplicada: Coleção ABRH 8**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. 621 p.

BENSON, C.; CLAY E. J. Disasters, Vulnerability and the Global Economy. In: KREIMER, A.; ARNOLD, M. (eds.). **Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk**. Disaster Risk Management Series n. 3. Washington: The World Bank, 2003. p. 3-32.

BORTOLOTTO, N. L. **Avaliação hidrossedimentológica da bacia do Rio Cunha, município de Rio dos Cedros, Santa Catarina com o Modelo SWAT**. 2011. 101 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

BRASIL. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (orgs.). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

CASTRO, A. L. C.; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. C. **Manual de Desastres: Desastres Naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 182 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1980. 200 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Physical and Information Models in Geography**. London: Methuen & Co, 1967. 245 p.

CHOW, V. T. **Open-channel Hydraulics**. International Student Edition. New York: McGraw –Hill, 1959. 680 p.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, v. 19, p. 1-20. 1973.

CORRÊA, G. P. **Aplicação do modelo FLO-2D para determinação das áreas de inundação em Rios dos Cedros/SC**. 2011. 84 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

COWAN, W. L. **Estimating Hydraulic Roughness Coefficients**. Agriculture Engineering v. 37 (7), p. 473-475, July, 1956.

ECONOMIC COMMISSION FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN – ECLAC. **Handbook for Estimating the Socioeconomic and Environmental Effects of Disasters**. Washington: The World Bank, 2003. 357 p.

EM-DAT. The OFDA/CRED Emergency Disaster Database. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: Dezembro de 2012.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA – EPAGRI. **Mapas digitais de Santa Catarina**. Disponível em: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca>>. Acesso em: Novembro de 2012.

EUROPEAN EXCHANGE CIRCLE ON FLOOD MAPPING – EXCIMAP. **Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe**. Netherlands: EXIMAP, November, 2007. 57 p. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/flood_atlas/pdf/handbook_goodpractice.pdf>. Acesso em: Novembro de 2012.

FINDLAY, S.J.; TAYLOR, M.P. Why rehabilitate urban river systems? **Area**. v. 38.3, p. 312-325, September, 2006.

FORD, A. **Modeling the Environment**. Washington: Island Press, 1999. 402 p.

GHANBARPOUR, M. R.; SALIMI, S.; SARAVI, M. M.; ZAREI, M. **Calibration of River Hydraulic Model Combined with GIS Analysis using Groud-Based Observation Data**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology v. 3(5), p. 456-463, 2011.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. **Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>>. Acesso em: Maio de 2013.

JAPAN. **Flood Hazard Mapping Manual in Japan**. Flood Control Division, River Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (eds.), June, 2005. 75 p. Disponível em: http://www.icharm.pwri.go.jp/publication/pdf/2005/flood_hazard_mapping_manual.pdf>. Acesso em: Novembro de 2012.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/Livro%20%28Prevencao%20de%20Desastres%20Naturais%29.pdf>>. Acesso em: Outubro de 2012.

MARTINS, E. S. P. R.; PAIVA, J. B. D. Quantidade dos Recursos Hídricos. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (orgs.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 531-566.

MICHEL, G. P. **Estudo de escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com os modelos SHALSTAB e SINMAP**. 2011. 84 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 600 p. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?inford=981&sid=36>>. Acesso em: Novembro de 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO DOS CEDROS – PMRD. **Enchentes: Plano de Contingência 2010/2011 versão 4.0**. Rio dos Cedros: PMRC, 2011. 38 p. Disponível em: <<http://www.riodoscedros.sc.gov.br/>>. Acesso em: Junho de 2013.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 2003. 540 p.

ROCHA, H. L. **Aplicação do modelo FLO-2D para simulação de fluxos de detritos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SINGH, V. P. **Elementary Hydrology.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992. 973 p.

STRAHLER, A.N. **Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topography.** In: Bull. G.S.A., 63, pp. 1117-1142, 1952.

TANAKA, S. **Local Disaster Management and Hazard Mapping.** ICHARM, October, 2008. 47 p. Disponível em: <http://www.icharm.pwri.go.jp/publication/pdf/2008/local_disaster_management_hazard_mapping.pdf>. Acesso em: Novembro de 2012.

TATE, E. C.; MAIDMENT, D. R.; OLIVEIRA, F.; ANDERSON, D. J. **Creating Terrain Model for Floodplain Mapping.** Journal of Hydrologic Engineering v. 7, p. 100-108, 2002.

TIMBADIYA, P. V.; PATEL, P. L.; POREY, P. D. **Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India.** Journal of Water Resource and Protection v. 3, p. 805-811. 2011.

TUCCI, C. E. M. **Integrated Urban Flood Management.** Cap-Net/UNPD & WMO, September, 2011. Disponível em: <<http://www.cap-net.org/content/integrated-urban-flood-management>>. Acesso em: Novembro de 2012.

TUCCI, C. E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.) **Inundações Urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 45-141. Disponível em: <<http://www.eclac.cl/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/InBr02803.pdf>>. Acesso em: Novembro de 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM – UNDP. **Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York: UNDP, 2004. 130p. Disponível em: <http://www.icharm.pwri.go.jp/publication/pdf/2008/local_disaster_management_hazard_mapping.pdf>. Acesso em: Outubro de 2012.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS: User's Manual, version 4.3.93**. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2011. 244 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS: User's Manual, version 4.3.93**. Davis, EUA: Hydrologic Engineering Center, 2011. 244 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS – USACE. **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, version 4.0**. Davis, EUA: Hydrologic Engineering Center, 2010b. 244 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES – UFSC CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Santa Catarina**. Florianópolis: UFSC CEPED, 2011.

ANEXO

Fotografias utilizadas na localização das áreas inundadas no evento de 08/09/2011 (Figura 4.9)



F-01



F-02



F-03



F-04



F-05



F-06



F-07



F-08



F-09



F-10