

LUCAS MENEZES FELIZARDO  
ENGº AGRÔNOMO

**Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG)  
para modelagem de eventos críticos de vazão em uma  
microbacia urbana**

Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA  
ORIENTADOR

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia  
- UNESP - Campus de Ilha Solteira, para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de  
Conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias  
Ambientais.

Ilha Solteira

2016

## Ficha Catalográfica

### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F316a Felizardo, Lucas Menezes.  
Aplicação de sistema de informações geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana / Lucas Menezes Felizardo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016  
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2016

Orientador: Jefferson Nascimento De Oliveira  
Inclui bibliografia

1. Modelagem de micro bacia urbana. 2. Sistema de Informações geograficas. 3. Sensoriamento remoto.

# Folha de Julgamento



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana.

AUTOR: LUCAS MENEZES FELIZARDO

ORIENTADOR: JEFFERSON NASCIMENTO OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora:

PROFESSOR DOUTOR JEFFERSON NASCIMENTO OLIVEIRA  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia

PROFESSOR DOUTOR MAURICIO AUGUSTO LEITE  
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

PROFESSOR ADJUNTO MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS DAS NEVES  
Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento / UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Ilha Solteira, 01 de fevereiro de 2016

## **Dedicatória**

Dedico esta dissertação a minha mulher e a  
minha família pelo apoio de todas as horas.

“Uma inteligência que, em qualquer instante dado, soubesse todas as forças pelas quais o mundo natural se move e a posição de cada uma de suas partes componentes, e que tivesse também a capacidade de submeter todos estes dados à análise matemática, e pode-se colocar na mesma fórmula os movimentos dos maiores objetos do universo e aqueles dos menores átomos; nada seria incerto para ele, e o futuro, assim como o passado, estaria presente diante de seus olhos”.

Pierre Simon Laplace

## **Agradecimentos**

A minha família, por todo o amparo sem o qual não é possível passar alguns dos empecilhos da vida.

A minha companheira Gláucia, pelo apoio em todos os momentos, meu escudo, minha fortaleza.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira, por ter me concedido sua instrução.

Aos amigos que de maneira de direta ou indireta deram seu apoio para a confecção dessa dissertação.

Aos professores Dr. Milton Dall'Aglio Sobrinho, Dr. Tsunao Matsumoto, Dr. José Augusto de Lollo, Dr. Mauricio Augusto Leite, Dr. Geraldo Wilson Jr. e a professora Dr.<sup>a</sup> Liliane Lazzari Albertin, que com seus ensinamentos abriram os meus horizontes de conhecimento, para as mais diversas áreas dos recursos hídricos, sem o qual não poderia desenvolver esse trabalho.

Ao professor Dr. João Luiz Boccia Brandão e a toda equipe do projeto HIDROECO da EESC-USP, que com sua ajuda me possibilitou realizar esse trabalho.

As minhas amigas do LH<sup>2</sup>, Cícera e Caroline, pela amizade e disposição em ajudar.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, que sempre que solicitados me deram o suporte para elaboração desse trabalho.

## Resumo

FELIZARDO, L. M. **Aplicação de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para modelagem de eventos críticos de vazão em uma microbacia urbana.** 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2016

Com o aumento da população mundial e com sua concentração cada vez maior no meio urbano uma gama de problemas vem se apresentando relacionado a esse aumento populacional de maneira direta ou indireta, esse êxodo das pessoas para os grandes centros urbanos vem alterando o espaço geográfico desse ambiente bem rapidamente, principalmente na região do sudeste brasileiro onde os processos de industrialização são mais evidentes. Com essa migração a ocupação e o uso do solo vêm sendo ocupada nem sempre da forma que os planos diretores das cidades recomendam proporcionando na maioria dos casos impactos negativos nos recursos naturais. As alterações antrópicas realizadas nessas áreas, como desmatamento e a urbanização, estão promovendo um desequilíbrio ao meio ambiente afetando áreas drenadas pelas bacias hidrográficas, a complexidade do ambiente urbano e de sua infraestrutura de drenagem tem uma influência inerente no escoamento superficial, este escoamento gera inundações urbanas, que impõe desafios à modelagem, a simulação destes cenários exigem dados detalhados de elevação. Os problemas acarretados pela ocupação desordenada da bacia vêm sendo abordados em inúmeros estudos de casos que demonstram que o uso e ocupação do solo de forma inadequada e desordenada, muitas vezes, com obras mal dimensionadas, acarretam grandes prejuízos socioeconômicos. O planejamento integrado de uma bacia urbana é o único meio de viabilizar seus usos, sem que isso acarrete em um maior desequilíbrio do meio físico, e nesse cenário que com os dados de obtidos da bacia do Córrego do Mineirinho foi feito a modelagem de cenários de eventos de precipitação e seus possíveis efeitos no meio físico com compilações e um único software. O córrego do mineirinho e outras bacias da região já vem sendo estudadas por inúmeros pesquisadores seus resultados obtidos com múltiplas ferramentas computacionais se mostram compatíveis com os que obtivemos com o uso de apenas um software para realizar todas as fases do processo desde o pré-processamento de imagens de satélite a produção de modelos em 3D de inundações de eventos de precipitação em inúmeros cenários.

**Palavras-chave:** Inundações. Sistemas de informações geográficas. Modelagem computacional. Bacias urbanas.

## **Abstract**

**FELIZARDO, L. M. System application of Geographical Information (GIS) paragraph Events Modeling flow Critics in An urban watershed.** 2016. 98 f. Dissertation (MA) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2016.

With the increasing world population and its increasing concentration in urban areas a range of issues has been presented related to this population increase directly or indirectly, this exodus of people to large urban centers is changing the geographic space that environment very quickly, especially in the Brazilian southeast region where industrialization processes are most evident. With this migration the occupation and land use have been busy not always the way the master plans of cities recommend providing in most cases negative impacts on natural resources. Anthropogenic changes made in these areas, as deforestation and urbanization, are promoting an imbalance to the environment affecting the watershed drained areas, the complexity of the urban environment and its drainage infrastructure has an inherent influence on runoff, this flow generates floods urban, which poses challenges to modeling. The simulation of these scenarios require detailed elevation data. The problems posed by irregular occupation of the basin have been addressed in numerous studies that demonstrate that the use and occupation of inappropriate and disorderly manner, often with poorly scaled works, present major socioeconomic losses. Integrated planning of an urban basin is the only means of enabling their uses, without incurring a greater imbalance in the physical environment, and in this scenario with data obtained from Mineirinho Stream basin was made scenario modeling precipitation events and their potential effects on the physical environment with a unique compilations and software. The stream Mineirinho and other basins in the region has already been studied by numerous researchers their results with multiple computational tools to show compatible with those obtained using only one software to perform all phases of the process from the pre-processing satellite images to produce 3D models of flood precipitation events in many scenarios.

**Keywords:** Floods. Geographies information systems. Computer modeling. Urban watersheds.



## **Lista de Figuras**

- Figura 1** – Delimitação de uma bacia hidrográfica e sua sub-bacia
- Figura 2** – Diferenças entre alagamento, enchente e inundação
- Figura 3** – Crescimento da população Urbana no Mundo 1950-2050
- Figura 4** – Comportamento da expansão urbana de São Carlos
- Figura 5** – Processamento de imagens
- Figura 6** – Apresentação das principais técnicas de processamento de imagens segundo um modelo geral de divisão
- Figura 7** – Classificação de imagens de satélite
- Figura 8** – Representação gráfica do método Curva Número (CN - SCS)
- Figura 9** – Hidrograma triangular unitário do SCS
- Figura 10** – Composição das camadas em um SIG
- Figura 11** - Representações esquemáticas
- Figura 12** – Layout do programa Hec-HMS
- Figura 13** – Hec-RAS em modelagem feita pelo USGS
- Figura 14** – Representação esquemática da relação entre os SIG e o modelo hidrológico HEC-HMS
- Figura 15** – Diagrama do processo no HEC-GeoRAS
- Figura 16** – Diagrama para o uso da extensão L-THIA
- Figura 17** – Município de São Carlos. Localização da Bacia do Córrego do Mineirinho.
- Figura 18** – Imagem Original utilizada no estudo
- Figura 19** – Composição de Bandas da Imagem
- Figura 20** – Composição de cenas para elaborar o MDE do Município de São Carlos
- Figura 21** – Etapa para classificação do uso e ocupação do solo
- Figura 22** – Barra de comandos da extensão HEC-GeoRAS
- Figura 23** – Modulo do HEC-GeoRAS compilando informações no ArcGIS

**Figura 24** – Mensagens de operação do HEC-GeoRAS

**Figura 25** – Entradas necessárias do modelo L-THIA

**Figura 26** – Extração do relevo de São Carlos destacando a bacia do Mineirinho

**Figura 27** – Pixels 30 x 30 elaboração do modelo digital de elevação

**Figura 28** – Suavização da cena com uso do TIN

**Figura 29** – Estações de coleta de dados pluviométricos e fluviométricos da bacia do córrego do Mineirinho

**Figura 30** – Mapa de uso e ocupação do solo Córrego do Mineirinho

**Figura 31** – Camada de solo utilizada no L-thia

**Figura 32** – Precipitação uniformemente distribuída na bacia do córrego do Mineirinho

**Figura 33** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 25 anos

**Figura 34** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 50 anos

**Figura 35** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 100 anos

**Figura 36** – Simulação de inundação cenário futuro tendencial com tempo de retorno de 25 anos

**Figura 37** – Simulação de inundação cenário futuro tendencial com tempo de retorno de 50 anos

**Figura 38** – Simulação de inundação cenário futuro tendencial com tempo de retorno de 100 anos

**Figura 39** – Simulação de inundação cenário Futuro alternativo com tempo de retorno de 25 anos

**Figura 40** – Simulação de inundação cenário Futuro alternativo com tempo de retorno de 50 anos

**Figura 41** – Simulação de inundação cenário Futuro alternativo com tempo de retorno de 100 anos

## **Lista de Tabelas**

**Tabela 1** – Valores de CN para diversas situações de cobertura vegetal e tipos de solos

**Tabela 2** – Componentes e atributos utilizados

**Tabela 3** – Valores obtidos a partir das curvas IDF

**Tabela 4** – Vazões máximas dos hidrogramas calculados para a área de estudo

## **Lista de Abreviações**

**CDCC** – Centro de Divulgação Científica e Cultural

**CN** – Curve Number

**EESC** – Escola de Engenharia de São Carlos

**EMC** – Event Mean Concentration

**HEC** – Hydrologic Engineering Center

**HMS** – Hydrologic Modeling System

**HRU** – Unidades de Resposta Hidrológica

**HU** – Hidrograma Unitário

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IDF** – Intensidade-Duração-Frequência

**INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**L-THIA** – Long-Term Hydrologic Impact Assessment

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**NPS** – Nonpoint Pollution Source

**NRCS** – Natural Resources Conservation Service

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**PD** – Plano Diretor

**RAS** – River Analysis System

**SCS** – Soil Conservation Service

**SIG** – Sistema de Informações Geográficas

**SR** – Sensoriamento Remoto

**TIN** – Triangulated Irregular Network

**SRTM** – Shuttle Radar Topography Mission

**WGS** – World Geodetic System

**USACE** – United States Army Corps of Engineers

**USDA** – United States Department of Agriculture

**USP** – Universidade de São Paulo

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2.3	JUSTIFICATIVA	18
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>19</b>
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA	19
3.2	CONCEITOS DE ALAGAMENTO, ENCHENTE E INUNDAÇÃO	21
3.3	URBANIZAÇÃO	23
<b>3.3.1</b>	<b>Processo de urbanização da cidade de São Carlos</b>	<b>25</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Plano diretor de São Carlos</b>	<b>27</b>
3.4	SENSORIAMENTO REMOTO	28
<b>3.4.1</b>	<b>Processamento de imagens de satélites</b>	<b>29</b>
3.5	MODELOS HIDROLÓGICOS	33
<b>3.5.1</b>	<b>Modelo EESC</b>	<b>35</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Método SCS</b>	<b>36</b>
<i>3.5.2.1</i>	<i>Cálculo da vazão a partir da chuva efetiva</i>	<i>40</i>
3.6	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	41
<b>3.6.1</b>	<b>Modelos hidrológicos baseados em SIG</b>	<b>43</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Modelo digital de elevação na determinação de parâmetros hidrológicos</b>	<b>44</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Módulos acoplados ao SIG</b>	<b>45</b>
3.7	SOFTWARES HEC-HMS 3.5 E HEC-RAS 4.1.1	47
<b>3.7.1</b>	<b>HEC-HMS</b>	<b>47</b>
<b>3.7.2</b>	<b>HEC-RAS</b>	<b>49</b>
3.8	MÓDULOS HEC-GEORAS E HEC-GEOHMS	50
3.9	EXTENSÃO L-THIA	54
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>55</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO	55
4.2	METODOLOGIA	57
<b>4.2.1</b>	<b>Pré-processamento de imagens</b>	<b>58</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Classificação dos tipos de solo, uso e ocupação</b>	<b>61</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Elaboração do mapa para simulação de inundações</b>	<b>63</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Simulação pontos de inundação para diferentes CN</b>	<b>65</b>

<b>4.2.5 Simulação de inundações em 3D .....</b>	<b>66</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
5.1 PROCESSAMENTO DE IMAGENS .....	69
5.2 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS 3D ELABORADOS NO ARCSCE .....	75
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>94</b>
1. Fotos da área de estudo .....	94
2. Hidrogramas utilizados para simulações no ArcScene .....	97

## 1 INTRODUÇÃO

A população mundial chegou em 2011 a marca de 7 bilhões de indivíduos, sendo que 54% da população mundial vive em áreas urbanas, uma proporção que deve chegar a 66% em 2050 segundo estimativa da Organização das Nações Unidas – ONU. Com uma população deste tamanho, e boa parte acumulada em grandes centros urbanos, está acontecendo um crescimento das cidades de forma desordenada, causando impermeabilização de grandes áreas que acarretam no aumento e nas constâncias de inundações e alagamentos.

No Brasil, a urbanização já vem sendo observada desde o século XVIII e se intensificou durante o século XX. (SANTOS, 2009)

Com a urbanização, a geografia das regiões vem se alterando rapidamente, principalmente no Sudeste brasileiro, que foi o foco do processo de industrialização brasileira. Cidades como São Paulo e Rio de Janeiro vêm enfrentando grandes desafios para amenizar o estado de degradação em que se encontram.

O homem sempre privilegiou os locais perto de corpos hídricos, tanto por questões de recursos naturais como de facilidade de transporte e comunicação. Porém, estas áreas estão sujeitas a determinados fatores de risco que podem pôr em perigo a população.

A ocupação e o uso indevido do solo têm causado impactos negativos nos recursos naturais. As alterações antrópicas promovidas nessas áreas, como o desmatamento e a urbanização, promovem um desequilíbrio no meio físico, afetando o equilíbrio ambiental em áreas drenadas pelas bacias hidrográficas. (NASCIMENTO et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2008).

As cidades, nas quais já é notado um aumento de áreas impermeáveis, ocorre uma redução na infiltração de água no solo, provocando um aumento na quantidade do escoamento superficial, provocando alagamentos sem que haja relação com uma planície de inundação.

A complexidade do ambiente urbano e de sua infraestrutura de drenagem tem uma influência inerente no escoamento superficial. Este escoamento gera inundações urbanas, que impõe desafios à modelagem. A simulação destes cenários exigem dados detalhados, imagens de satélite que permita gerar modelos de elevação de alta resolução, que geralmente não esta disponível na maioria dos municípios brasileiros.



A gestão de bacias urbanas vem ganhando cada vez mais importância nas atuais pesquisas acadêmicas. Com os frequentes alagamentos e inundações nos centros urbanos estudo para o combate das causas e as formas de mitigar seus efeitos vêm se desenvolvendo.

Os estudos hidrológicos e hidráulicos tem grande relevância no entendimento de inundações. Assim, as metodologias adotadas devem ser capazes de integrar os estudos hidrológicos e hidráulicos com a gestão do risco de inundações. Esta integração tem sido facilitada com o crescente desenvolvimento tecnológico dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Nos dias de hoje, a maioria dos estudos de cheias programam metodologias com SIG e modelagem. (CORRÊA, 2013)

Antes dos SIGs, qualquer tentativa de obter parâmetros mais complexos como declividade, comprimento da hidrografia, trajeto de escoamento superficial, área de contribuição, etc., para grandes extensões era muito trabalhosa, limitando, assim, aplicações potenciais nos problemas de drenagem. Dentre as vantagens computacionais que adotam abordagens automatizadas para tais processos, destacam-se a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados, que podem então ser organizados sob a forma de bases de dados digitais (SAUNDERS, 1999).

As novas aplicações do SIG incluem a junção com outro ramo de pesquisa que vem crescendo muito é o Sensoriamento Remoto, que vem utilizando metodologias que combinando informações georeferenciadas com as bandas espectrais fornecidas pelos sistemas de sensoriamento remoto.

Sensoriamento Remoto é o conjunto de técnicas que possibilita a obtenção de informações sobre alvos na superfície terrestre (objetos, áreas, fenômenos), através do registro da interação da radiação eletromagnética com a superfície, realizado por sensores distantes, ou remotos. Geralmente estes sensores estão presentes em plataformas orbitais ou satélites e aviões.

O desenvolvimento de métodos para fins de classificação de imagens digitais constitui-se em uma das áreas mais importantes em Sensoriamento Remoto. No processo de classificação de imagens em Sensoriamento Remoto, são empregados os dados provenientes das bandas espectrais geradas pelo sistema sensor, ou de um subconjunto destas. (LERSCH, 2003)

As aplicações do uso do sensoriamento remoto também vêm aumentando com o passar dos anos e em ambiente urbano é utilizado para determinar padrões de

crescimento, localização de estrutura de sítios urbanos e verificar processos de conurbações.

Bacias hidrográficas têm sido envolvidas pelo crescimento de cidades, particularmente pela ocupação indevida de suas planícies de inundação, resultando em modificações significativas na cobertura do solo. Uma das respostas a esta “agressão ambiental” são as ocorrências de inundações mais frequentes e catastróficas, como resultante da alteração da relação chuva x escoamento superficial direto das águas pluviais. (MORUZZI et al., 2009)

O problema acarretado pela ocupação desordenada da bacia vem sendo abordado em inúmeros estudos de casos que demonstram que o uso e ocupação do solo de forma inadequada e desordenada, muitas vezes, com obras mal dimensionadas, acarretam grandes prejuízos socioeconômicos.

Tucci (2009) dá uma visão importante, de diferentes aspectos, do impacto do processo de urbanização em bacias hidrográficas.

Em cidades em desenvolvimento, os estudos de drenagem urbana são imprescindíveis e devem ter um destaque no plano diretor de desenvolvimento urbano. Medidas preventivas como o uso de pequenos reservatórios em parques e controle de impermeabilização do solo, podem se adequar a urbanização da região e evitar obras que tenham um alto valor socioeconômico como o alargamento de calhas dos rios, construção de diques que além de em sua implementação acarretarem inúmeros problemas, ainda podem tornar o escoamento superficial mais rápido e agravar as inundações em outros pontos da bacia hidrográfica (TUCCI, 2009).

A mudança no padrão de uso da terra devido à rápida urbanização afeta negativamente os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. O aumento das áreas impermeáveis perturba o equilíbrio natural do sistema acarretando uma infiltração reduzida, que aumenta o escoamento e leva a maiores picos de cheias e volumes até mesmo em chuvas de curta duração e de baixa intensidade.

Assim, o sensoriamento remoto, juntamente com suporte de aplicações do SIG é muito útil para o planejamento de bacias hidrográficas, aferi uma boa precisão a quantidade de escoamento que percorre a superfície da terra e se direciona para rios e córregos não requerendo muito esforço e tempo e estas informações são essenciais para lidar com problemas de desenvolvimento e gestão de bacias hidrográficas.

## **2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Compilar dados de uma microbacia urbana em São Carlos, aplicando técnicas de geoprocessamento, avaliando o uso da extensão L-THIA como ferramenta para simular cenários de escoamento superficial, em bacias urbanas que dispõem de poucas informações.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Modelar a microbacia urbana do córrego do Mineirinho com a utilização de um software já conhecido como o ArcGIS 10.1® de forma a simular diversos cenários de chuvas que podem vir a incidir na região causando efeitos danosos a população de modo a prestar a informação de formas de mitiga-los ou evita-los.

Utilizar dados coletados e processados em São Carlos pela Escola de Engenharia de São Carlos – EESC-USP em softwares como o Ecognition 8®, HEC-RAS®, HEC-HMS® e processar os dados brutos no Software ArcGIS 10.1®.

Avaliação do uso de dados processados no software específico de processamento de imagem com o resultado obtido no ArcGIS 10.1®.

Consolidação em ambiente ArcGIS 10.1® de um modelo para simulação de cenários de uso e ocupação do solo e seus efeitos no escoamento superficial da bacia do Córrego do Mineirinho.

### **2.3 JUSTIFICATIVA**

A crescente migração do homem do campo para os grandes centros urbanos, verificada nas ultimas décadas no Brasil, vem ocasionando o uso de áreas inapropriadas para a habitação e com tendências naturais a inundações e alagamentos.

Os fenômenos de inundações e alagamentos podem ser evitados ou minimizados com tecnologias específicas para cada microbacia, os estudos do comportamento desses fenômenos é que nos permitirá dizer qual tecnologia adequada para o que estamos nos deparando, servindo para informar os gestores públicos quais melhores formas de lidar com a situação.

Neste contexto apresentamos esse trabalho, que visa a compilação das informações geográficas, da microbacia do Córrego do Mineirinho em São Carlos, em um único software de forma a facilitar e agilizar o manuseio dessas informações.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 BACIA HIDROGRÁFICA**

Os rios têm grande importância econômica; eles irrigam terras agrícolas, abastecem reservatórios de água urbanos, fornecem alimentos e produzem energia através das hidrelétricas.

Para Viessman, Harbaugh e Knapp (1972), a Bacia Hidrográfica é uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água tal que toda vazão efluente é descarregada através de uma simples saída denominada exutório.

A Bacia Hidrográfica é contornada por um divisor, uma linha que divide as precipitações que caem nas bacias vizinhas e que encaminha o escoamento superficial para outro sistema fluvial.

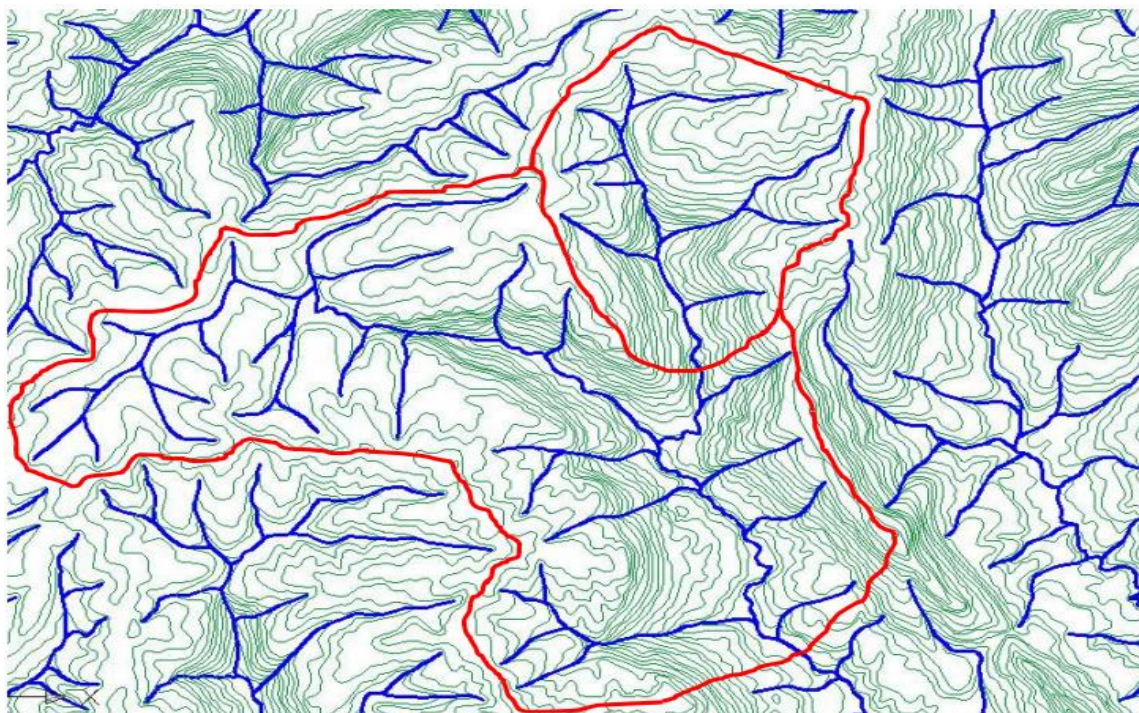
Os principais elementos componentes das bacias hidrográficas são os divisores de água – cristas das elevações que separam a drenagem de uma e outra bacia; fundos de vale – áreas adjacentes a rios ou córregos e que geralmente sofrem inundações; sub-bacias – bacias menores, geralmente de algum afluente do rio principal; nascentes – local onde a água subterrânea brota para a superfície formando um corpo hídrico; áreas de descarga – locais onde a água escapa para a superfície do terreno; vazão de recarga – local onde a água penetra no solo recarregando o lençol freático, e perfis hidrogeoquímicos ou hidroquímicos – características da água subterrânea no espaço litológico.

O divisor segue uma linha rígida em torno da bacia atravessando o curso somente no ponto de saída. O divisor une os pontos de máxima cota entre bacias, não impedindo que cada bacia tenham picos isolados em seu interior.

A caracterização da bacia hidrográfica define objetivamente as medidas, gráficas e índices fisiográficos mais difundidos na literatura científica que podem ser estabelecidos através de cartas que contém curvas de nível (topografia) e a rede de rios

(hidrografia) como pode ser verificado na Figura 1. Portanto, o ponto de partida para extrair as informações fisiográficas é a individualização da bacia hidrográfica.

**Figura 1** – Delimitação de uma bacia hidrográfica e sua sub-bacia.



Fonte: Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (2015).

As bacias hidrográficas são consideradas excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais, pois é possível acompanhar as mudanças introduzidas pelo homem e as respectivas respostas da natureza. Em nações mais desenvolvidas a bacia hidrográfica também tem sido utilizada como unidade de planejamento e gerenciamento, compatibilizando os diversos usos e interesses pela água e garantindo sua qualidade e quantidade.

A delimitação de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais. Para isso, tem sido comum a utilização de informações de relevo em formato analógico, como mapas e cartas, o que compromete a confiabilidade e a reprodução dos resultados devidos à carga de subjetividade inerente aos métodos manuais. (CARDOSO et al., 2006)

As bacias hidrográficas caracterizam-se pela diversidade, e nem sempre os projetos e avaliações realizadas para uma bacia podem ser utilizada em outra, nem mesmo as que estão na mesma região, sendo sempre indicado um estudo individualizado de cada bacia.

### 3.2 CONCEITOS DE ALAGAMENTO, ENCHENTE E INUNDAÇÃO

Inundações e enchentes são fenômenos naturais que ocorrem com frequência nos cursos d'água, geralmente deflagrados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração. Estes eventos naturais têm sido intensificados, principalmente nas áreas urbanas, por atividades antrópicas. (REIS, 2011)

As maiores proporções de alagamentos ocorrem em áreas urbanas, tornando-se verdadeiras conturbações e problemas nas cidades, como historicamente acontece na maioria das grandes cidades do Brasil.

Os eventos extremos fazem parte da dinâmica climática do ambiente, e tornam-se um grande problema quando um determinado local não tem a capacidade de reduzir ou evitar seus efeitos negativos (GONÇALVES, 2003).

É fácil notar o crescimento no número de pessoas afetadas nos últimos anos, mesmo durante eventos pluviais não tão extremos, devido a forma como o ambiente urbano vem crescendo, numa evolução sem considerar os locais mais adequados para se instalar, ficando muitas vezes próximos a rios ocupando o fundo de vale que em outras épocas era a área de inundação.

Embora os termos enchente e inundação venham sendo utilizados como sinônimos, eles apresentam diferenças importantes.

Como conceito inundação representa o transbordamento das águas de um curso d'água, atingindo a planície de inundação ou área de várzea. As enchentes ou cheias são definidas pela elevação do nível d'água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar. O alagamento é um acúmulo momentâneo de águas em determinados locais por deficiência no sistema de drenagem. (TOMINAGA et al., 2009)

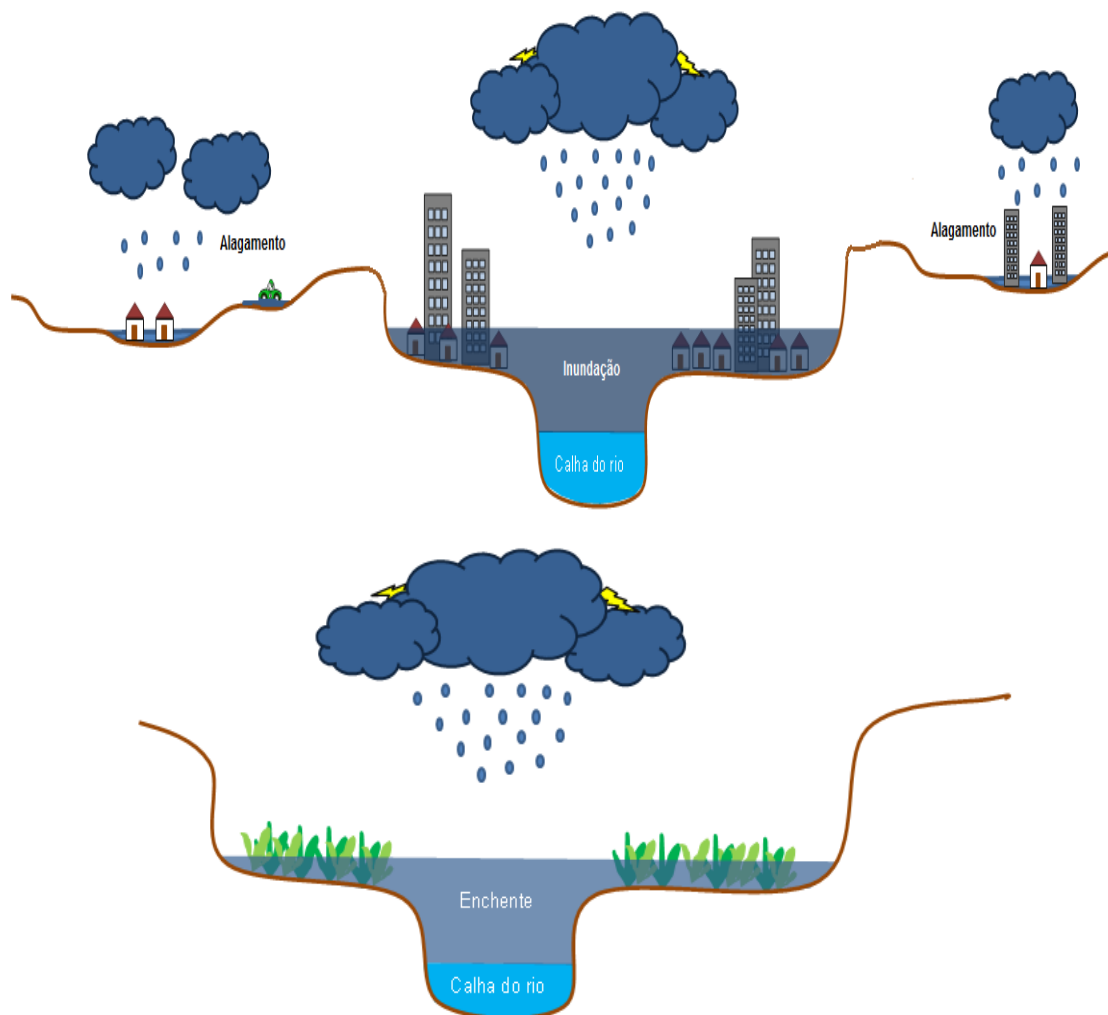
Todo rio ou corpo d'água tem uma área em todo seu entorno que costuma inundar em determinadas épocas do ano ou quando há um índice de precipitação muito grande aumentando a vazão e causando um transbordamento.

Portanto, essas inundações, também chamadas de enchentes, são muito comuns e são fenômenos naturais que ocorrem em todos os corpos d'água.

O problema é que com a construção de cidades à beira de rios, que não respeitam este limite natural de transbordamento, este fenômeno natural pode causar transtornos e até se tornar muito perigoso.

Na figura 2 é possível ver uma síntese do que acontece nos grandes centros urbanos quando eventos de precipitações ocorrem.

**Figura 2** – Diferenças entre alagamento, enchente e inundação.



Fonte: Aquafluxus (2016).

O conhecimento preciso das áreas urbanas sujeitas às inundações facilita o estabelecimento de alternativas e ações que visem minimizar os efeitos negativos associados às enchentes, inundações, alagamentos e enxurradas, uma vez que é difícil a eliminação completa do fenômeno. (ECKHARDT et al., 2008)

Os impactos produzidos por enchentes e inundações nas condições atuais da realidade brasileira somente tende a piorar. Este processo infelizmente não está sendo contido, mas está sendo ampliado à medida que os limites urbanos aumentam. A gravidade desse processo ocorre principalmente nas médias e grandes cidades brasileiras. A importância deste impacto está latente através da imprensa e da TV, onde

se observam, em diferentes pontos do país, cenas de enchentes associadas a danos materiais e humanos.

O melhor meio para se evitar grandes transtornos por ocasião de uma inundação é regulamentar o uso do solo, limitando a ocupação de áreas inundáveis a usos que não impeçam o armazenamento natural da água pelo solo e que sofram pequenos danos em caso de inundação. Esse zoneamento pode ser utilizado para promover usos produtivos e menos sujeitos a danos, permitindo a manutenção de áreas de uso social, como áreas livres no centro das cidades, reflorestamento, e certos tipos de uso recreacional.

Não existe fórmula para evitar os alagamentos, mas algumas mudanças na estrutura dos grandes centros urbanos podem minimizar o efeito do excesso de água. O desafio principal é encontrar alternativas para evitar a impermeabilização do solo e o assoreamento dos rios (acúmulo de sedimentos que causa a redução da profundidade e da vazão). Afinal, reduzir o volume de chuvas não é possível, nem desejável.

As ações da política pública atual estão indevidamente voltadas para medidas estruturais como a canalização, no entanto esse tipo de obra somente transfere a enchente para jusante.

### 3.3 URBANIZAÇÃO

Urbanização é o crescimento das cidades, tanto em população quanto em extensão territorial. É o processo em que o espaço rural transforma-se em espaço urbano, com a conseqüente migração populacional do tipo campo-cidade que, quando ocorre de forma intensa e acelerada, é chamada de êxodo rural.

O sentido mais usual da urbanização é o de crescimento urbano, ou seja, refere-se à expansão física da cidade, mediante o aumento do número de ruas, praças, moradias, etc. Nesse caso, ela não tem limite, a ponto de unirem-se umas às outras, num fenômeno conhecido por conurbação.

A urbanização, tal como ocorre hoje, é um fenômeno contemporâneo cujas características se ligam à Revolução industrial na Europa, a partir do século XVIII, nos Estados Unidos e no Japão.

Os processos de industrialização e de urbanização brasileiros estão intimamente ligados, pois as unidades fabris eram instaladas em locais onde houvesse infraestrutura, oferta de mão-de-obra e mercado consumidor.



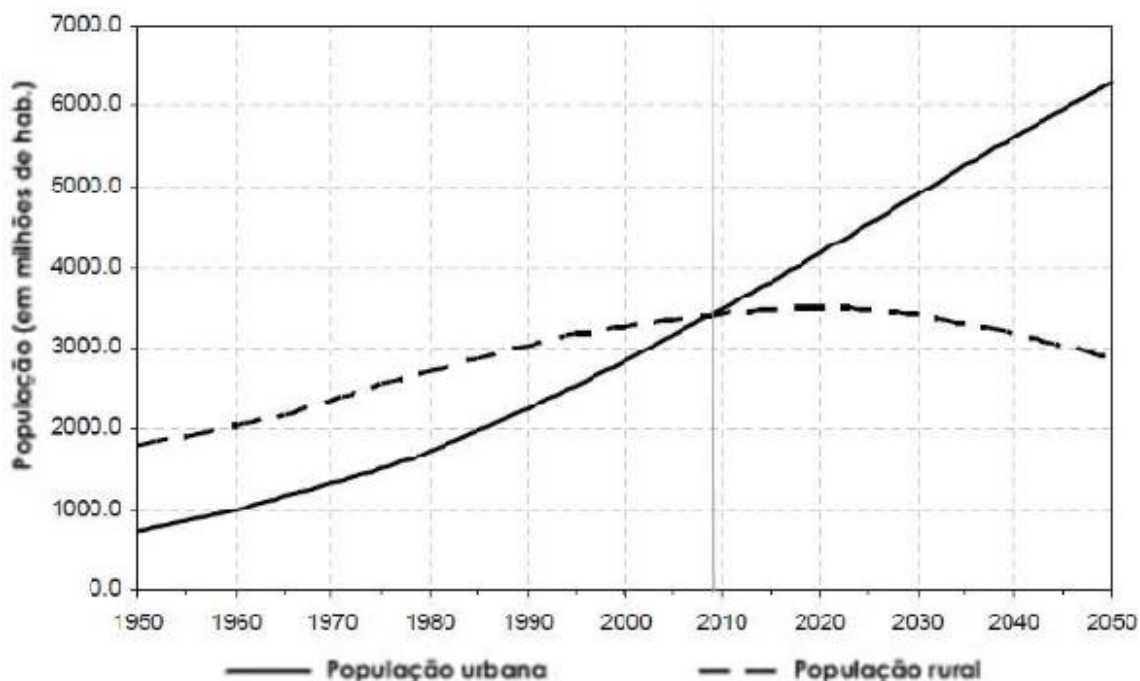
A urbanização no Brasil apoiou-se essencialmente no êxodo rural. A migração rural-urbana tem múltiplas causas, sendo as principais a perda de trabalho no setor agropecuário - em consequência da modernização técnica do trabalho rural, com a substituição do homem pela máquina e a estrutura fundiária concentradora, resultando numa carência de terras para a maioria dos trabalhadores rurais.

Ao longo das décadas a população brasileira cresceu de forma significativa, ao passo desse crescimento as cidades também tiveram sua aceleração em relação ao tamanho, formando imensas malhas urbanas, ligando uma cidade à outra e criando as conurbações.

A urbanização no Brasil, bem como em muitos países em desenvolvimento, vem ocorrendo de forma espontânea. O que se observa é uma parte da cidade construída e dirigida, na maioria, dentro de normas e padrões ditados pelos Planos Diretores; porem a parte da cidade que se expande de forma ilegal pela população pobre na forma de favelas, ou seja, áreas geralmente públicas invadidas e loteadas de forma aleatória.

Podemos perceber, na figura 3, que a humanidade está se tornando majoritariamente urbana. Estes dados são apenas estimativas, mas revelam que a tendência desse processo é se intensificar nas décadas subsequentes.

**Figura 3** – Crescimento da população Urbana no Mundo 1950-2050



Fonte: Organização das Nações Unidas- ONU (2011).

A falta de um plano diretor não só demanda problemas sociais como também provoca alterações ambientais, quando não há planejamento urbano, os problemas sociais se multiplicam nas cidades como, por exemplo, criminalidade, desemprego, poluição, destruição do meio ambiente e desenvolvimento de subhabitações.

### **3.3.1 Processo de urbanização da cidade de São Carlos**

Historicamente, a maioria das cidades surgiu às margens dos rios. São Carlos seguiu essa tendência e cresceu incorporando os seus vários cursos d'água. Por muitos anos desde a sua fundação, em 1857, a porção urbana de São Carlos se restringiu à sub-bacia do córrego do Gregório (Centro de Divulgação Científica e Cultural- CDCC, 2007). O início da ocupação da região, que mais tarde viria a se tornar o centro da cidade de São Carlos, ocorreu no entorno de onde se construiu a primeira capela, hoje, a Catedral São Carlos Borromeu, região que por muitos anos representou toda a área urbana da cidade, que posteriormente se expandiu ao sul do córrego do Gregório em direção à ferrovia recém instalada. O entorno do rio Monjolinho foi alcançado pela urbanização apenas a partir da década de 1940. (MARTINS, 2012)

O município de São Carlos possui cerca de 221.950 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE, 2010) e configura-se como uma cidade de porte médio não metropolitana, além de ser considerado um centro regional importante no interior paulista. Com características que a tornam um pólo de modernização para toda a região, como a presença de muitas empresas de base tecnológica, de universidades públicas, faculdades particulares e uma economia industrial e agrícola desenvolvida, fica localizada em um dos maiores eixos industriais do país; limita-se ao norte com os municípios de Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia; ao sul com Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina; a oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense e a leste com Descalvado e Analândia. (JORDÃO, 2010)

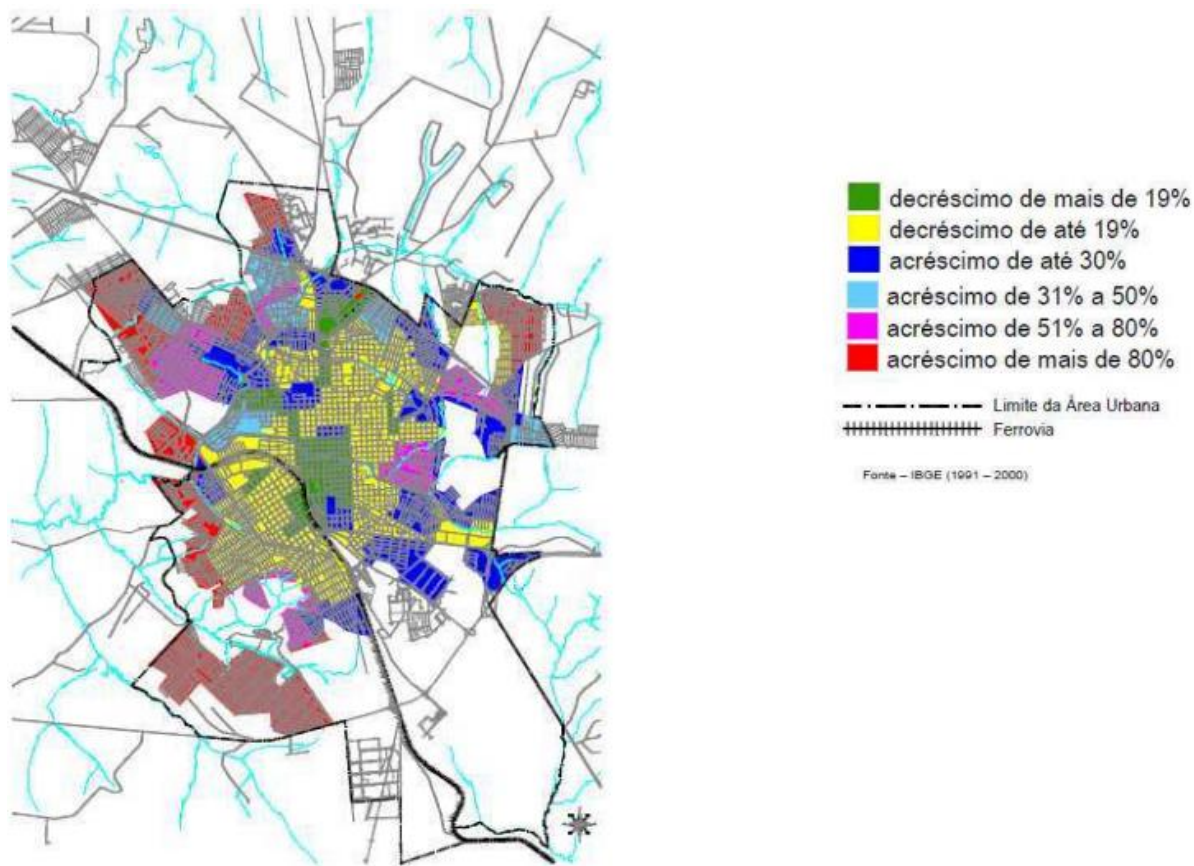
A cidade de São Carlos passou por algumas mudanças que ocasionaram um crescimento populacional grande em sua história. A primeira se deu quando da chegada da Companhia Paulista de Estrada de Ferro, por volta de 1880. Porém, a principal iniciou-se no ano de 1920, quando o eixo econômico da cidade passou de eminentemente agrícola para um significativo processo de industrialização, posteriormente acentuado pelo início da crise cafeeira (CDCC, 2007; JAMBERSI, 2008).

A modificação da paisagem na proximidade dos cursos d'água da cidade de São Carlos, ou seja, a retirada de mata ciliar, e a impermeabilização do solo, aliadas ao lançamento de despejos domésticos e industriais tornaram o aproveitamento dessas águas impróprio para abastecimento humano, sem o tratamento adequado, afirma (SÉ 1992).

Ainda segundo Sé (1992) outras possíveis causas dos impactos ambientais decorrentes da urbanização de São Carlos são aqueles sentidos pela paisagem dos setores noroeste, nordeste e sudoeste da cidade entre as décadas de 1950 e 1970: a) o processo de ocupação do espaço, que passa pelo desmatamento excessivo, pela agricultura intensiva com o empobrecimento do solo, culminando com o acelerado processo de expansão urbana; b) a ausência de um programa de tratamento de resíduos pelas indústrias em seu processo de expansão, além da ausência do tratamento de esgotos domésticos. Hoje esse processo deletério está sendo minimizado com o início do funcionamento da Estação de Tratamento de Esgoto em 2008, o que está proporcionando a melhora gradativa da qualidade da água dos cursos d'água, especialmente os urbanos. (ALMEIDA; FREITAS, 2011)

Na figura 4 é possível notar os processos de crescimento e diminuição da expansão urbana de São Carlos em sua totalidade.

**Figura 4** – Comportamento da expansão da população urbana de São Carlos



Fonte: Jordão (2010).

### 3.3.2 Plano diretor de São Carlos

Um Plano Diretor (PD) deve levar em conta as características do município onde será implantado, tanto suas potencialidades quanto suas deficiências.

O Plano Diretor pode ser definido como “um conjunto de princípios e regras orientadoras da ação dos agentes que constroem e utilizam o espaço urbano” (BRASIL, 2002). Sua elaboração baseia-se na interpretação da cidade real com ampla participação popular, envolvendo temas e questões relativos aos aspectos urbanos, sociais, econômicos e ambientais. A partir disso, o Plano estabelece o destino específico que se quer dar às diferentes regiões do município, embasando os objetivos e as estratégias.

O Plano Diretor é o que possibilita a gestão e o ordenamento territorial da cidade em questões referentes à drenagem urbana, coeficiente de impermeabilização dos lotes, uso e ocupação do solo, delimitação de áreas de proteção permanentes etc., questões essas extremamente relevantes quando se investiga a ocorrência de alagamentos e inundações urbanas.

O primeiro Plano Diretor do Município foi concebido em 1963, mas não foi implementado, esse plano tinha como objetivo principal o embelezamento da cidade, desconsiderando quase que completamente os seus problemas, especialmente aqueles relativos ao seu processo de periferização. (LIMA, 2012)

Oliveira (1998) ressalta que só a partir da década de 1970 é que a Prefeitura Municipal de São Carlos promoveu a elaboração de um Plano Diretor Municipal, buscando regularizar loteamentos clandestinos, dotando-os de melhoramentos urbanos e infraestrutura básica.

O plano diretor mais atual de São Carlos foi elaborado em 2005 e se tornou um importante mecanismo para orientar os novos empreendimentos no tocante ao mais adequado uso e ocupação do solo no município.

### 3.4 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto tem como definição mais usual a adotada por Avery e Berlin (1992) e Meneses (2001): uma técnica para obter informações sobre objetos através de dados coletados por instrumentos que não estejam em contato físico com os objetos investigados. No Brasil, o principal órgão que atua nesta área é o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

O termo Sensoriamento refere-se à aquisição de informação sobre um objeto por um sensor que está a certa distância desse objeto (MATHER, 1999). Devido a suas diferentes propriedades físicas e composições químicas, a variedade de materiais na superfície da terra emite, reflete ou absorve a radiação eletromagnética em diferentes formas. Sensores são, então, capazes de registrar o comportamento destes diferentes materiais quando da interação com o fenômeno físico ao longo do espectro eletromagnético, e estabelecer a relação existentes entre eles, o qual pode ser entendido e interpretado através das técnicas de processamento de imagens.

Segundo Altmann et al. (2009) O mapeamento do uso e cobertura das terras retrata as atividades humanas que pode significar pressão e impacto sobre os elementos naturais. As classes de uso e cobertura são identificadas, especializadas, caracterizadas e quantificadas. A vegetação é um elemento sensível às condições e tendências da paisagem reagindo de forma distinta e rápida às variações. Seu estudo permite conhecer as condições naturais do território e as influências antrópicas recebidas.

O sensoriamento remoto é uma das ferramentas mais utilizadas para o estudo da Terra devido as suas principais vantagens em relação a outros métodos de coleta de dados da superfície terrestre. Dentre estas vantagens, destaca-se a visão panorâmica de uma região, característica muito útil para estudos de fenômenos dinâmicos; cobertura global da Terra, ou seja, sensores captam imagens de todas as regiões do Planeta; as imagens de sensoriamento remoto permitem obter em uma ampla região com as mesmas condições de iluminação, característica essencial para o estudo e análise de imagens; e presença de diferentes sensores capazes de medir a energia infravermelha (CENTENO, 2003).

Durante muito tempo a maioria dos mapeamentos de recursos naturais tem sido feita usando o Sensoriamento Remoto. Fotografias aéreas têm sido usadas para produzir virtualmente todos os tipos de mapas topográficos, geológicos, florestais, uso do solo, etc. Mais recentemente, imagens digitais têm sido usadas também para este fim.

A diferença entre fotografia e imagem de satélite é a forma como é obtida, a fotografia é gerada por meio de máquinas digitais que captam a reflexão da luz nos objetos. A imagem de satélites é gerada pelo sensor que detecta (quantifica eletronicamente) a quantidade de energia enviada ou refletida pelos objetos, dando mais liberdade do usuário escolher qual faixa é mais adequada ao estudo de interesse.

Imagens digitais são representações digitais de uma porção da superfície da terra. Uma imagem digital também pode ser vista como uma matriz de pontos (ou pixels) com N linhas por M colunas, onde o valor de cada elemento representa a magnitude do total de energia eletromagnética refletida e emitida por uma área de localização específica na superfície da terra. Consequentemente poderemos aplicar uma variedade de técnicas de processamento digital de imagens para esta matriz numérica.

No Brasil o INPE teve uma ação decisiva na consolidação do sensoriamento remoto como uma tecnologia de uso em escala nacional, projetando o Brasil como a nação pioneira no hemisfério sul a dominar essa tecnologia.

### **3.4.1 Processamento de imagens de satélites**

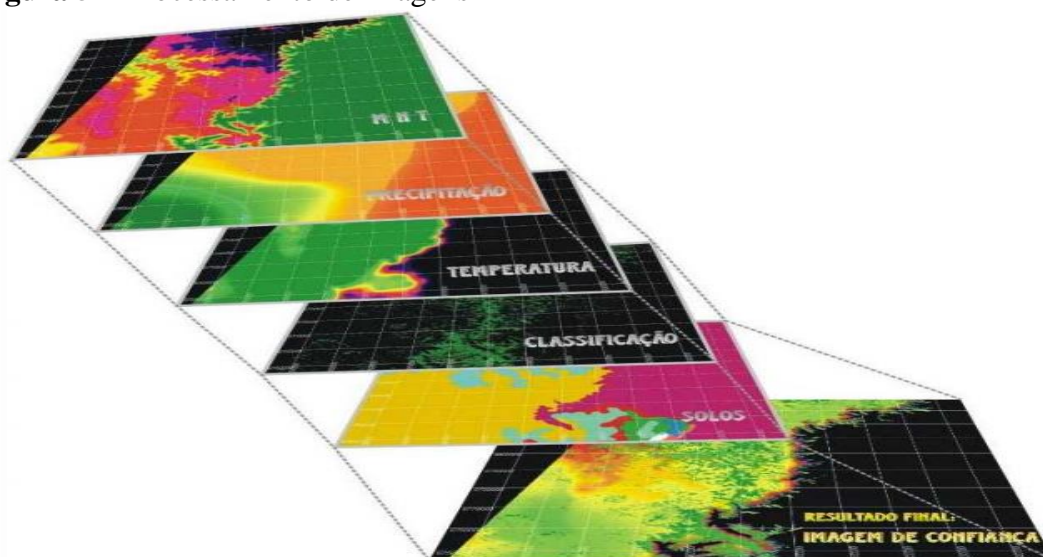
O Processamento de imagens é uma área em crescimento e diversos temas científicos vêm sendo abordados e na maioria deles de forma interdisciplinar. Entre eles

podemos citar: a compreensão de imagens, a análise em multi-resolução e em multi-frequência, a análise estatística, a codificação e a transmissão de imagens, etc.

No processamento de imagens o que ocorre na realidade é o processamento de Sinais. Os sinais, como as imagens, são na realidade um suporte físico que carrega no seu interior uma determinada informação. Esta informação pode estar associada a uma medida ou pode estar associada a um nível cognitivo.

Um segmento importante do processamento digital de imagens consiste na execução de operações matemáticas dos dados, visando as suas transformações em imagens de melhores qualidades espectrais e espaciais e que sejam mais apropriadas para uma determinada aplicação como podemos ver nas camadas da figura 5.

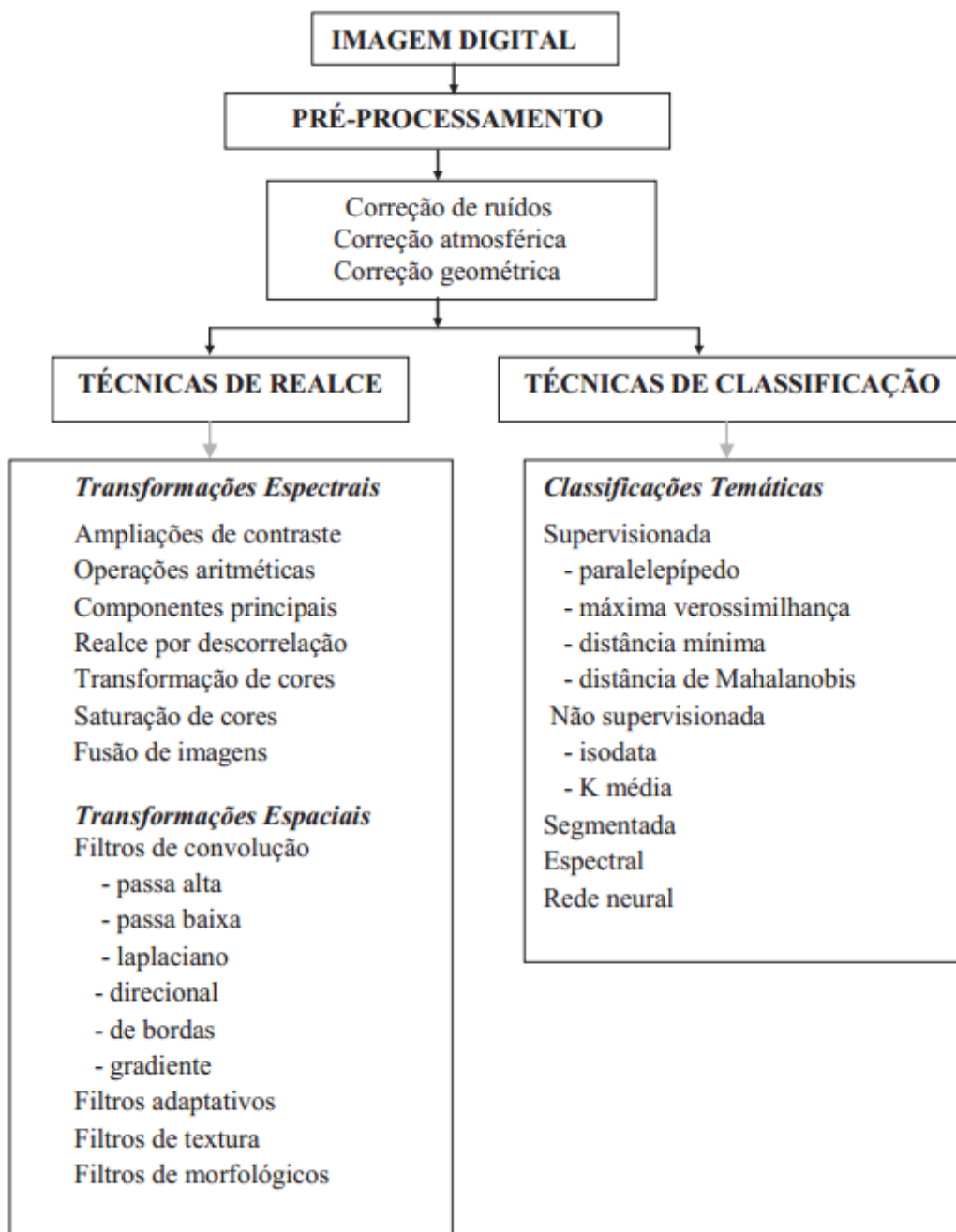
**Figura 5** – Processamento de imagens



Fonte: Lersch (2003).

Na figura 6 a apresentação de técnicas de pré-processamento que são, essencialmente, funções operacionais para remover ou corrigir os erros e as distorções introduzidos nas imagens pelos sistemas sensores devidos a erros instrumentais (ruídos espúrios), às interferências da atmosfera (erros radio métricos) e à geometria de imageamento (distorções geométricas).

**Figura 6** – Apresentação das principais técnicas de processamento de imagens segundo um modelo geral de divisão



Fonte: Menezes e Almeida (2012).

A atmosfera é uma fonte de erros, que pode gerar com intensidades diferentes, severas distorções nos dados das imagens. No conjunto, os erros ou distorções que as imagens estão sujeitas, vão se apresentar nas deformações de escala, incorreções nas posições espaciais dos pixels, perda de contraste entre os alvos ou registros incorretos dos valores digitais dos pixels.



As correções dessas distorções fazem parte do conjunto de funções de processamento que se denomina de pré-processamento. As técnicas de pré-processamento são assim denominadas, porque elas não visam transformações das imagens, as quais têm, como principal objetivo, melhorar a qualidade visual da cena. As correções dos diferentes tipos de erros que a imagem pode apresentar são modeladas de acordo com o tipo da estrutura dos erros, conhecendo-se qual é a fonte de distorção.

As imagens de sensoriamento remoto tornaram-se mais atrativas a partir da década de 1980, com o advento da segunda geração de satélites da série Landsat, portando um sensor de melhor resolução espacial (30 metros). Com o surgimento, em 1986, do satélite francês SPOT, com um módulo de imagens multiespectrais de resolução espacial de 20 metros e uma imagem pancromática com 10 metros, melhorou a resolução e tornou mais fácil a visualização de eventos em espaços menores.

Os atuais sensores de alta resolução espacial empregados para a análise de áreas urbanas e de outros objetos que exigem imagens com riqueza de detalhes são usados em inúmeros estudos e na figura 7 podemos verificar o uso para classificação de uma área de uma cidade.

**Figura 7** – Classificação de imagens de satélite



Fonte: Menezes e Almeida (2012).

Existem inúmeras ferramentas computacionais que permitem uma integração entre os dados de Sensoriamento Remoto e dados típicos de Sistemas de Informação Geográfica. Os resultados dessa junção vêm ajudando na precisão das informações levada a público e nos estudos das áreas urbanas, que com a abordagem de compilar informações nos dois sistemas simultaneamente vem garantindo bons resultados.

### 3.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Estudos hidrológicos envolvendo processos naturais complexos – como precipitação, escoamento superficial e infiltração – dependem de um grande número de fatores e de suas interações, o que dificulta sua análise quantitativa (PORTO, 1998).

Modelos são representações de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005).

Na hidrologia os modelos computacionais tem a tarefa de avaliar o comportamento da bacia através de sistemas de equações contínuas ou discretas, da conservação da massa e/ou da conservação do momento.

Para Barth et al. (1987), modelo é uma representação do comportamento de um sistema natural possível de ser expresso através de equações matemáticas e que, dada a versatilidade que possui, pode-se facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas.

Modelos hidrológicos diferem-se de acordo com algumas considerações, podendo ser classificados perante a sua análise espacial, quanto à representação dos dados, quanto às variáveis utilizadas e por fim, o tipo de relação entre estas variáveis (RENNÓ, 2003).

A análise espacial distingue um modelo hidrológico em concentrado, semi-distribuído e distribuído. Um modelo concentrado considera que todos os dados de entrada, em consequência também, os de saída, são representativos da área estudada. (ANDRADE, 2011)

Um modelo distribuído é capaz de enxergar peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, portanto, tais observações são expressas particularmente nos dados de entrada. (ANDRADE, 2011)

Matematicamente, verifica-se que o modelo concentrado apresenta apenas o “tempo” como variável independente, sendo representado diretamente por uma equação diferencial ordinária. Por outro lado, modelos distribuídos, possuindo variáveis de “tempo e espaço” independentes, são representados por equações diferenciais parciais (TUCCI, 2005).

Os dados podem ser representados de maneira contínua ou discreta, contínuos quando os fenômenos que representam são contínuos no tempo e quando se dão em intervalos de tempo determinados, são classificados como discretos.

Os modelos podem se apresentar na forma de estocásticos ou determinísticos: determinísticos são os modelos em que, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída. Estocásticos são aqueles em que o relacionamento entre entrada e saída é estatístico. (FERRAZ et al., 1999)

Os modelos também podem se apresentar no modo conceitual ou empírico: modelo conceitual é aquele em que as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Os modelos empíricos são os que ajustam os dados calculados aos observados através de funções empíricas (equação de Darcy, Horton etc.), mas que estão relacionadas com a física do sistema. (FERRAZ et al., 1999)

A utilização de modelos para simular o comportamento natural do ambiente com todas as suas variáveis vem facilitando a quantificação de alguns desses fatores.

Nos anos 60, com a evolução dos computadores chegaram os primeiros modelos que procuraram representar o comportamento de bacias hidrográficas através de equações empíricas.

Por representarem a bacia, os modelos hidrológicos funcionam teoricamente da mesma maneira que no meio físico, respondendo através de uma saída aos estímulos dos parâmetros de entrada. (TUCCI, 2005).

O Stanford IV (CRAWFORD; LINSLEY, 1966) foi um dos primeiros a ser bem-sucedido, mas tinha como principal desvantagem o grande número de parâmetros de entrada necessários a sua operacionalização, mas representava a maioria dos processos da transformação precipitação-vazão e podia ser utilizado em bacias urbanas e rurais com diferentes tamanhos e coberturas. (FERRAZ et al., 1999)

Os modelos chuva-vazão têm por objetivo representar o processo pelo qual o volume de chuva precipitado escoar e atinge os canais da macrodrenagem, em função das características físicas da bacia e das condições de escoamento e infiltração da água no solo. Fatores como compacidade e saturação do solo, grau de impermeabilização das superfícies e tipo de cobertura vegetal interferem diretamente na quantidade de chuva que irá infiltrar, bem como na parcela que irá chegar aos rios e em quanto tempo. Quanto mais impermeabilizada for a bacia – devido à urbanização e coberturas de concreto e asfalto – maior será o volume de chuva escoado na superfície e menor o tempo de escoamento. (GRACIOSA, 2010)

A integração entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vem sendo apresentada por muitos autores como forma viável de descrever os

processos hidrológicos no estudo de bacias e microbacias hidrográficas. (MELO et al., 2008)

### 3.5.1 Modelo EESC

O modelo hidrológico EESC é um modelo computacional elaborado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP, por Righetto, Porto e Villela (1994), para simular os problemas de drenagem nas bacias hidrográficas dos córregos Monjolinho e Gregório.

O modelo tem caráter hidráulico-hidrológico, específico para a cidade de São Carlos, e foi criado como uma ferramenta de fácil entendimento e utilização para aplicações locais. A área abrangida pelo modelo é de aproximadamente 76 km<sup>2</sup>, dividida em 54 sub-bacias, 54 trechos principais e 34 tramos. (MARTINS, 2012)

Esse modelo permite que se simule o hidrograma de cheia em função do tempo de retorno e duração da precipitação, em qualquer ponto da rede de drenagem. Além disso, permite ainda a simulação de cenários fictícios, aceitando a alteração de seus parâmetros de entrada para prever hidrogramas de situações futuras de urbanização. (MARTINS, 2012)

O modelo primeiramente define a configuração da rede de drenagem, acoplando todas as sub-bacias e seus respectivos nós e redes de canais. Na sua segunda parte, utiliza o método do Soil Conservation Service na separação de chuva-vazão e geração dos hidrogramas das sub-bacias, onde a estimativa do escoamento superficial é basicamente uma função da precipitação de projeto e do número de deflúvio (RIGHETTO; PORTO; VILLELA, 1994).

A utilização do modelo é bastante simples, sendo requeridos como dados de entrada para uma simulação o tempo de retorno e a duração da chuva, além do local onde se deseja simular o hidrograma, podendo ser uma sub-bacia ou um tramo do canal. (MARTINS, 2012)

### 3.5.2 Método SCS

Na maioria das bacias urbanas brasileiras, a ausência de dados de vazão é a situação corriqueira, o que dificulta realizar estudos hidrológicos, particularmente, nas pequenas bacias hidrográficas.

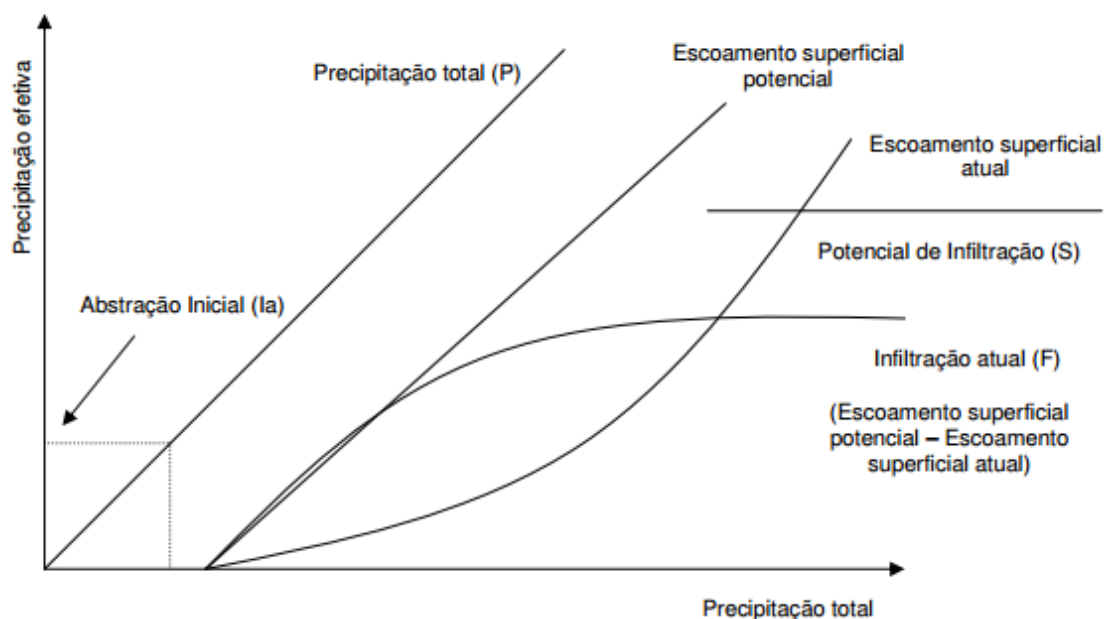
Na falta de dados, a vazão de projeto pode ser estimada pelos métodos indiretos que consistem em transformar a chuva de projeto em vazão de projeto. Dentre os métodos indiretos pode se destacar o Método de Soil Conservation Service (SCS). (NAKAYAMA et al., 2011)

O método de Soil Conservation Service (SCS) foi desenvolvido, inicialmente, para estimar o volume de “runoff” em bacias hidrográficas rurais pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Ao longo dos anos este método tornou-se a mais popular ferramenta para cálculo de “runoff”, devido à sua relativa facilidade de uso e, atualmente, é utilizado também para bacias urbanas. (NAKAYAMA et al., 2011).

O método de SCS consiste em determinar a chuva efetiva e transformar esta chuva em vazão, utilizando os conceitos básicos do hidrograma unitário.

Na Figura 8 pode se observar um esquema geral do método Curva Número (CN - SCS) e seus parâmetros.

**Figura 8** – Representação gráfica do método Curva Número (CN - SCS)



Fonte: Mello e Silva (2001).

O embasamento físico deste método pode ser entendido da seguinte forma:

$$\frac{\text{Volume infiltrado}}{\text{Capacidade máxima de absorção}} = \frac{\text{Precipitação efetiva}}{\text{Precipitação total}}$$

Na realidade, existem perdas iniciais no processo associadas à infiltração inicial, retenção pelas depressões do terreno e cobertura vegetal, as quais são denominadas abstrações iniciais. Assim, obtém-se a seguinte formulação: (MELLO & SILVA, 2001)

$$\frac{P-Q-IA}{S-IA} = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

Onde P é a precipitação total, Q, o deflúvio ou precipitação efetiva, S, é a capacidade máxima de absorção de água e Ia, abstrações iniciais. Segundo os autores desta proposta, Ia corresponde a 20% de S. Sendo assim, a equação que estima o deflúvio, fica: (MELLO; SILVA, 2001)

$$Q = \frac{(P-0,20.S)^2}{P+0,80.S} \quad (2)$$

O método estabelece que somente exista escoamento quando P for superior às abstrações iniciais, o que se observa pelo numerador da equação 2. A capacidade máxima de absorção S é obtida com base na Curva Número (CN), de acordo com a equação abaixo:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Os valores para CN variam de 1 a 100 e estão associados a diversos parâmetros fisiográficos como cobertura vegetal, umidade do solo antecedente ao evento e classe de solo. Quanto maior o valor do CN, menor é o potencial de retenção da bacia, ou seja, a chuva que esco superficialmente será maior. Os valores de CN, segundo Seybert (2006), os valores mais usuais de CN encontram-se entre 40 e 98.

Segundo (MCCUEN, 1998) o SCS classificou nos Estados Unidos mais de 4.000 solos para verificar o potencial de escoamento e classificou estes grupos em quatro, identificando com as letras A, B, C e D.

- Grupo A: são aqueles que produzem pequeno escoamento e alta infiltração, caracterizados por altos teores de areia, pequenos teores de silte e argila e profundos;
- Grupo B: menos permeáveis que os solos da categoria A, ainda sendo arenosos, porém, menos profundos;
- Grupo C: solos que geram escoamento superficial superior ao solo B, com capacidade de infiltração média a baixa, percentual mais elevado de argila e pouco profundos;
- Grupo D: solos pouco profundos, com baixa capacidade de infiltração e presença de argilas expansivas, com maior capacidade para geração do escoamento.

Existem diversos métodos para determinação do uso e ocupação do solo, como o reconhecimento de campo e a análise de imagens de satélite e de mapas de uso do solo (USDA, 1986). O SCS desenvolveu tabelas que consideram as diversas formas de uso e ocupação, o tipo de solo e a umidade antecedente, e associam essas condições a um valor de CN.

Com base nesses agrupamentos hidrológicos do SCS obteve-se a tabela 1 com os valores de CN.

**Tabela 1** – Valores de CN para diversas situações de cobertura vegetal e tipos de solos

Utilização ou cobertura do solo		Grupo hidrológico			
		A	B	C	D
Uso residencial:					
Tamanho médio do lote	% Impermeável				
<500 m <sup>2</sup>	65	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
1500 m <sup>2</sup>	30	57	72	81	86
2000 m <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
4000 m <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
Estacionamentos pavimentados, telhados		98	98	98	98
Ruas e estradas:					
Pavimentadas, com guias e drenagem		98	98	98	98
Com cascalho		76	85	89	91
Com terra		72	82	87	89
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)		89	92	94	95
Distritos industriais (72% de impermeabilização)		81	88	91	93
Espaços abertos, parques, jardins:					
Boas condições, cobertura de grama > 75%		39	61	74	80
Condições médias, cobertura de grama > 50%		49	69	79	84
Terreno preparado para plantio, descoberto		77	86	91	94
Culturas em fileiras					
Linha reta	Condições ruins	72	81	88	91
	Condições boas	67	78	85	89
Curva em nível	Condições ruins	70	79	84	88
	Condições boas	65	75	82	86
Culturas de grãos					
	Condições ruins	65	76	84	88
	Condições boas	63	75	83	87
	Condições ruins	63	74	82	85
	Condições boas	61	73	81	84
pasto					
	Condições ruins	68	79	86	89
	Condições médias	49	69	79	84
	Condições boas	39	61	74	80
Campos		30	58	71	78
Floresta					
	Condições ruins	45	66	77	83
	Condições médias	25	55	70	77
	Condições boas	36	60	73	79

Fonte: Porto (1995).



### 3.5.2.1 Cálculo da vazão a partir da chuva efetiva

Para efetuar a transformação de chuva em vazão, define-se, inicialmente, o hidrograma unitário (HU) característico da bacia, que apresenta forma triangular, valendo a seguinte relação:

$$t_b = 2,67 t_a \quad (4)$$

onde:  $t_b$  é o tempo de base do hidrograma;  $t_a$  é o tempo de ascensão do hidrograma, dado por

$$t_a = t_p + \frac{D}{2} \quad (5)$$

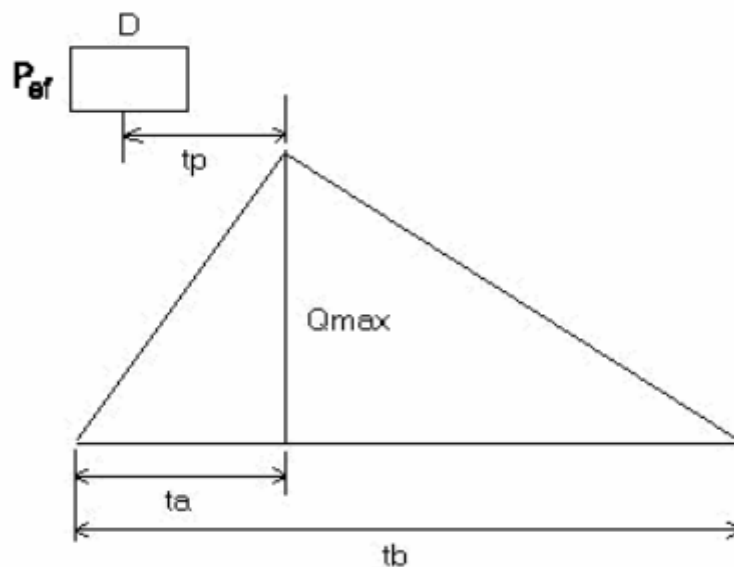
onde:  $D$  é a duração da chuva efetiva unitária;  $t_p$  é o tempo de retardamento da bacia, que é o intervalo de tempo entre instante correspondente à metade da duração da chuva e o instante do pico do hidrograma; o  $t_p$  pode ser obtido da seguinte forma:

$$t_p = 0,6 t_c \quad (6)$$

onde:  $t_c$  é o tempo de concentração da bacia.

O aspecto do hidrograma triangular unitário do SCS é mostrado na Figura 9.

**Figura 9** – Hidrograma triangular unitário do SCS



Fonte: Nakayama et al. (2011).

Conhecida a área do triângulo, que corresponde ao volume d'água unitário precipitado sobre a bacia ( $P_{ef} \times A.D.$ ), e o tempo da base, pode-se determinar a vazão de pico.

O método consiste em gerar hidrogramas triangulares para cada chuva efetiva, com sua correspondente vazão de pico, a partir do hidrograma unitário triangular. O hidrograma final é a composição de todos os hidrogramas decorrentes de cada chuva efetiva. (NAKAYAMA et al., 2011)

Uma aplicação muito frequente de modelos chuva-vazão como é o caso do CN-SCS, é em módulos de modelos de gerenciamento dos recursos hídricos em diferentes áreas, por exemplo: desenvolvimento urbano, energia, transporte, produção agrícola, controle ambiental, controle de calamidades, gerenciamento de recursos hídricos e sistemas de informação (TUCCI, 2005).

### 3.6 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Já há algum tempo, com a evolução da informática, surgiram novas possibilidades de análises estratégicas para o auxílio na tomada de decisão. A possibilidade de visualização dos resultados das análises, especialmente em um mapa, faz com que a compreensão por intermédio do analista seja de forma facilitada e clara. Esse tipo de tecnologia é chamada de Sistema de Informação Geográfica, mas essa tecnologia já era usada bem antes da invenção do computador.

Um bom exemplo disso é um caso acontecido na cidade de Londres em 1854. Nessa época Londres estava sofrendo uma grave epidemia de cólera, doença cuja forma de contaminação não se conhecia. Numa situação em que já havia ocorrido mais de 500 mortes, o doutor John Snow teve uma ideia: colocar no mapa da cidade a localização dos doentes de cólera e dos poços de água (naquele tempo, a fonte principal de água dos habitantes da cidade) (ZAHAR, 2008).

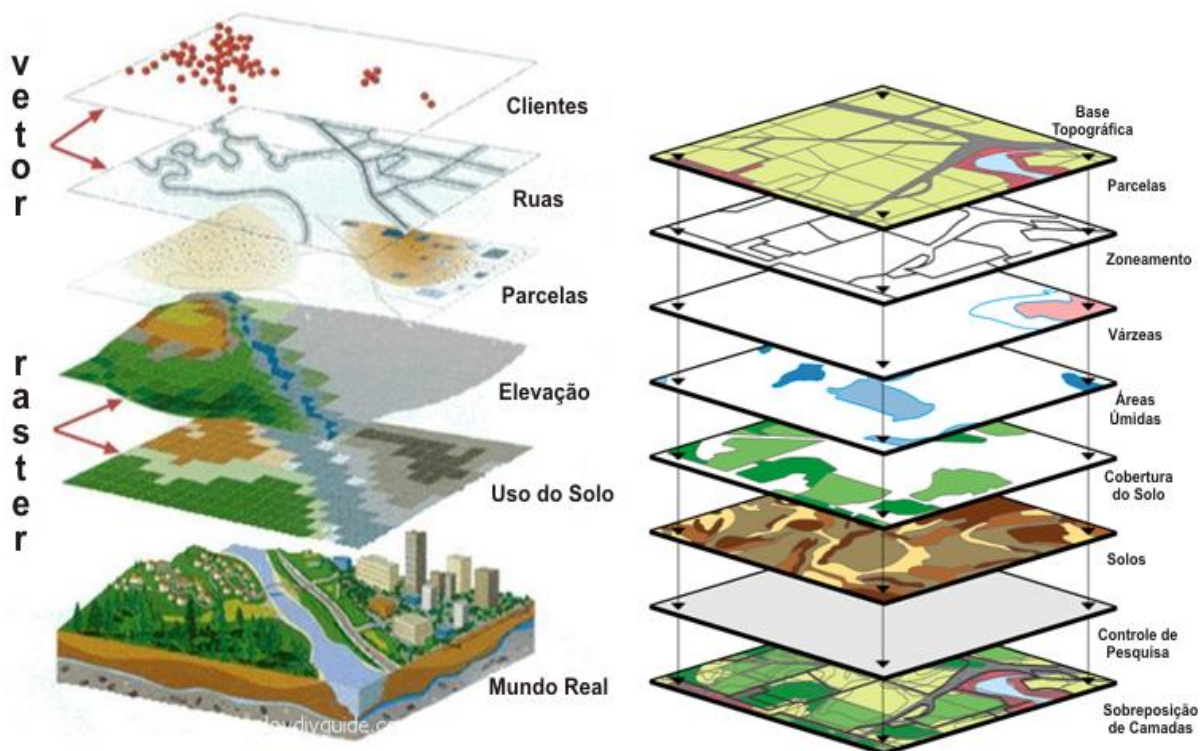
Com a espacialização dos dados, o doutor Snow percebeu que a maioria dos casos estava concentrada em torno do poço da Broad Street e ordenou que este fosse lacrado, o que contribuiu em muito para debelar a epidemia (ZAHAR, 2008).

Com o advento do computador houve um grande salto no poder e na forma de realizar processamento em sistemas de informação geográfica. O SIG consiste em um sistema computacional que reúne um poderoso conjunto de ferramentas para a entrada, armazenamento, recuperação, transformação, análise e representação de dados do mundo real para um conjunto particular de propósitos. A aplicação de técnicas de geoprocessamento é extremamente útil para o planejamento municipal, pois reúne

aplicativos que permitem inferir, representar visualmente dados espaciais, estatísticos e textuais a eles relacionados, a partir de uma base de dados georreferenciada.

Na figura 10 podemos visualizar como se organiza alguns tipos de informação no SIG são colocadas em camadas.

**Figura 10** – Composição das camadas em um SIG



Fonte: Uchicago (2015)

Com o desenvolvimento dos SIG, analistas ambientais aumentaram suas possibilidades de dispor de sistemas de informações nos quais os dados são mais acessíveis, mais facilmente combinados e permitem uma flexibilidade de modificações para atender as necessidades de processos decisórios ambientais.

Segundo Souza (1999), a tecnologia é construída sobre uma variedade enorme de disciplinas científicas, passando por cartografia, sensoriamento remoto, aerofotogrametria, ciência da computação, estatística, entre outras. Consequentemente, o envolvimento com SIG requer um extenso embasamento teórico em tratamento digital de dados e ciências de mapeamento.

Segundo Korte (2001), o SIG é uma ferramenta utilizada para análises de informação geográfica que usa funções de dados geométricos ligados a tabelas de atributos alfanuméricos. Essas ligações são feitas por meio de um identificador (chave).

Sistemas de Informação Geográfica têm sido utilizados para a geração de banco de dados que funcionam como parâmetros de entrada para os modelos hidrológicos, permitindo, através dessa integração, a manipulação de dados espaciais e servindo como ferramenta de auxílio para a tomada de decisões relacionadas com o planejamento e o ordenamento do território (SANTOS et al., 2006; MENDES FILHO et al., 2007).

Alguns Sistemas de informações georreferenciadas oferecem um conjunto de ferramentas que permitem desenvolver modelagens complexas envolvendo vários critérios e objetivos. A introdução recente de rotinas de apoio à decisão no ambiente dos SIGs tem possibilitado o aumento na flexibilidade e na complexidade das análises efetuadas com essa ferramenta.

### **3.6.1 Modelos hidrológicos baseados em SIG**

Um modelo hidrológico requer uma vasta quantidade de informação para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia hidrográfica. No entanto, se o modelo tiver em conta a variabilidade espacial dos processos como a infiltração, a evaporação e as características fisiográficas da bacia, a quantidade de informação requerida aumenta, pois cada unidade hidrológica será caracterizada pela sua topografia, geologia, tipo e uso de solo e clima. (SANTOS et al., 2006)

A modelagem hidrológica tem tido sucesso na simulação de fatores temporais em modelos que possuem milhares de passos, mas nos quais a desagregação espacial da área de estudo é relativamente simples, ou mesmo considerando as propriedades espaciais como uniformes. (FERRAZ et al., 1999)

Tsou e Whittemore (2001) apresentam como vantagem da utilização do SIG em aplicações de recursos hídricos, sua capacidade de gerar informações valiosas para a tomada de decisões, através da apresentação de mapas a partir da espacialização dos dados de saída de modelos matemáticos.

Aproveitando a capacidade de processamento de dados espaciais tais como: modelos numéricos de terreno, mapeamentos de uso e ocupação de solo etc., são implementados em ambientes SIG, principalmente modelos distribuídos por módulos (MELANCON, 1999).

As integrações entre os modelos hidrológicos e os SIG's vêm ganhando importância, pois possibilitam conhecer espacialmente a magnitude dos impactos nos recursos hídricos, de forma que os modelos hidrológicos simulam vazões de acordo com

cenários (uso e cobertura do solo) e relacionam as causas dos impactos na bacia hidrográfica.

Desenvolvidos para manipular informações espacialmente distribuídas, os SIGs têm se destacado em aplicações de modelagem hidrológica, e seu objetivo principal é a determinação de parâmetros hidrológicos pela análise topográfica do terreno, a partir de um Modelo Digital de Elevações e das características da cobertura do solo. Alguns desses modelos podem ser executados totalmente dentro de um SIG, em casos em que a variabilidade temporal não seja necessária ou nos quais sejam consideradas as médias anuais. (FERRAZ et al., 1999)

### **3.6.2 Modelo digital de elevação na determinação de parâmetros hidrológicos**

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação matemática da distribuição espacial das cotas altimétricas do terreno estudado. A sua geração é feita a partir da interpolação de pontos topográficos ou curvas de nível do terreno, utilizando-se para isso rotinas computacionais apropriadas do SIG. A superfície gerada, no formato grade, representa de forma contínua a variação da altitude do terreno. (FERRAZ et al., 1999)

O MDE pode ser desenvolvido a partir de uma série de fontes, incluindo informações do terreno, fotogrametria, sensoriamento remoto da superfície e cartografia.

A junção de informações hidrológicas com o SIG tem preenchido lacunas na modelagem hidrológica da maioria das bacias urbanas, gerando informações distribuídas, a partir de plano de informações que representam as características físicas da bacia: solos, geologia, uso e cobertura do solo e representação morfológica por meio de modelos digitais de elevação (MDE).

Para Paiva, Collischonn e Tucci (2011) é possível realizar uma modelagem hidrológica e hidrodinâmica em grande escala usando dados limitados e umas abordagens baseadas em SIG. Em seu trabalho elaboraram uma rotina de fácil implantação que utiliza modelo digital de elevação, direção do fluxo do escoamento, acumulação do fluxo, superfície de drenagem, característica do rio ou canal, geometria da seção de interesse e a geometria da área de inundação.

Os SIG's têm permitido processar informações de características físicas através de modelos digitais de elevação, como comprimento de trechos de rios, drenagens,

áreas, declividade, fluxo de drenagens, drenagem acumulada, entre outras informações, que associado aos modelos hidrológicos, tem permitido obter simulações em macro escalas. (GAMA, 2011)

Uma outra possibilidade é a geração de uma imagem de declividades, que é a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Considerando um MDE de dados altimétricos extraídos de uma carta topográfica e traçando um plano tangente a essa superfície num determinado ponto P, a declividade nesse ponto corresponde à inclinação desse plano em relação ao plano horizontal. Uma imagem de declividades pode ser posteriormente reclassificada, gerando imagens de classes de declividades, de acordo com a conveniência do estudo a ser realizado. (FERRAZ et al., 1999)

### **3.6.3 Módulos acoplados ao SIG**

Por volta das décadas de 1960 e 1970 os modelos hidrológicos integrados com SIG foram desenvolvidos com poucas interações, alcançando uma maior compreensão dessa integração após a década de 1990. Em 1987, pesquisadores tentaram construir funções internas no SIG que conseguissem representar as transformações chuva-vazão (BERRY; SAILOR, 1987).

Petts (1995) tentou identificar a “moderna” abordagem geográfica em hidrologia, propondo a integração entre os dados de sistema fluvial e o SIG. Desde então vários pesquisadores têm concentrado esforços para poder obter a eficiência dessa integração (FOTHERINGHAM; ROGERSON, 1994; GOODCHILD et al., 1992; TSOU; WHITTEMORE, 2001; WHITEAKER, 2004; MELO et al., 2008).

Em alguns SIGs ha opção de aceitar módulos desenvolvidos por terceiros. Esses módulos podem estabelecer um novo conjunto de ferramentas específicas para uma determinada linha de pesquisa.

De maneira geral a integração entre Sistemas de Informações Geográficas e modelos hidrológicos pode ser dividida em dois grupos: integração parcial e integração plena. Na integração parcial cada subsistema é uma entidade independente, que exige determinados tipos de dados, tipos e formatos de arquivos e que executa funções particulares sobre um domínio de aplicação. Na integração plena por sua vez, uma das tecnologias é configurada para executar as tarefas ou funções de outras tecnologias (MELO et al., 2008).

Segundo Chen et al. (2009) a modelagem de inundações em SIG pode ser bastante simples permitindo inclusive o uso de módulos acoplados de outros desenvolvedores e ainda com uma certa expertise, o usuário pode elaborar o seu próprio módulo para resolver problemas específicos.

Em um ambiente SIG e/ou por meio de módulos acoplados, pode-se calcular a área da bacia de contribuição, o comprimento dos canais, o fator de forma etc.. Com a utilização de dados de precipitação e imagens de uso do solo pode se determinar o escoamento superficial, gerando hidrogramas para comparação com os hidrogramas observados.

Com a utilização de dados da literatura, é possível estimar a carga de poluentes recebida por um rio ou represa em determinada bacia, observando seus caminhos preferenciais de escoamento como pode ser visto na figura 11.

**Figura 11** - Representações esquemáticas. a) modelo de ponto d'água em oito direções, em que a água flui para a direção de maior declividade; b) Modelo Digital de Elevações, em que cada pixel da imagem tem o valor da cota naquele ponto; c) imagem de direção de fluxo; d) determinação da rede de drenagem; e e) acumulação de fluxo.

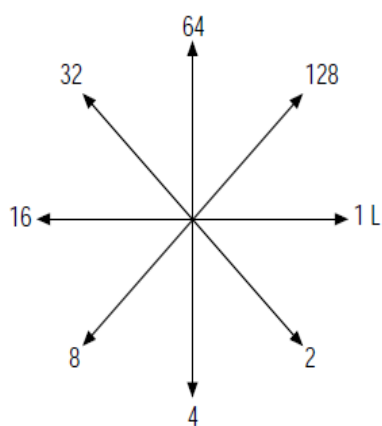


Figura a

45	38	44	45
40	34	50	60
58	31	30	53
50	45	32	22

Figura b

1	4	8	16
1	34	50	60
1	31	30	53
128	45	32	22

Figura c

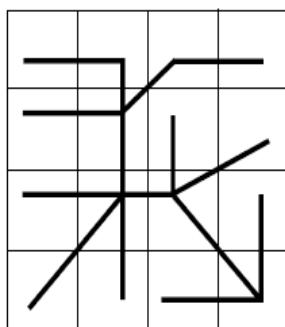


Figura d

0	1	1	0
0	5	0	0
0	9	12	0
0	0	0	15

Figura e

O ArcGIS® tem a possibilidade de carregar os módulos do HEC-RAS denominado HEC-GeoRAS, o Módulo do HEC-HMS denominado HEC-GeoHMS e a extensão L-THIA, habilitando todo um novo conjunto de ferramentas para modelagens hidráulicas e hidrológicas.

### 3.7 SOFTWARES HEC-HMS 3.5 E HEC-RAS 4.1.1

A modelagem computacional pode ser considerada como uma forma de representar a realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem essa realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e prever alterações futuras nos mais diversos sistemas (SILVA, 2006).

De maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros, os quais mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não possa variar espacialmente. As variáveis podem também mudar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado (MEIRELLES, 2007).

O modelo hidrológico é uma ferramenta que vem sendo bastante utilizada para entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

#### 3.7.1 HEC-HMS

O HEC- HMS é um programa computacional desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, com a finalidade de simular os processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas dendríticas. O HEC- HMS é de domínio público, sendo, desse modo, aplicado em diversos estudos no mundo todo.

Para que seja feita a modelagem hidrológica, o HEC-HMS configura a bacia hidrográfica nos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacia (subbasin), que é uma representação da bacia hidrográfica; trecho (reach), que corresponde a um trecho de canal que conduz vazões para jusante; junção (junction), que corresponde a um nó; fonte (source), utilizado para introduzir vazão em um ponto do sistema; sumidouro (sink), utilizado para representar a saída da bacia; reservatório (reservoir), utilizado para



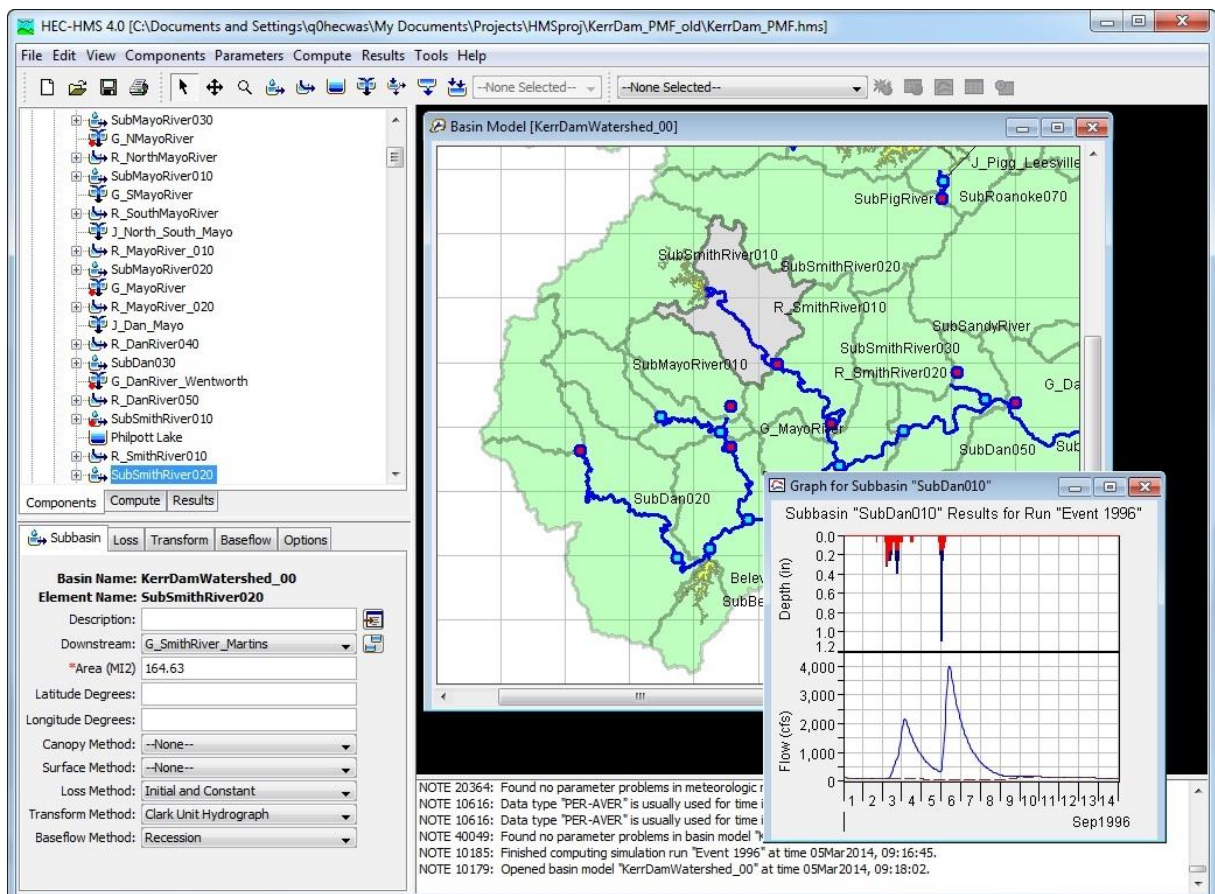
representar estruturas de reservação; e derivação (diversion), para representar a retirada de água do canal. (PONTREMOLEZ, 2013)

Os dados de entrada do modelo são relativos às características físicas de cada uma das sub-bacias (área, área impermeável, CN, tempo de concentração e parâmetros relacionados ao fenômeno de propagação de ondas de cheia), à distribuição temporal da precipitação e ao método de transformação de chuva em vazão. (PONTREMOLEZ, 2013)

Os hidrogramas produzidos no HEC-HMS podem ser utilizados para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de escoamento, impactos da urbanização, dimensionamento de reservatórios, redução do risco de inundações, regulamentação de planícies de inundação, operação de sistemas, entre outros (UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS- USACE, 2010)

Na figura 12 podemos observar o layout do programa HEC-HMS.

**Figura 12** – Layout do programa HEC-HMS



Fonte: United States Army Corps of Engineers- USACE (2010).

### 3.7.2 HEC-RAS

O HEC-RAS é um programa computacional desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Esse software é utilizado para modelagem hidráulica unidimensional em um canal (ou rede de canais), considerando regime permanente ou não permanente (USACE, 2010).

Por ser de domínio público, é aplicado em estudos no mundo todo. Seus principais dados de entrada são: a representação esquemática da rede de canais, os dados de geometria de seções transversais, os valores para o coeficiente “n” de Manning para o canal e planície de inundação, a distancia entre as seções transversais consideradas, a vazão utilizada para modelagem (valor fixo para o escoamento permanente e hidrogramas para o escoamento não permanente) e as condições de contorno (USACE, 2010).

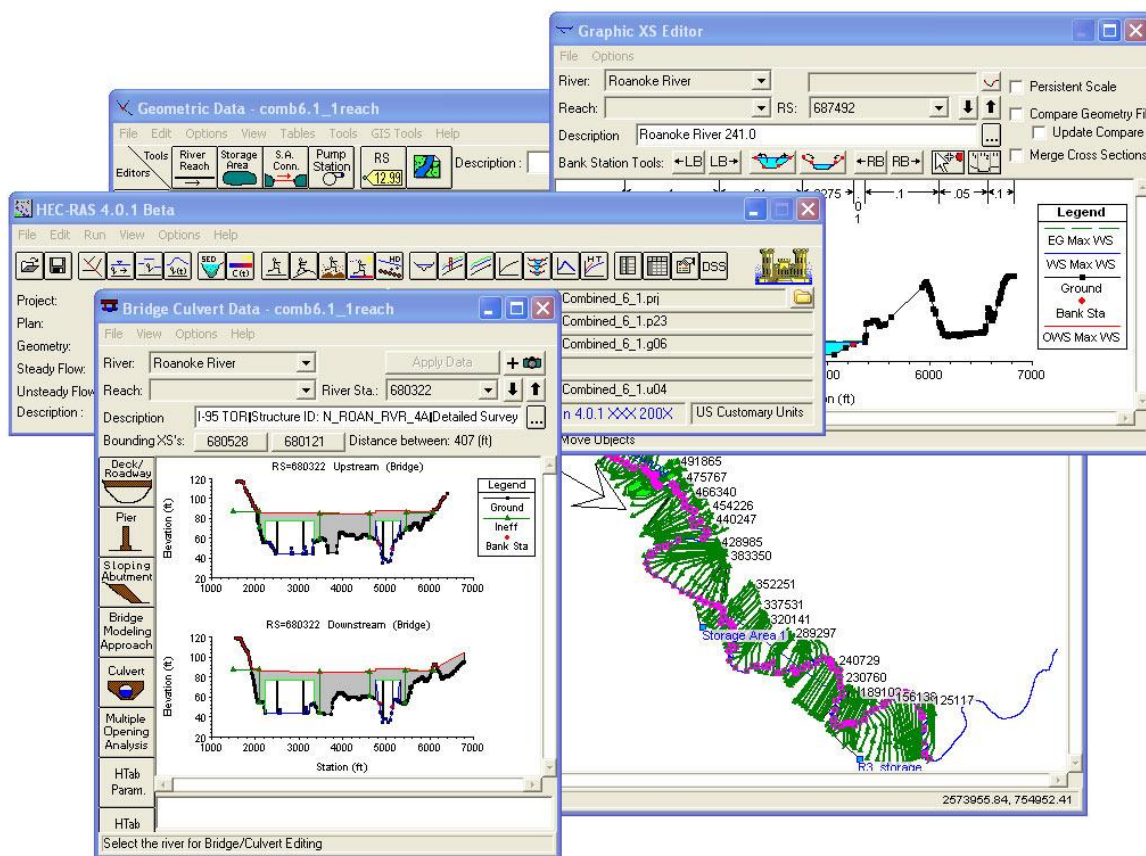
O procedimento computacional baseia-se na solução da equação da energia. O modelo permite a análise das medidas de redução do risco de inundações, pela comparação dos perfis de superfície da água na condição “sem projeto” e “com projeto”.

Os cinco passos da modelagem hidráulica com HEC-RAS são: criar um projeto, definir a rede de canais e entrar com os dados de Geometria das seções transversais, definir a vazão e as condições de contorno, executar a análise hidráulica, e revisar os resultados e produzir relatórios (USACE, 2010).

Esse programa se comunica com o SIG através da plataforma HEC-GeoRAS, o que permite a retirada de informações necessárias à modelagem hidráulica a partir de modelos digitais de terreno.

Na figura 13 podemos visualizar o HEC-RAS em aplicações do USGS.

**Figura 13** – HEC-RAS em modelagem feita pelo USGS



Fonte: USGS (2012).

### 3.8 MÓDULOS HEC-GEORAS E HEC-GEOHMS

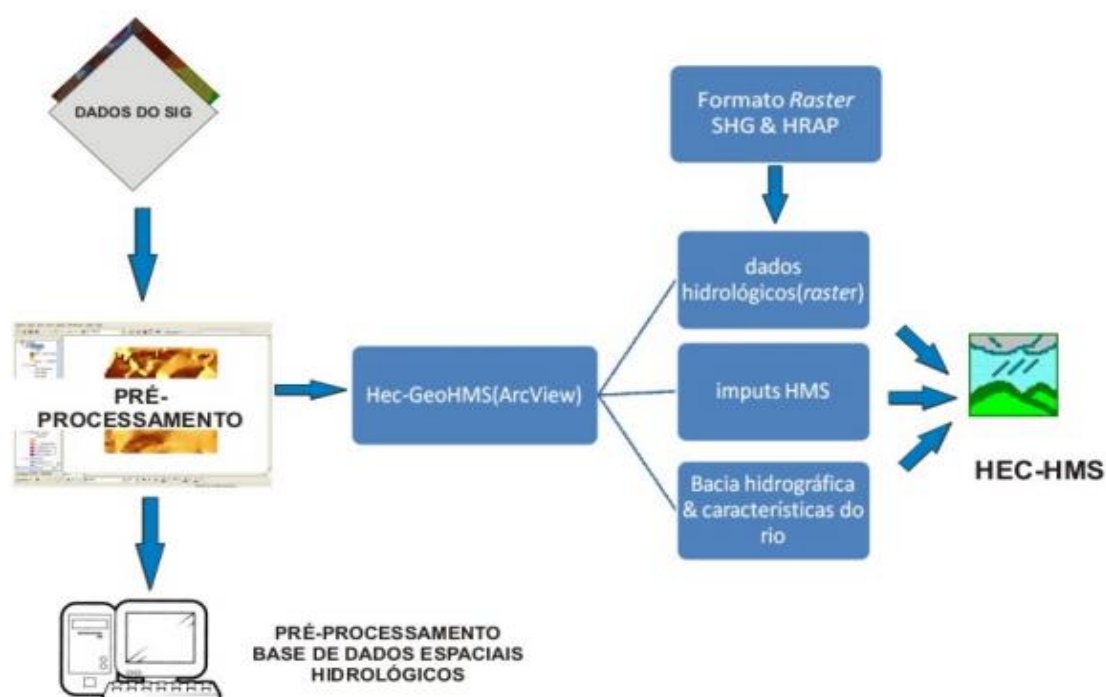
O HEC-GeoHMS é um pacote para uso com o Sistema de Informações Geográficas ArcView. O HEC-GeoHMS usa a extensão Spatial Analyst para desenvolver uma série de modelos hidrológicos. Analisando o modelo digital de terreno, HEC-GeoHMS transforma as vias de drenagem e limites de bacias hidrográficas em uma estrutura de dados hidrológicos que representa a resposta da bacia para a precipitação que a incide.

Além da estrutura de dados hidrológicos, o módulo tem a capacidade de desenvolver: dados baseados em grade para a transformação linear escoamento distribuído, o modelo de bacia, divisor de águas e transmitir as características ao arquivo de mapa de fundo.

O HEC-GeoHMS proporciona um ambiente de trabalho integrado com gerenciamento de dados acrescentado novas ferramentas customizadas, que inclui uma interface gráfica do usuário com menus, ferramentas e botões. As capacidades interativas adicionais permitem aos usuários construir um esquema hidrológico da bacia hidrográfica com medidores de vazão por células, estruturas hidráulicas e outros pontos de controle.

A figura 14 a seguir mostra um esquema de integração dos SIG com um modelo hidrológico HEC-GeoHMS

**Figura 14** – Representação esquemática da relação entre os SIG e o modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Melo et al. (2008).

O HEC-GeoRAS consiste em um módulo cuja finalidade refere-se ao pré e pós-processamento dos dados geométricos da rede fluvial, da distribuição de fluxos, das áreas de armazenamento e da variação da cota d'água na planície de inundação.

Seus principais dados de entrada são: a representação esquemática da rede de canais, os dados de geometria de seções transversais, os valores para o coeficiente “n” de Manning para o canal e planície de inundação, a distância entre as seções transversais consideradas, a vazão utilizada para modelagem e as condições de contorno.

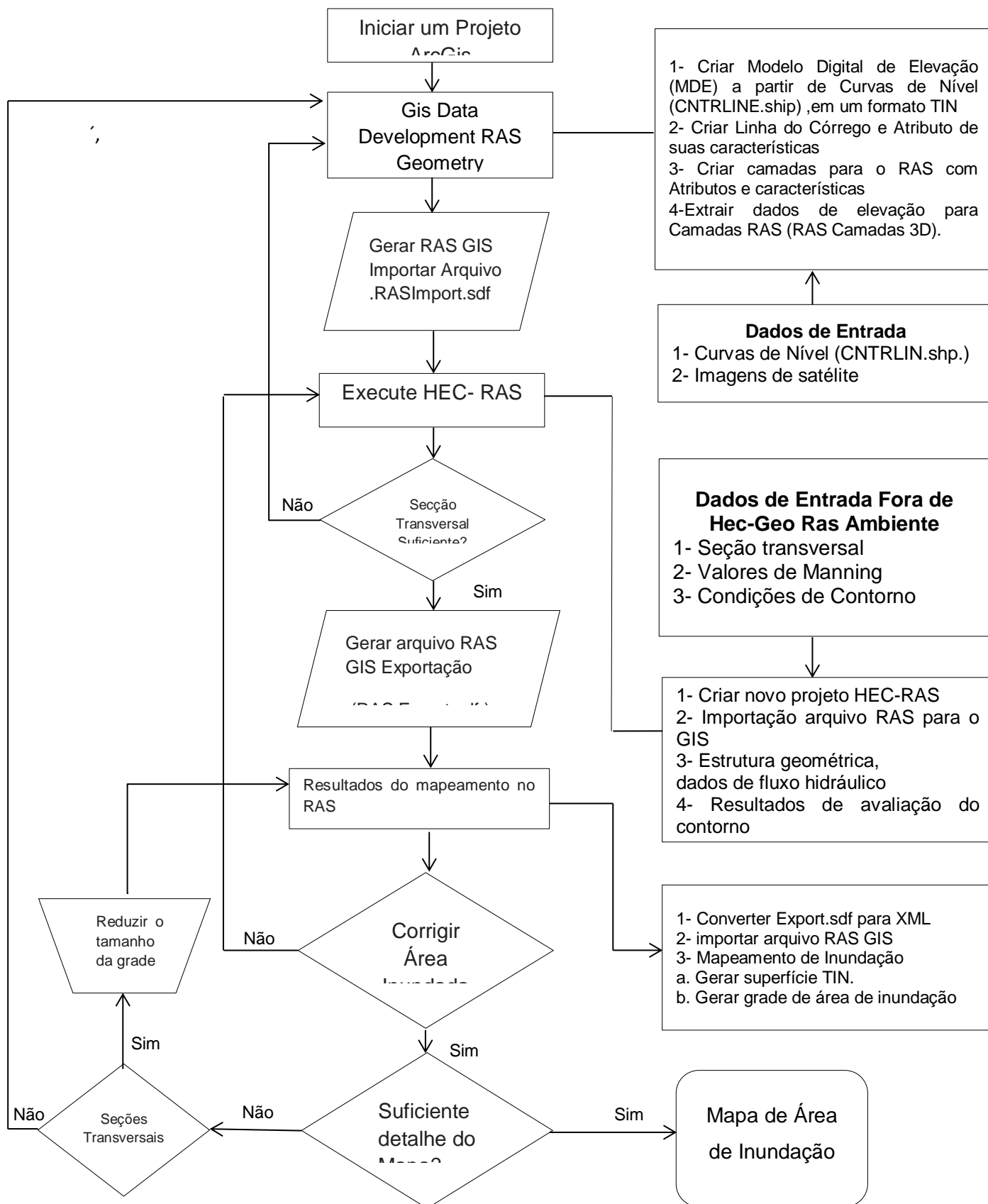
O modelo permite a análise das medidas de redução do risco de inundações, pela comparação dos perfis de superfície da água na condição em que a bacia se encontra e para as precipitações que pode incidir sobre a microbacia.

Essa interface permite a construção de projetos com um único trecho ou com uma rede de canais. São utilizadas informações topográficas das seções para descrever a geometria do canal.

Os cinco passos da modelagem hidráulica com HEC-GeoRAS são: criar um projeto, definir a rede de canais e entrar com os dados de geometria das seções transversais, definir a vazão e as condições de contorno, executar a análise hidráulica, revisar os resultados e produzir relatórios (USACE, 2010).

Diagrama para a utilização de HEC-GeoRAS é mostrado na figura 15.

**Figura 15** – Diagrama do processo no HEC-GeoRAS



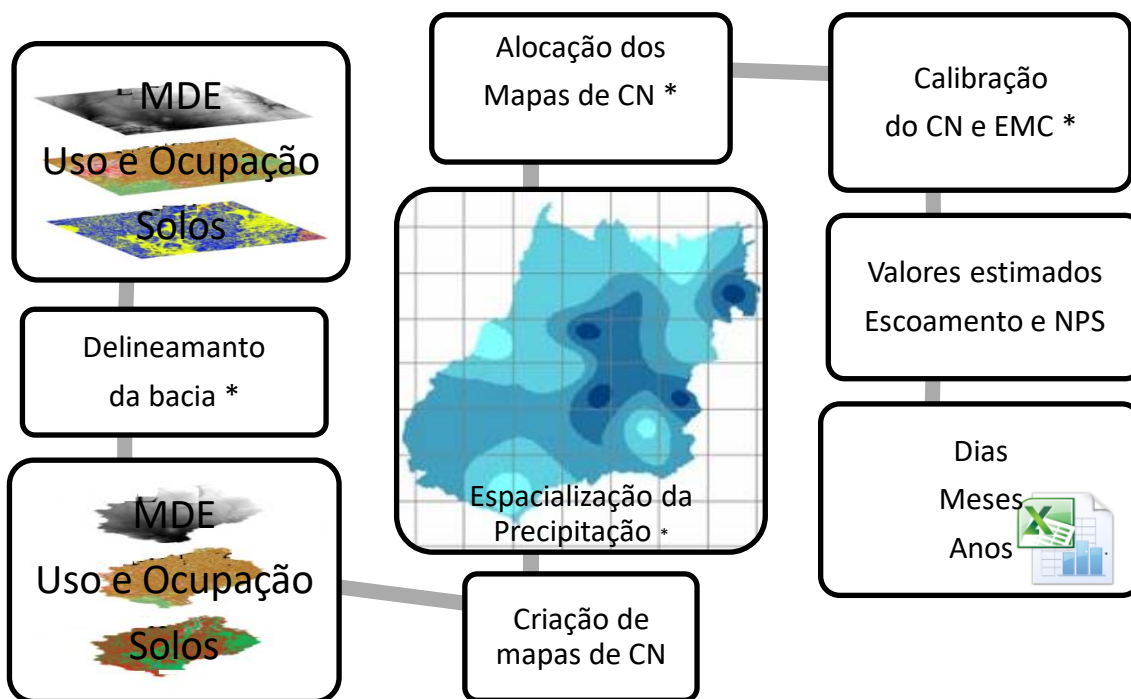
### 3.9 EXTENSÃO L-THIA

O L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) foi desenvolvido pela Universidade de Purdue, em Indiana, Estados Unidos. É um modelo integrado com o Sistema de Informações Geográficas Arcview® na forma de extensão, e destinam-se a quantificar alterações no escoamento superficial e nas cargas difusas de poluição, decorrentes das mudanças de uso e ocupação do solo. (APRIGIO, 2012)

O componente central do L-THIA é o método do Soil Conservation Service, atual Natural Resources Conservation Service (NRCS), do U S Department of Agriculture (USDA). Partindo de relações empíricas entre precipitação e escoamento superficial, determina-se o efeito das mudanças no uso e ocupação do solo sobre as alterações do volume de escoamento superficial.

O L-THIA exige alguns dados de entrada para serem executados esses requisitos podem ser visualizado na figura 16.

**Figura 16** – Diagrama para o uso da extensão L-THIA



\*Fases Opcionais

Fonte: Adaptado Manual L-THIA ver. (2013).

O L-THIA fornece como saída de dados: a simulação do escoamento superficial o EMC (Event Mean Concentration) Concentração média do evento e o NPS (Nonpoint Pollution Source) Pontos de entradas de Poluição.

O L-THIA vem como uma ferramenta capaz de nortear os gestores municipais, planejadores e profissionais de recursos hídricos, mesmo sem muitos dados de uma área específica ou do conhecimento necessário para entender como os fenômenos ocorrem, seja capaz de considerar, por meio de simulações, diferentes níveis de impacto de gerado por cada uso do solo, suas mudanças e como essas mudanças afetam a hidrologia da área, mudando o seu escoamento.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

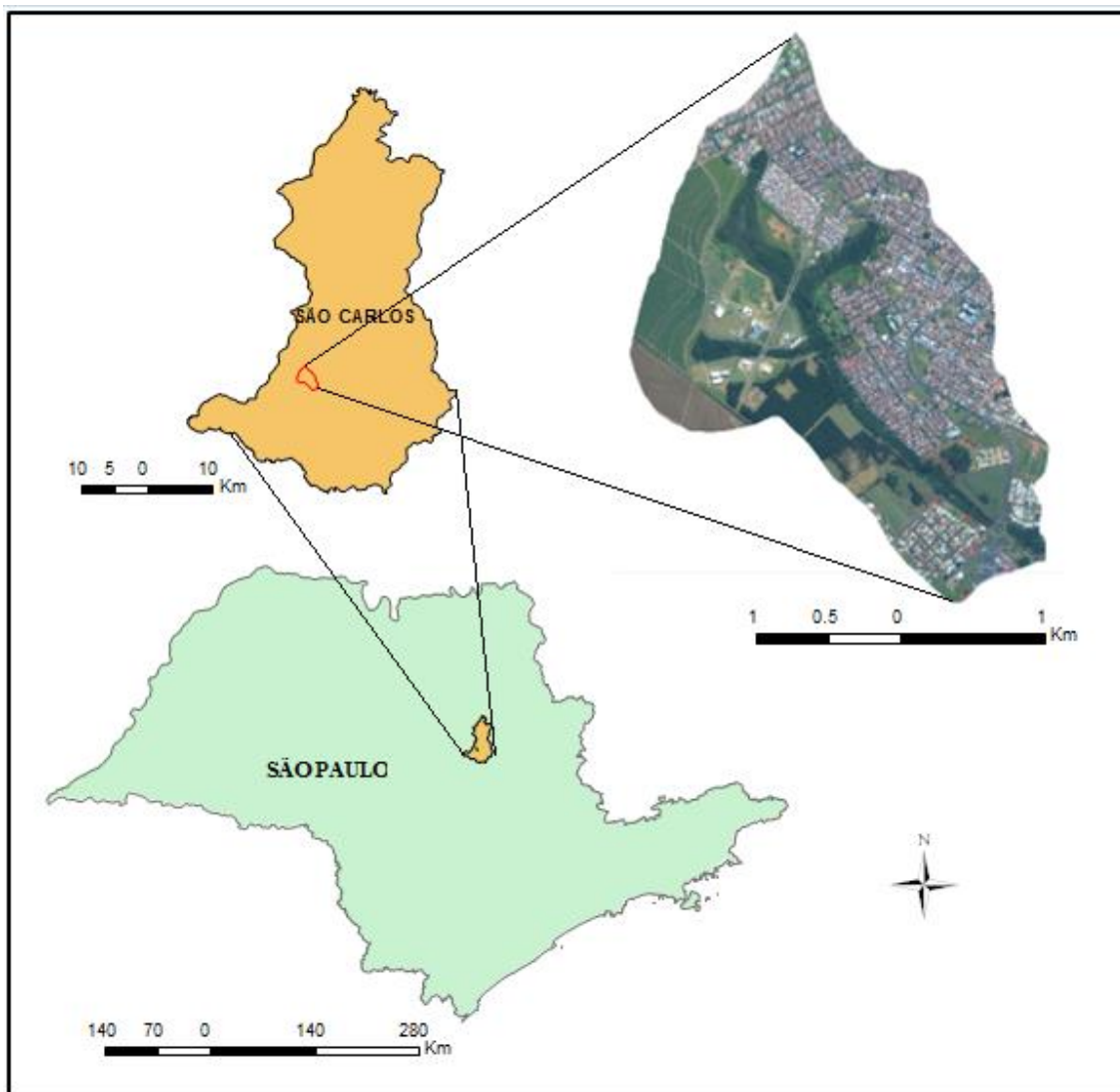
Primeiramente é descrita a área de estudo, com informações sobre as características físicas da bacia do Mineirinho e o processo de ocupação. Em seguida, é feito um detalhamento sobre os dados topográficos utilizados, e com base nestes, explica-se como foi realizada a delimitação das sub-bacias consideradas na modelagem hidrológica.

### **4.1 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo é a bacia do Córrego do Mineirinho podendo ser visualizada na figura 17, tributário do rio Monjolinho situada no município de São Carlos. A bacia possui 5,85 km<sup>2</sup> e perímetro de 10,81 km. A diferença entre a cota mais baixa e mais alta da bacia é de 81 m e seu comprimento médio é de cerca de 4 km.



**Figura 17** - Município de São Carlos. Localização da Bacia do Córrego do Mineirinho.



Os solos são, primordialmente, latossolo vermelho-amarelo, profundo e distrófico nos interflúvios, classificado como grupo hidrológico do solo do tipo B, conforme a classificação proposta pelo Soil Conservation Service, aprimorada por Lorandi (1985) e Sartori et al. (2005) para as características dos solos brasileiros. No interior dos vales de drenagem, encontram-se gleissolos e organossolos, hidromórficos, saturados permanente ou intermitentemente. (APRIGIO, 2012)

Segundo Tolentino (2007), o clima de São Carlos é de transição entre clima quente de inverno seco para clima tropical com verão úmido e inverno seco, com amplitude térmica entre verão e inverno menor que 5 °C. O clima da região é tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média do mês mais quente é 23,1 °C e do mês mais frio, 18,1 °C. A precipitação média anual é da ordem dos 1500 mm, e a normal de evaporação anual é 1431 mm (SÉ, 1992).

A bacia do Mineirinho começou a ser habitada de maneira lenta devido à saturação do antigo setor de crescimento da cidade, mas após a instalação do campus 2 da USP (Universidade de São Paulo) essa ocupação se acelerou. Atualmente, a área é ocupada por residências carentes, condomínios de alto padrão, um Shopping Center (Iguatemi São Carlos), um campus universitário, pastagens, cultivos de cana-de-açúcar e terrenos sem cobertura vegetal. (PONTREMOLEZ, 2013)

## 4.2 METODOLOGIA

O programa computacional utilizado para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido foi o Sistema para Processamento de Informações Geográficas – ArcGIS, versão 10.1.1.

Os dados disponíveis foram transportados para o banco de dados no referido software. A partir daí trabalhou-se com layers, nos quais ficaram armazenadas todas as informações da região de estudo. Cada uma dessas camadas, contém informações importantes e essas camadas podem ser virtualmente sobrepostas e assim permitir as simulações.

Um dos primeiro passo na fase de pré-processamento foi criar um modelo digital de elevação MDE do sistema da bacia em um formato Triangulated Irregular Network (TIN). O shape foi construído com um cuidado especial, a fim de proporcionar uma análise precisa, para determinar os limites de várzea e os cálculos de profundidades de inundação.

Sabe-se que a técnica mais apropriada para a classificação de imagens de satélite em ambiente urbano é a análise orientada a objetos. Portanto, a classificação da imagem de satélite foi feita utilizando-se esta técnica, visando à criação de um mapa vetorial da bacia urbana do córrego do Mineirinho, de onde seriam extraídas as informações necessárias para a utilização no modelo de simulação. (MARTINS, 2012)

Na tabela 2 podemos verificar os componentes e os atributos utilizados para a elaboração do modelo no SIG.

**Tabela 2** – Componentes e atributos utilizados

<b>Componente</b>	<b>Atributo</b>
Modelo Digital de Elevação	Resoluções de grade de 30 m adequado para a maioria das aplicações.
Hidrograma	Modelo usado em qualquer estado estacionário Resolução temporal depende a velocidade de ascensão do hidrograma.
Declividade do córrego	Definido individualmente para cada célula da grade
Largura media do córrego	Definido individualmente para cada célula da grade
Estimativa inicial da profundidade da vazão do córrego	A simulação foi executada com vazão constante para simular profundidades do canal de forma realista

#### 4.2.1 Pré-processamento de imagens

Para operações entre bandas, em processamento de imagens, O ArcGIS oferece as opções de soma, subtração, divisão e a multiplicação de uma banda. Nestas operações utiliza-se uma ou duas bandas de uma mesma área geográfica, previamente georeferenciadas. Realiza-se a operação "pixel" a "pixel", através de uma regra matemática definida, tendo como resultado uma banda representando a combinação das bandas originais.

De maneira geral, utiliza-se a operação de adição para realçar similaridade entre bandas ou diferentes imagens e, a subtração, a multiplicação e divisão, para realçar diferenças espectrais.

A imagem utilizada é um produto do satélite WorldView-II. O equipamento possui um sensor multiespectral que obtém imagens com resolução espacial de 0,46 m no modo pancromático e 1,85 m no modo multiespectral. Foram utilizadas cinco bandas espectrais: pancromática, Azul, Verde, Vermelha, e Infravermelho. Estes canais trabalham, respectivamente, nas seguintes faixas espectrais: 447 - 808 nm, 442 - 515 nm, 506 - 586 nm, 624 - 694 nm, 765 - 901 nm. A imagem foi obtida em 2 de junho de 2011, com ângulo offnadir 22,2° e resolução radiométrica de 11 bits. (PONTREMOLEZ, 2013)

O pré-processamento da imagem optou-se pelos processos de ortocorreção e georreferenciamento, que visam compensar as distorções devido à curvatura terrestre, relevo e velocidade do satélite durante a captura, fazendo com que a imagem corrigida tenha a mesma qualidade geométrica de um mapa, atribuindo para tanto um sistema de

coordenadas ao terreno. Entretanto, a imagem de satélite utilizada neste trabalho era uma imagem já georreferenciada. (MARTINS, 2012)

A informação espectral de uma cena pode ser representada por uma imagem espectral, onde cada "pixel" tem as coordenadas espaciais X, Y e a coordenada espectral L, que representa a radiância de um alvo no intervalo de comprimento de onda de uma banda espectral. Cada "pixel" de uma banda possui uma correspondência espacial com outro "pixel", em todas as outras bandas, ou seja para uma imagem de K bandas, existem K níveis de cinza associados à cada "pixel", sendo um para cada banda espectral.

Com a imagem original no software foi feita a composição de banda para uma melhor visualização para facilitar a classificação dos objetos na imagem. A imagem original pode ser visualizada na figura 18.

**Figura 18** – Imagem Original utilizada no estudo

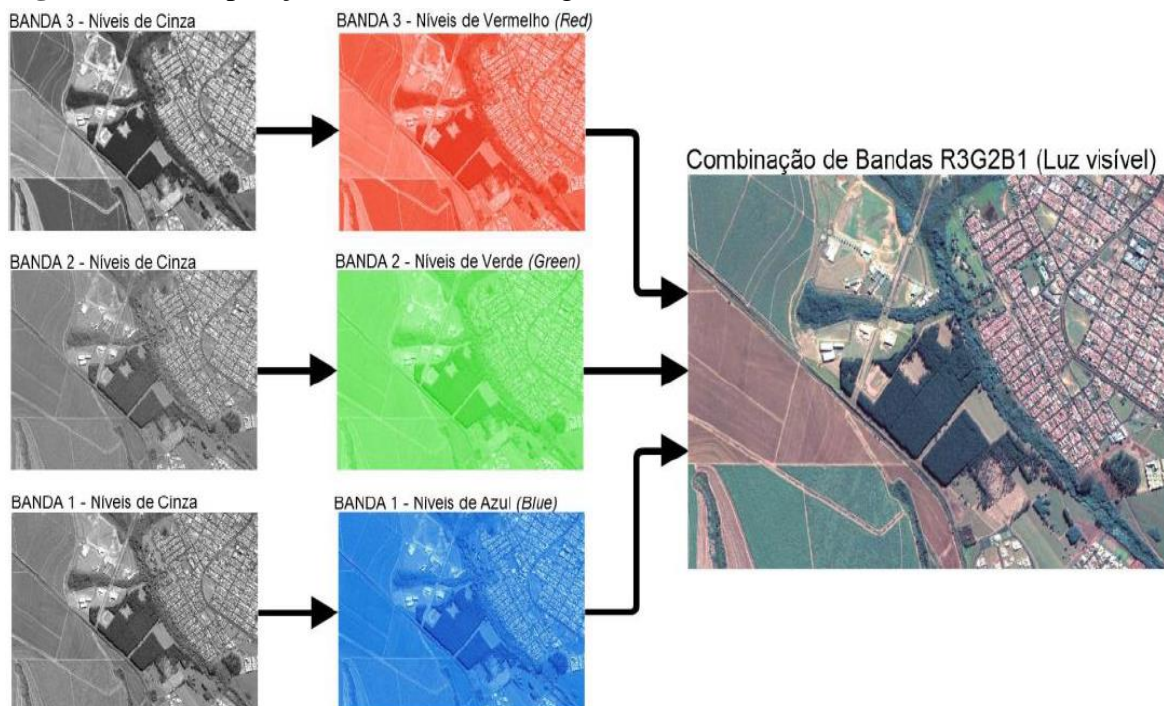


Fonte: Digital\_Globe (2011).



Foi utilizada as bandas Red 5, Green 3 e Blue 2, em seguida foi realizada a classificação da imagem. Na figura 19 pode-se verificar a composição realizada por Martins (2012).

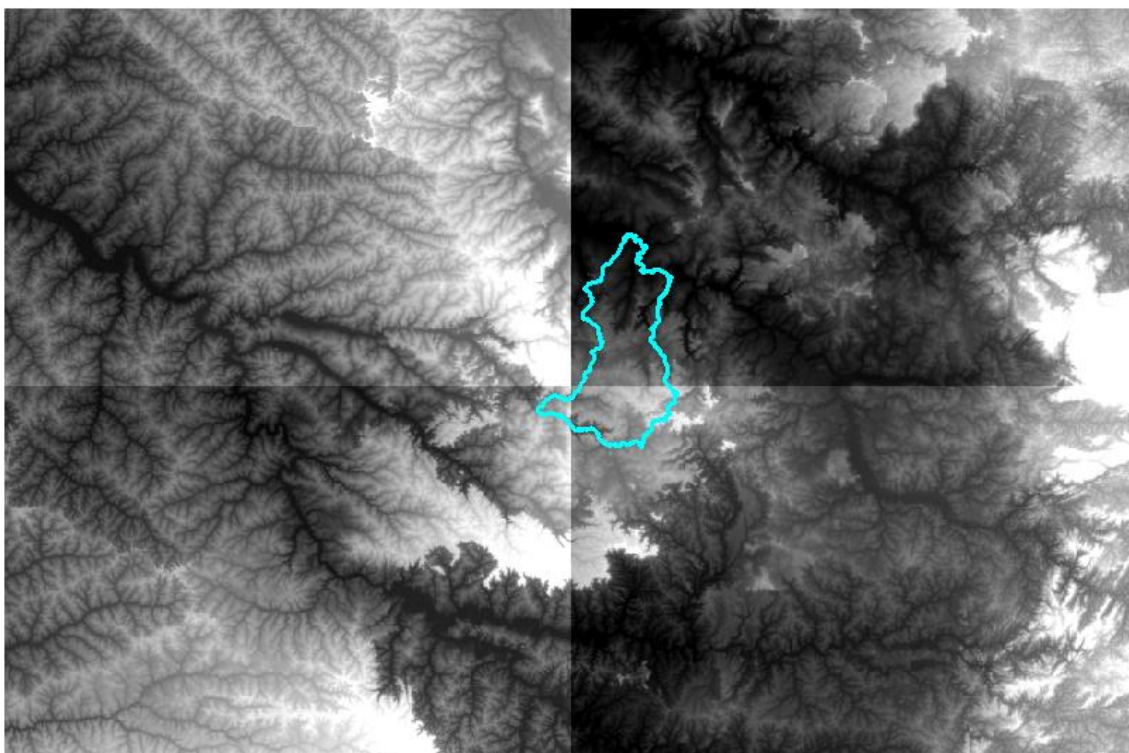
**Figura 19** - Composição de Bandas da Imagem



Fonte: Martins (2012).

O MDE é elaborado a partir dos dados gerados pelo projeto SRTM (em inglês, Shuttle Radar Topography Mission). A partir do processamento digital dessas imagens nas cenas: SF-22-Z-B, SF-23-Y-A e SF-23-V-C. Para compor a figura 20 utilizamos a cena SF-22-X-D que não tem vínculo com a cidade de São Carlos e não foi utilizada para elaborar o MDE. As cenas vem no sistema de coordenadas WGS 1984 o shape do município de São Carlos utiliza o sistema de coordenadas sirgas 2000, foi convertido para WGS 1984.

**Figura 20** – Composição de cenas para elaborar o MDE do Município de São Carlos



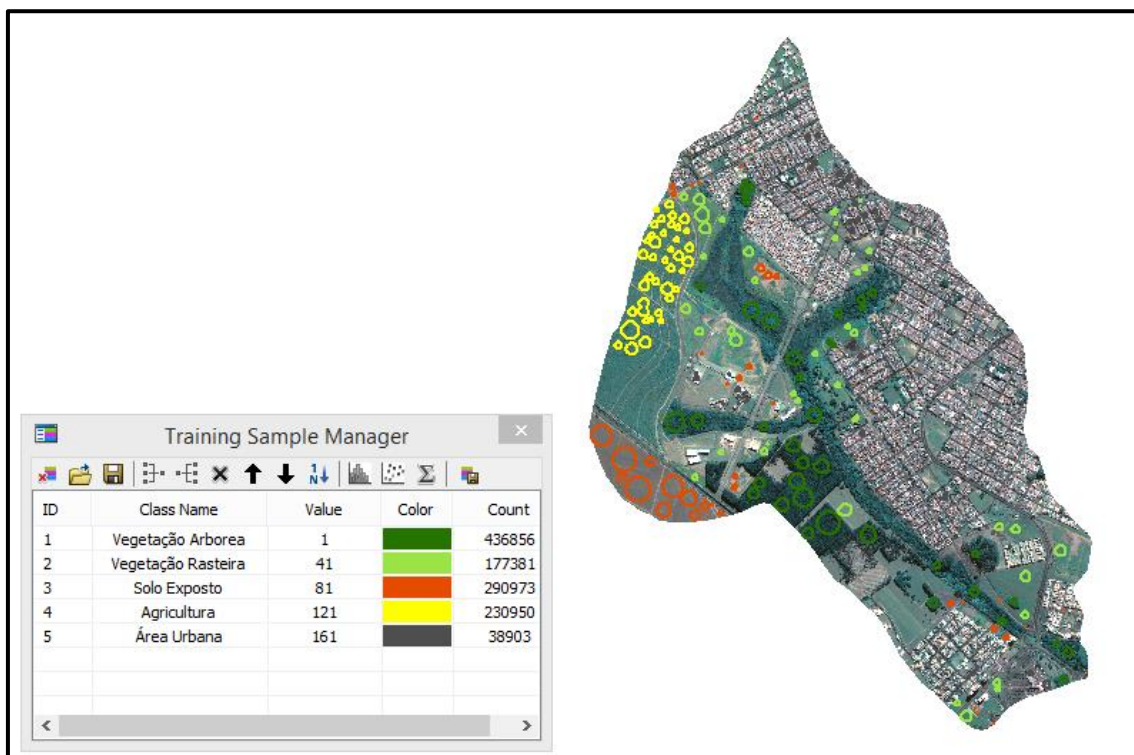
#### 4.2.2 Classificação dos tipos de solo, uso e ocupação

No caso de uma avaliação de uso e ocupação de solo é necessário que, em primeiro lugar, se tenha claramente explicitado a área de estudo. No caso desse trabalho, esta já foi previamente definida e delimitada, seguindo o processamento realizado por Martins (2012) sendo as classes Agricultura, Asfalto, Solo Exposto, Telhados, Vegetação Arbórea e vegetação Rasteira.

Classificação é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Os métodos de classificação são usados para mapear áreas da superfície terrestre que apresentam um mesmo significado em imagens digitais.

Ao mapear áreas urbanas, residências e asfalto, estas classes mesmo tendo assinatura espectral diferentes consideramos para criação da camada CN, foi considerada com a mesma características, diferenciando apenas os outros tipos de alvos presentes, como vegetação, solo exposto e áreas agricultáveis como pode ser visto no treinamento do software para classificação na figura 21.

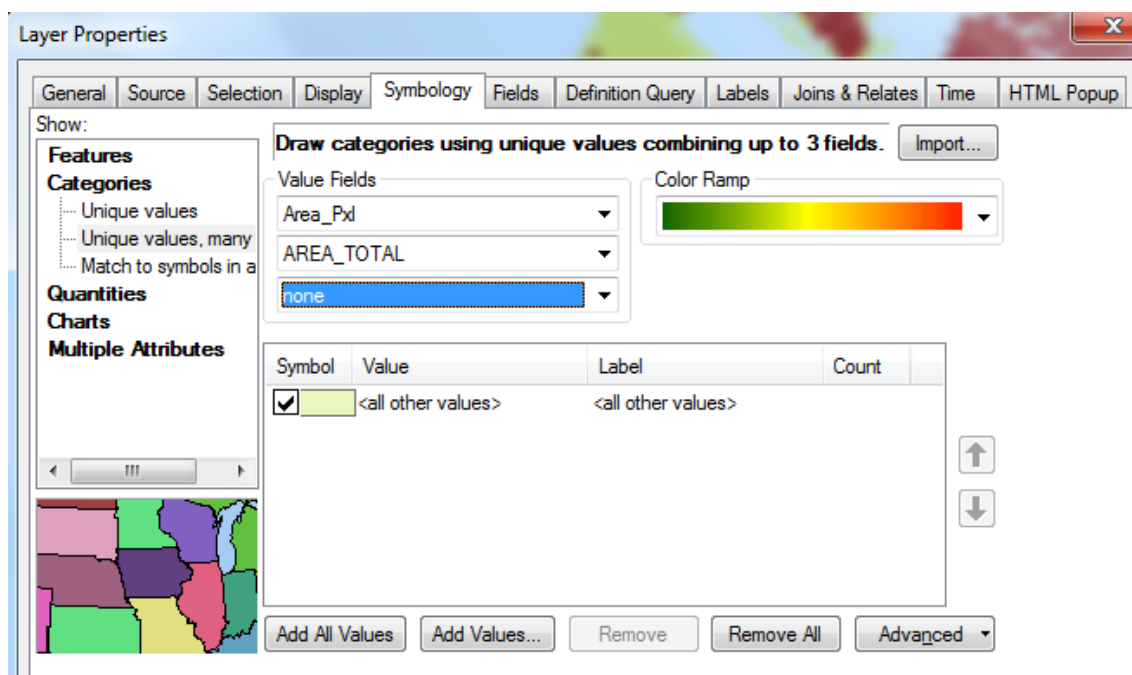
**Figura 21** – Treinamento do software para classificação de uso e ocupação



No treinamento fizemos amostras aleatórias na imagem de 40 círculos de cada uma das classes abordadas nesse estudo. Após isso em “Classification” selecionamos a opção “Maximum likelihood Classification” para classificar toda a imagem.

No software clicamos com o botão esquerdo do mouse sobre o layer USO\_SOLO, na janela de estrutura de dados (Data Frame), em seguida abrirá a caixa de diálogo (layer properties) na opção (categories – unique values) irá aparecer o campo (value field), escolha USO\_SOLO ao pressionarmos o botão (add all values) escolhemos uma paleta de cores no campo (color ramp); ao apertar o botão ok, o mapa de uso do solo será apresentado na tela. As opções comentadas podem ser vistas na figura 22.

**Figura 22** – Etapa para classificação do uso e ocupação do solo



#### 4.2.3 Elaboração do mapa para simulação de inundações

O processo modelado no HEC-GeoRAS consistiu de uma aproximação de onda cinemática unidimensional para o fluxo de canal, usando um esquema explícito de diferenças finitas e uma representação onda de difusão bidimensional do fluxo na várzea.

A metodologia aplicada no mapeamento de várzea usa um processo tradicional de mapeamento com base nos cálculos hidráulicos e na elevação da superfície, o principal objetivo é trazer o processo em formato digital para o uso de ferramentas de software para análises espaciais.

A metodologia utilizada nesse trabalho consiste em três etapas: (I) pré-processamento de dados geométricos; (II) a análise hidráulica; e (III) Pós-processamento dos resultados e mapeamento de várzea, usando HEC-GeoRAS.

Ao habilitar o programa no ArcGIS a extensão fica pronta para seu uso inicial apresentando-se como na figura 23.

**Figura 23** – Barra de comandos da extensão HEC-GeoRAS





Carregamos no software o MDE no formato TIN “mineirinho\_tin” no menu “Geometry RAS” criamos as camadas na guia “Create RAS Layers,” e selecionamos a opção “Stream Centerline”.

Ao executar o comando duas coisas acontecem, em primeiro lugar, um novo arquivo se forma chamado "River" e um geodatabase com o mesmo nome que o arquivo de projeto irá aparecer dentro do diretório que você está trabalhando no ArcCatalog, chamado de "mineirinho.mdb."

Para digitalizar uma linha no centro do córrego, no menu “Editor” utilizamos a guia “Start Editing”. Certificando na guia “Task” que o local do novo recurso sera a camada alvo “River”, ficando como na figura 24.

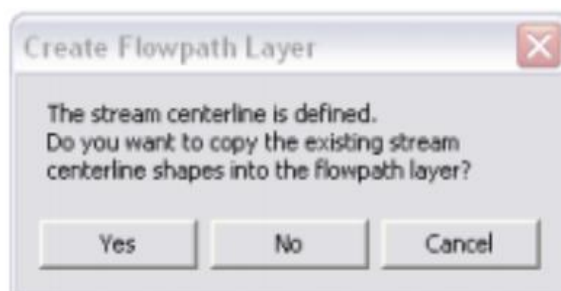
**Figura 24** – Modulo do HEC-GeoRAS compilando informações no ArcGIS



Com o lápis selecionado começamos a digitalizar uma linha no centro do canal. Quando terminou essa parte abrimos a tabela de atributos e em “HidroID” selecionamos o “1” - este é um identificador exclusivo para o córrego.

No menu selecione “RAS Geometry” e em “Create RAS Layers,” escolha “Flow Path Centerlines”, após seguir esse comando aparece a mensagem da figura 24 para da segmento selecionamos a opção “Yes”.

**Figura 24** – Mensagens de operação do HEC-GeoRAS



Na sequencia no menu selecionamos "RAS Geometry " e em " Create RAS Layers," escolhemos a opção “Bank Lines”colocamos nesse ponto as condições de contorno do fluxo como barragens e outra obras de redução ou controle de vazão, ficando o raster pronto para dar inicio as simulações.

#### 4.2.4 Simulação pontos de inundação para diferentes CN

O modelo trabalha com ArcMap tools, com as extensões habilitadas “3D Analyst” e o “Spatial analyst”. Essa metodologia pode ser observada no Manual L-thia ver.2013, explicitamos todos os passos do manual mas não executamos para confecção desse trabalho as entradas opcionais.

Para dar início ao processamento no L-THIA carregamos as layers do MDE, TIPO\_SOLO, USO\_SOLO, no software de processamento ArcGIS em seguida abrimos o L-THIA.

O modelo tem seis passos, incluindo os passos opcionais, o tempo de execução depende da escala de dados. O primeiro passo é chamado “Watershed Delineation (Opcional)” o delineamento da bacia que é opcional, que é feito com o MDE.

Com a bacia do córrego do Mineirinho delimitada selecionamos o MDE\_mineirinho e no arcgis executamos “fill”, “Flow Direction” e “flow Accumulation” com esses procedimentos o software cria automaticamente um mapa de locais propícios a serem inundados, com a ferramenta “Flow Accumulation Map” podemos colocar no mapa manualmente locais de inundação. O resultado desse processo é inserido no local indicado na figura 25a.

O segundo passo é “Simulation Folder Setting” nesse segundo passo é definimos uma pasta para arquivos de texto e arquivos temporários de resultados. Clique em "Select Folder", e, em seguida, localize a pasta. Uma vez que a o local da pasta é definido, o arquivo “cnemc.csv” aparece na pasta. Essa parte é verificada na figura 25b.

No terceiro passo criamos o mapa de CN “Create CN Map” que vai nos dizer a resposta hidrológica quando inserimos o arquivos gerados no primeiro passo, local onde inserir os arquivos pode ser visualizado na figura 25c. Nessa etapa a junção de raster e polígonos.

No quarto passo denominado “Precipitation Data Folder” onde são carregados os dados de precipitação que juntos com as informações do segundo passo já pode da início a simulações. O local de inserção desses dados é visto na figura 25d.

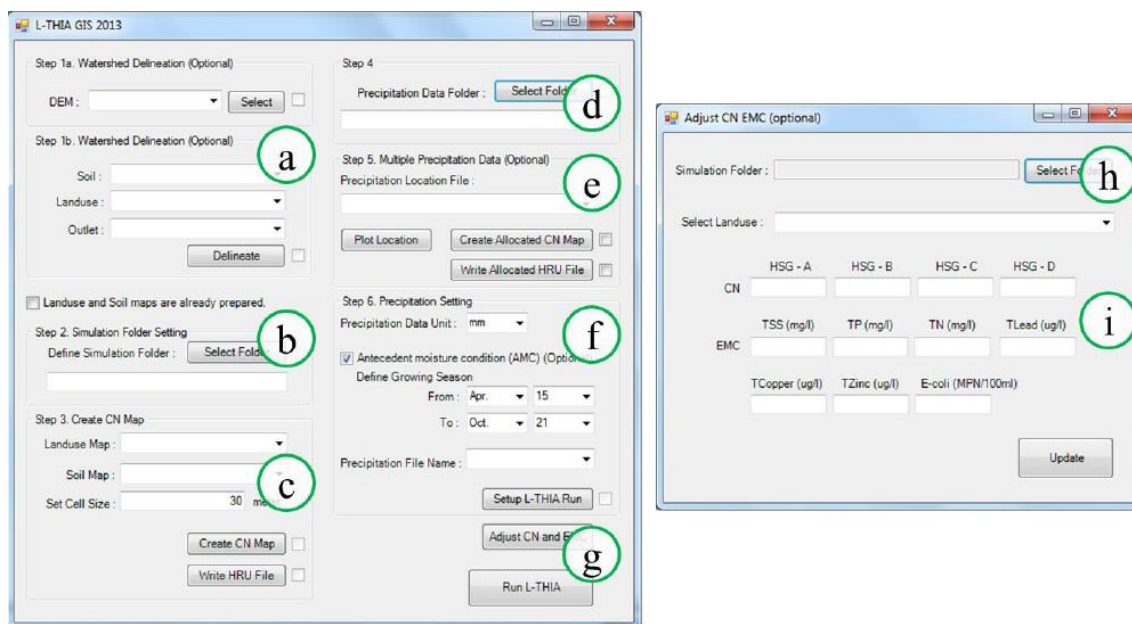
O quinto passo é mais um opcional é chamado de “Multiple Precipitation Data (Optional)”, visível na figura 25e, no caso de precisar inserir múltiplas chuvas determinamos a localização com a ferramenta “Plot Location”. Se confirma os pontos e, em seguida, clique no botão “Create Allocated CN Map”. Com essa ferramenta se criar um novo mapa de CN com Atributos diferentes do primeiro.

No sexto e passo é o “Precipitation Setting” que pode ser visto na figura 25f, esta etapa está relacionada com dados de precipitação é onde se define a unidade dos dados de precipitação (polegadas ou milímetros).

Há dois botões na parte inferior da interface, que são “Adjust CN and EMC” e os botões 'Run L-thia' pode ser visto na figura 25g. O botão "Run L-thia 'é estima o escoamento ea as cargas de poluição por dia / mês / ou ano. Apresenta três arquivos de resultados de simulações que são gravados na pasta simulação.

O botão “Adjust CN and EMC” altera os valores CN / EMC como resultado dos processos no GIS que foram elaborados nos passos de 1 a 6. O módulo altera os valores CN / EMC no arquivo HRU escrito no passo 3 e atualiza o “cnemc.csv” .

**Figura 25** – Entradas necessárias do modelo L-THIA



Fonte: Manual L-THIA ver- (2013).

#### 4.2.5 Simulação de inundações em 3D

Uma vasta quantidade de dados temporais e espacialmente distribuídos são necessários como dados de entrada para o uso de um modelo hídrico fisicamente distribuído por qualquer processo de simulação. Para Dutta et al. (2000) a simulação hidrológica em um SIG exige no seu processamento inúmeras camadas de dados espaciais para a sua modelagem.

Segundo Graciosa (2010) a simulação hidrológica é realizada com base em uma precipitação de referência, para a qual são estimadas as vazões nos diferentes pontos da

macrodrenagem. A precipitação utilizada nas simulações hidrológicas para o planejamento de um sistema é chamada chuva de projeto e, geralmente, sua estimativa é feita com base na curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) – ou equação de chuva – local, para uma determinada duração e um determinado período de retorno. Por meio desta equação obtém-se a intensidade da chuva, a qual é totalizada em mm no intervalo de tempo considerado. O total precipitado deve ser desagregado, por meio de métodos hidrológicos adequados, em intervalos de tempo menores, dentro da duração total da chuva, para obter o gráfico dos totais precipitados em intervalos discretizados.

Este procedimento foi feito para a bacia do córrego do Gregório, e pela proximidade com o córrego do mineirinho a adotamos, com base na equação de chuva de São Carlos, descrita pela Equação 4-2 (BARBASSA, 1991). Foi considerada a duração de chuva crítica  $t = 1$  hora e foram analisados os períodos de retorno  $TR = 1$  a 100 anos. (GRACIOSA, 2010)

**Tabela 3** – Valores obtidos a partir das curvas IDF

<b>T (min.)</b>	<b>T(horas)</b>	<b>TR = 5</b>	<b>TR = 10</b>	<b>TR =25</b>	<b>TR = 50</b>	<b>TR = 100</b>
6	0,1	7,0	8,3	10,2	12,1	14,2
12	0,2	11,9	14,1	17,5	20,6	24,2
18	0,3	7,7	9,1	11,3	13,3	15,7
24	0,4	3,9	4,6	5,7	6,7	7,9
30	0,5	2,5	2,9	3,6	4,3	5,0
36	0,6	2,0	2,4	3,0	3,5	4,1
42	0,7	1,2	1,4	1,8	2,1	2,4
48	0,8	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3
54	0,9	0,9	1,0	1,3	1,5	1,8
60	1,0	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
<b>Precipitação Total</b>		<b>38,7</b>	<b>45,6</b>	<b>56,6</b>	<b>66,7</b>	<b>78,5</b>

Fonte: Graciosa (2010).

Foi simulados eventos incidentes na bacia, e para alguns cenários de mudança do uso e ocupação simulamos no L-THIA. Os cenários abordados foram os propostos por (PONTREMOLES, 2013) com exceção do cenário de futuro tendencial com Plano Diretor de Drenagem Urbana por não simularmos obras de retenção e controle de inundação, simulando assim o cenário atual, futuro tendencial e futuro alternativo. Na tabela 4 podemos visualizar os cenários e suas respectivas vazões máximas para os períodos de retorno simulados.

**Tabela 4** - Vazões máximas (m<sup>3</sup>/s) dos hidrogramas calculados para a área de estudo

Cenário	Tempo de retorno		
	25 anos	50 anos	100 anos
1 - Atual	50,3	63,1	79,7
2 - Futuro tendencial	77,3	92,8	112,1
3 - Futuro alternativo	33,9	36,7	40,0

Fonte: Pontremolez (2013).

Com a ferramenta “statistics Tools” do ArcGIS, delineamos regiões homogênea, determinamos a seleção de uma distribuição regional de frequências robusta e o estabelecimento de modelos de inundação regionais para obter os alcances das inundações.

Ainda com essa ferramenta avaliamos as áreas propensas inundação de acordo com aos períodos de retorno estimado, e seus alcances aplicados no modelo do terreno da bacia.

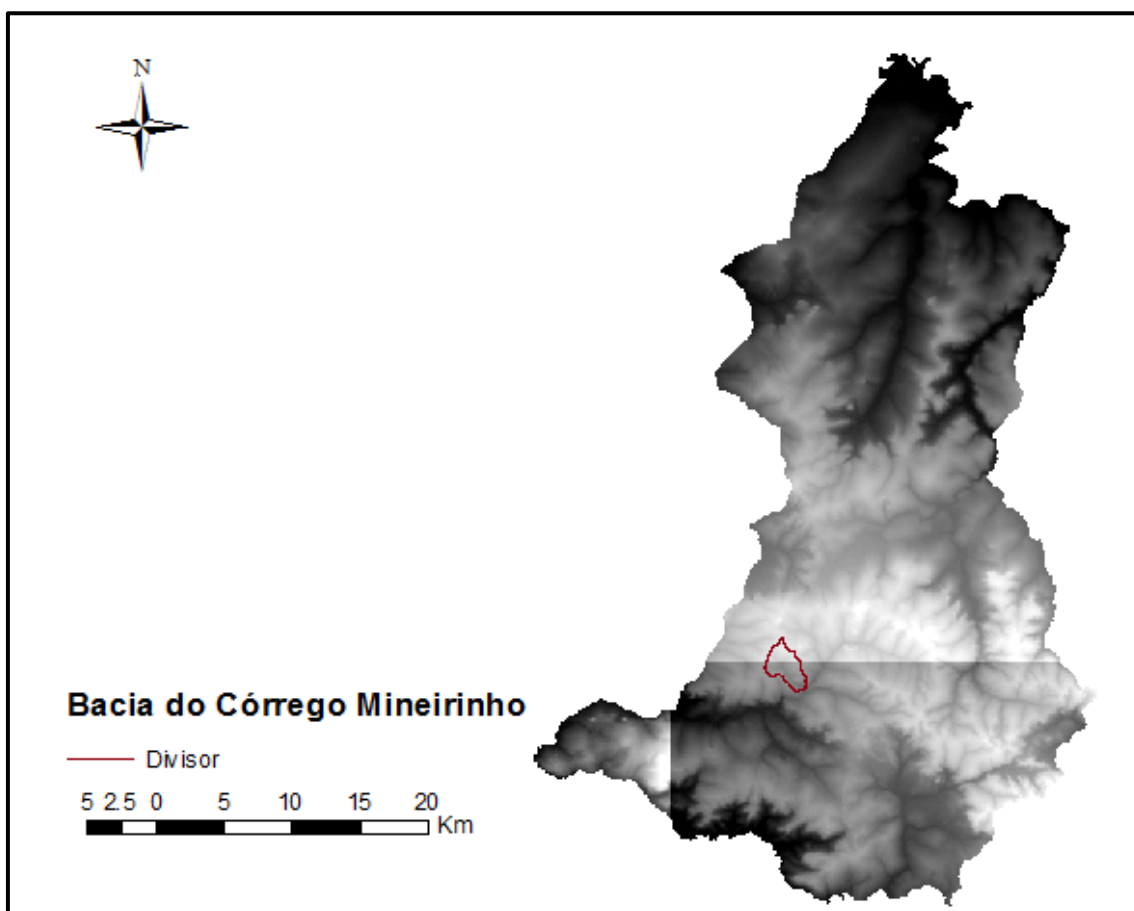
Na extensão ArcScene do ArcGIS foi elaborado com uso do MDE uma visualização dos eventos de inundação para os tempos de retorno de 25, 50 e 100 anos que possam vir a incidir na bacia do córrego do mineirinho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Após a extração dos dados do relevo do município partimos para extração do relevo da microbacia de estudo, a microbacia do Córrego do Mineirinho. Na figura 26 temos o recorte da bacia.

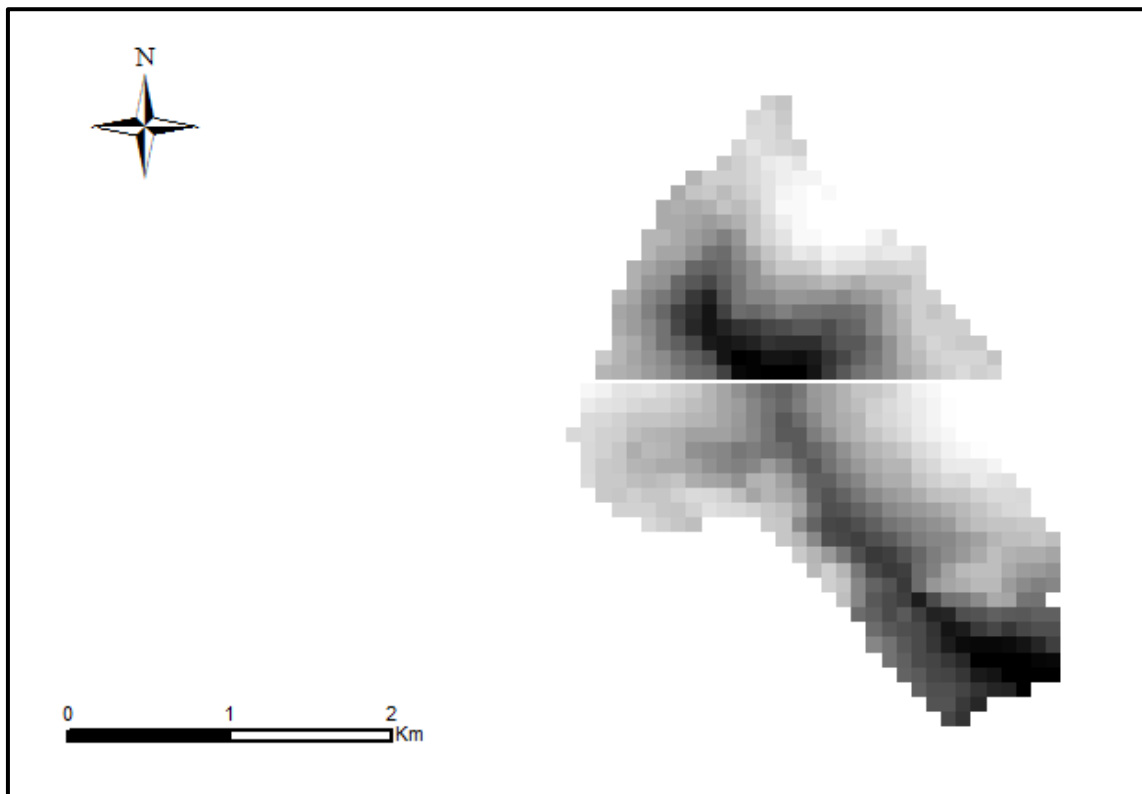
**Figura 26** – Extração do relevo de São Carlos destacando a bacia do Mineirinho



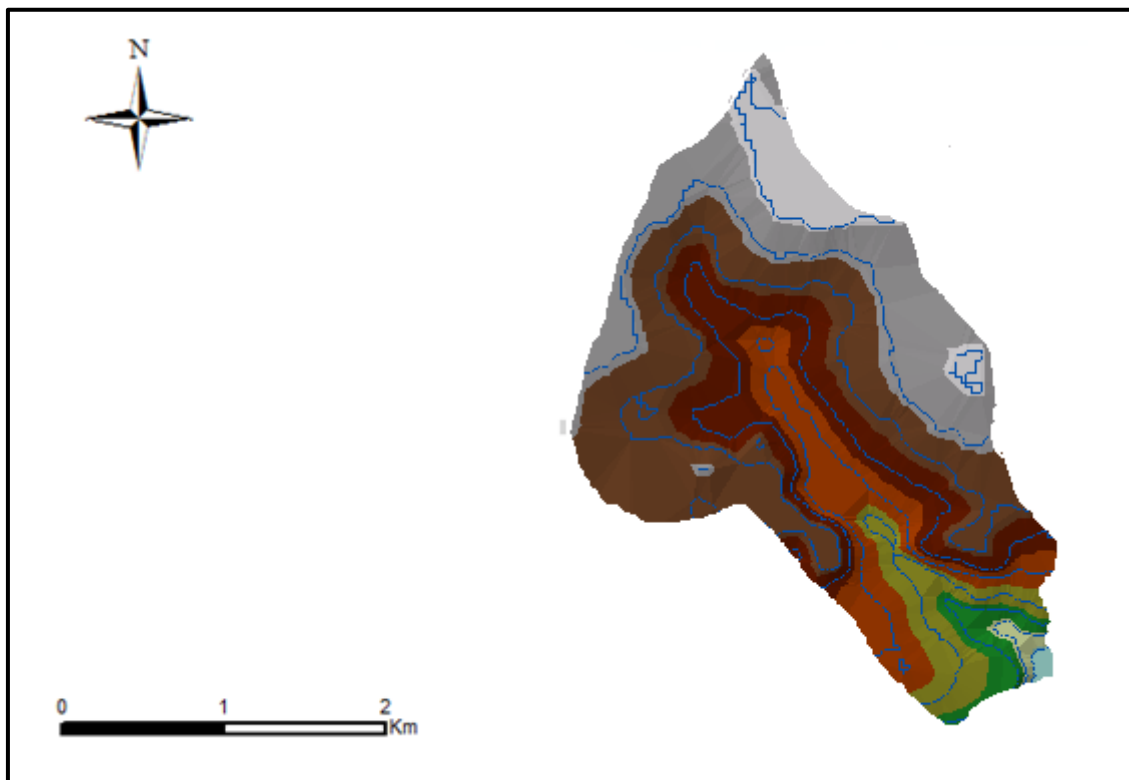
Um dos fatores limitantes da qualidade da modelagem é a extração do relevo a partir de dados SRTM que pode ser facilmente evidenciado na figura 27, onde apresentamos um zoom da extração, a resolução dos pixels em uma grade de 30x30m já nos mostra a baixa qualidade do material.

Para melhorar esse resultado foi realizada uma suavização dos dados por meio de uma rede de triângulos irregulares do Inglês, Triangular irregular Networks (TIN) que é apresentado na figura 28.

**Figura 27** – Pixels 30 x 30 elaboração do modelo digital de elevação

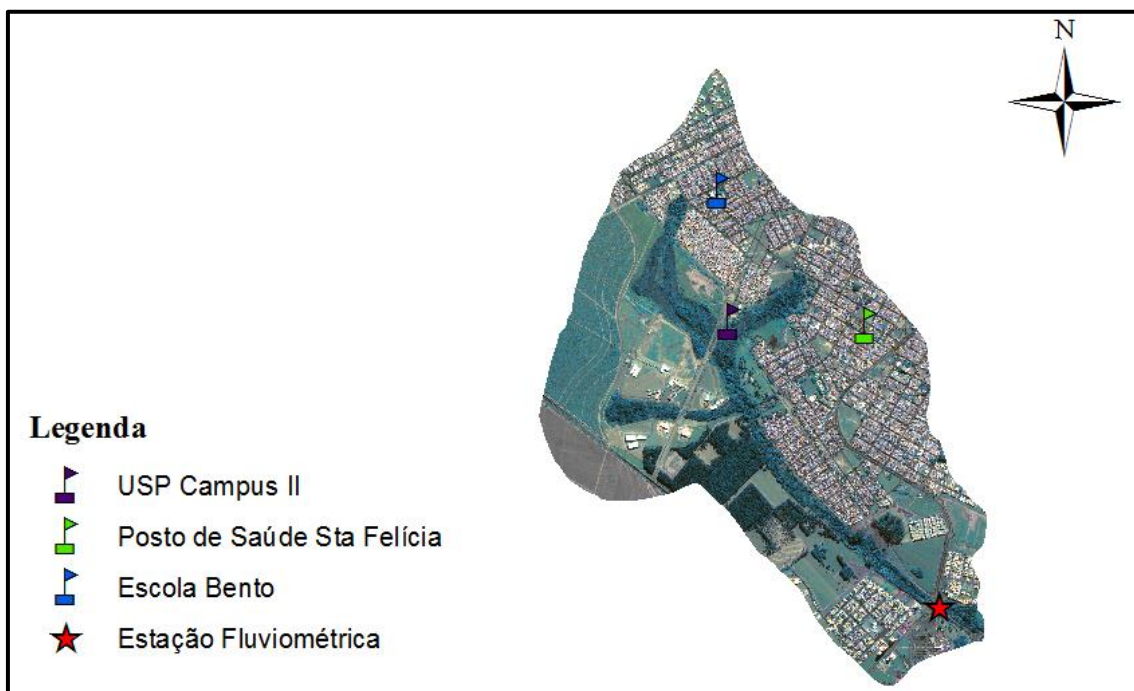


**Figura 28** – Suavização da cena com uso do TIN



Na figura 29 estão apresentadas as estações pluviométricas que estão inseridas na bacia do Córrego do Mineirinho bem como a estação fluviométrica que pode fornecer os dados necessários para calibrar e validar as simulações realizadas.

**Figura 29** – Estações de coleta de dados pluviométricos e fluviométricos da bacia do córrego do Mineirinho



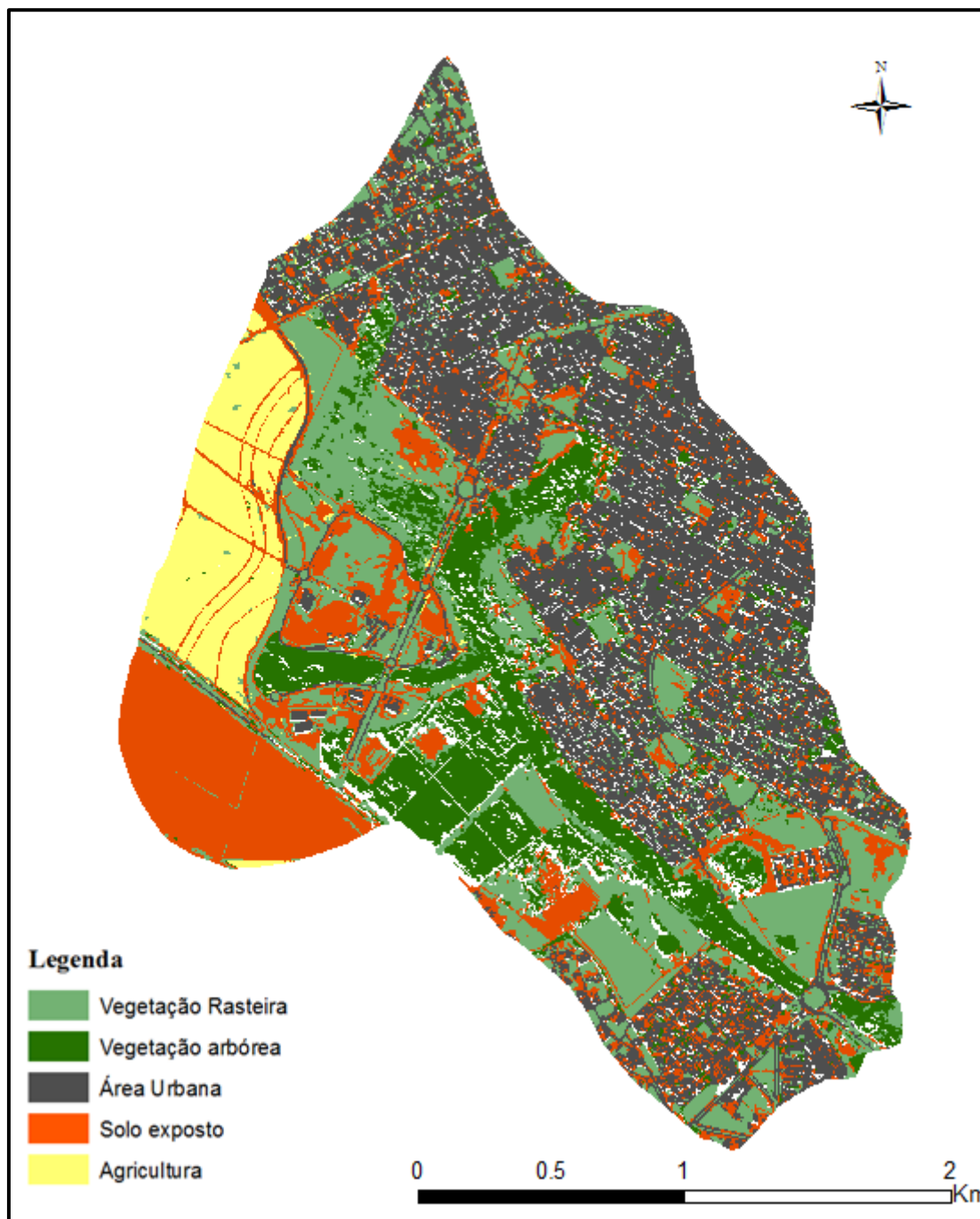
Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do Córrego do Mineirinho separamos a área de interesse do restante da imagem de satélite para acelerar o processamento.

Para efeito de determinação do valor do CN, as áreas impermeáveis como telhados e asfalto foram consideradas como uma única tipologia denominada áreas urbanas, pois, na tabela do método, para o mesmo grupo hidrológico B, ambos correspondem ao mesmo valor de CN igual a 98.

Na figura 30 pode-se verificar o resultado da classificação de uso e ocupação do onde ainda vale ressaltar que na vegetação rasteira foi utilizado o valor cobertura de grama maior que 75% CN 69, na camada vegetação arbórea, florestas em condições boas CN 60. Para a simulação de inundação a área de agricultura não apresentou uma contribuição significativa visualmente nas condições de plantio em curva de nível em condições ruins CN 79 e condições boas CN 75 com valores de chuvas de tempo de retorno de 25 e 50 anos e apresenta uma mudança visível nas chuvas de período de retorno de 100 anos.



**Figura 30** – Mapa de uso e ocupação do solo Córrego do Mineirinho



Como único atributo a ser utilizado de forma isolada como um shape na simulação do L-Thia o solo exposto foi o considerado pelo critério de Terreno preparado para plantio, descoberto da tabela que tem valor 86 para o grupo hidrológico B.

Nas simulações do L-Thia mesmo alterando os valores para o solo com boas condições e cobertura de grama maior que 75% CN de valor 69 e condições medias cobertura de grama maior que 50% CN de valor 61 não obteve uma mudança

visualmente significativa para chuvas de período de retorno de 25 e 50 anos e uma mudança visível ao ser aplicada uma chuva de período de retorno de 100 anos.

Na figura 31 podemos visualizar o mapa de solo utilizado para simulações do L-Thia sendo considerado um único tipo de solo para toda a bacia do Córrego do Mineirinho.

**Figura 31** – Camada de solo utilizada no L-Thia



Podem ocorrer inúmeros tipos de solo em uma área como o córrego do Mineirinho o que requer uma amostragem de solo aleatória em toda a bacia o que

poderia torna a simulação mais fidedigna, mas os resultados encontrados foram próximos aos que a Pentromolez, 2013 conseguiu na sua pesquisa.

Na questão de distribuição espacial da chuva foi considerado o princípio de ser uniformemente distribuída ao longo da bacia sendo alterado apenas os valores dos tempos de retorno na camada. A camada de precipitações pode ser visualizada na figura 32.

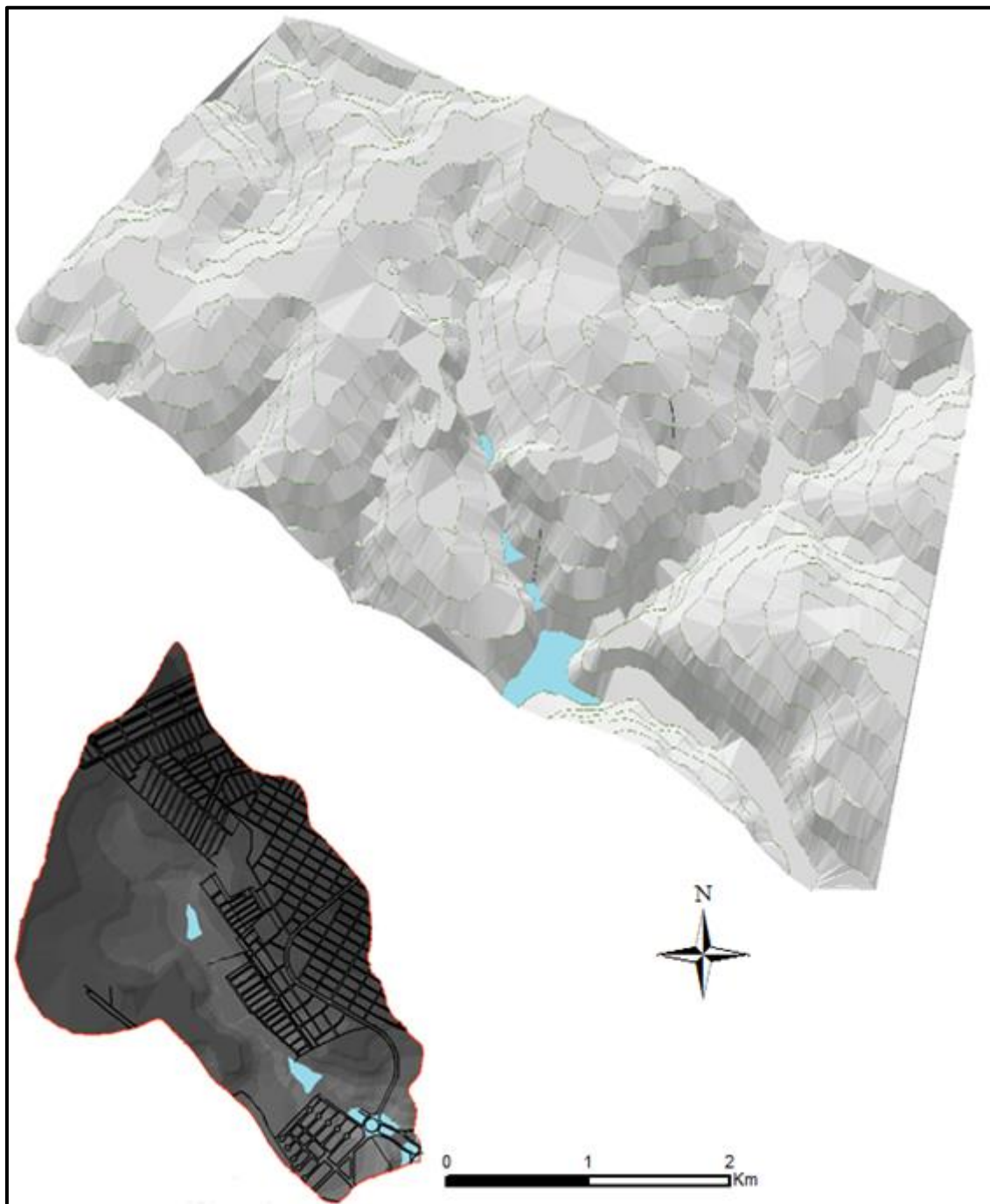
**Figura 32** – Precipitação uniformemente distribuída na bacia do córrego do Mineirinho



## 5.2 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS 3D ELABORADOS NO ARCSCENE

O ArcScene nos apresentou de forma satisfatória os perfis de alagamentos e inundações da bacia do Córrego do Mineirinho, embora a visualização em movimento seguindo o hidrograma do evento seja muito mais elucidante. Na figura 33 é apresentado o pico da inundação.

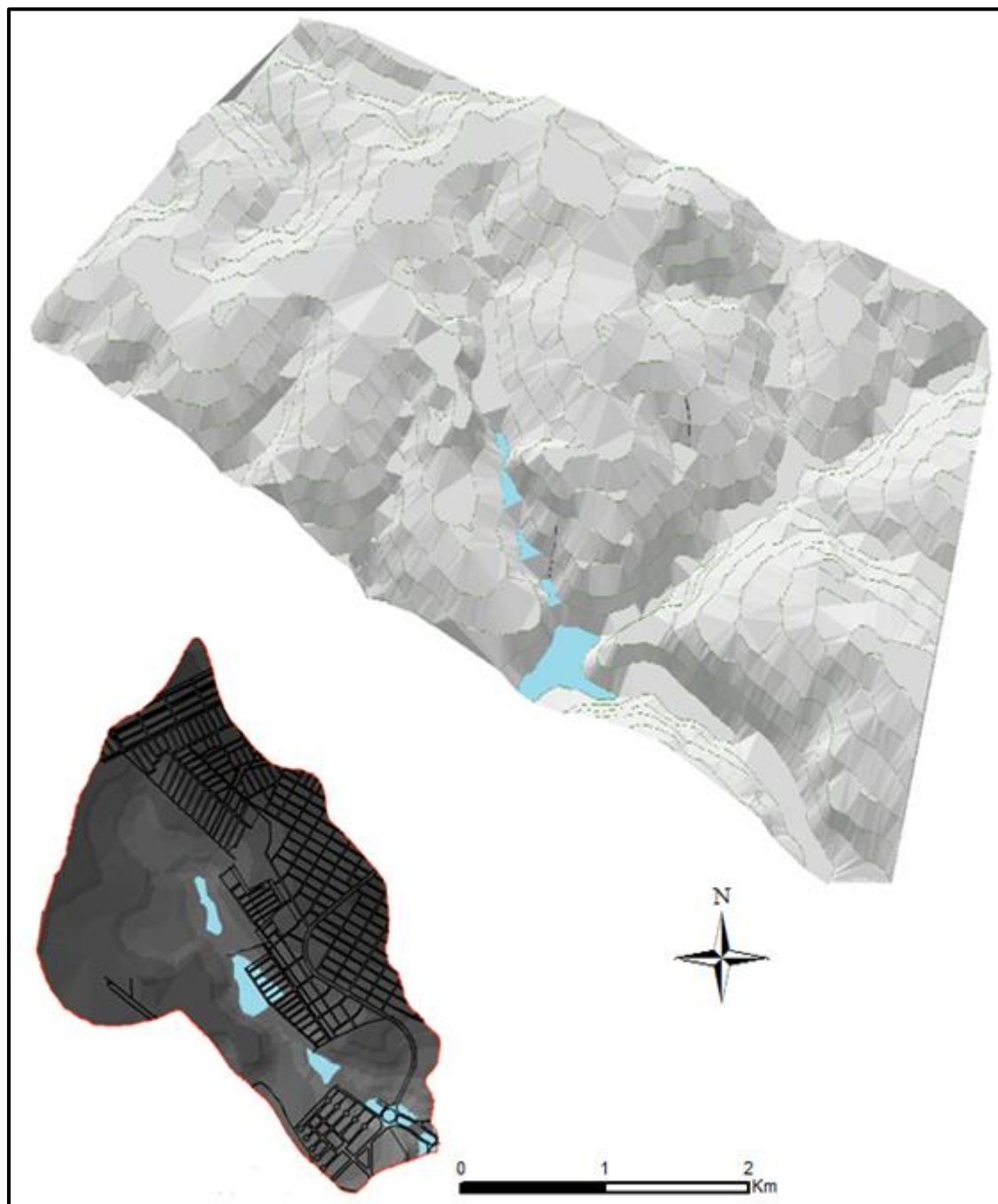
**Figura 33** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 25 anos



Os pontos de alagamento desse cenário foi encontrado entre as cota 780 que é a cota mínima da bacia e a cota 783, o que não quer dizer alagamentos de diferença de 3 m apenas que com esse cenário os locais da bacia que apresentam-se entres essas cotas teriam algum lamina d'água represada.

Na figura 34 podemos visualizar o cenário atual com uma chuva de período de retorno de 50 anos onde as áreas afetadas se concentram entre as cotas 780 e 786,1.

**Figura 34** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 50 anos

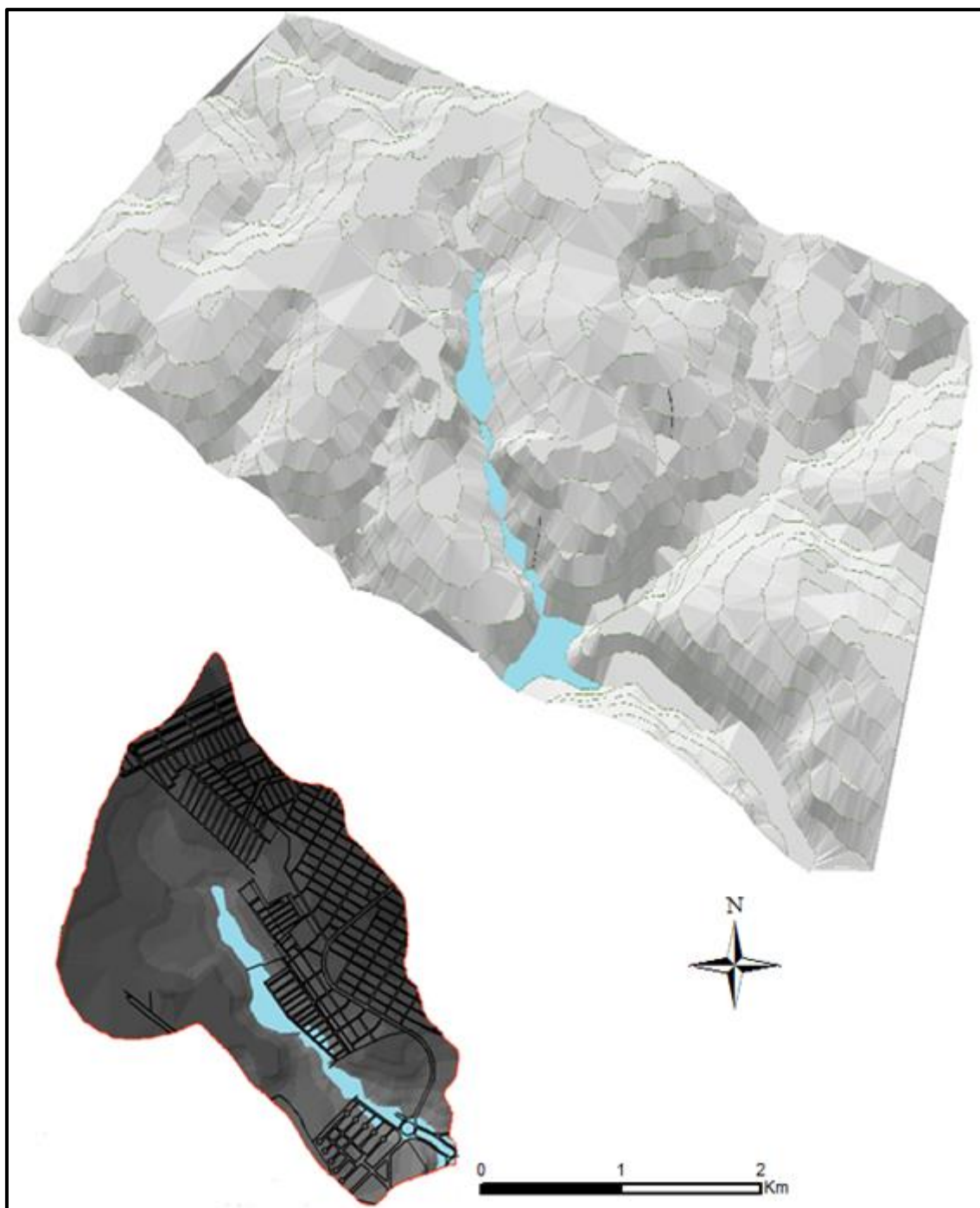




Como é de se esperar os cenários com precipitações com tempos de retorno de 100 anos apresentam as maiores áreas inundadas e ou alagadas.

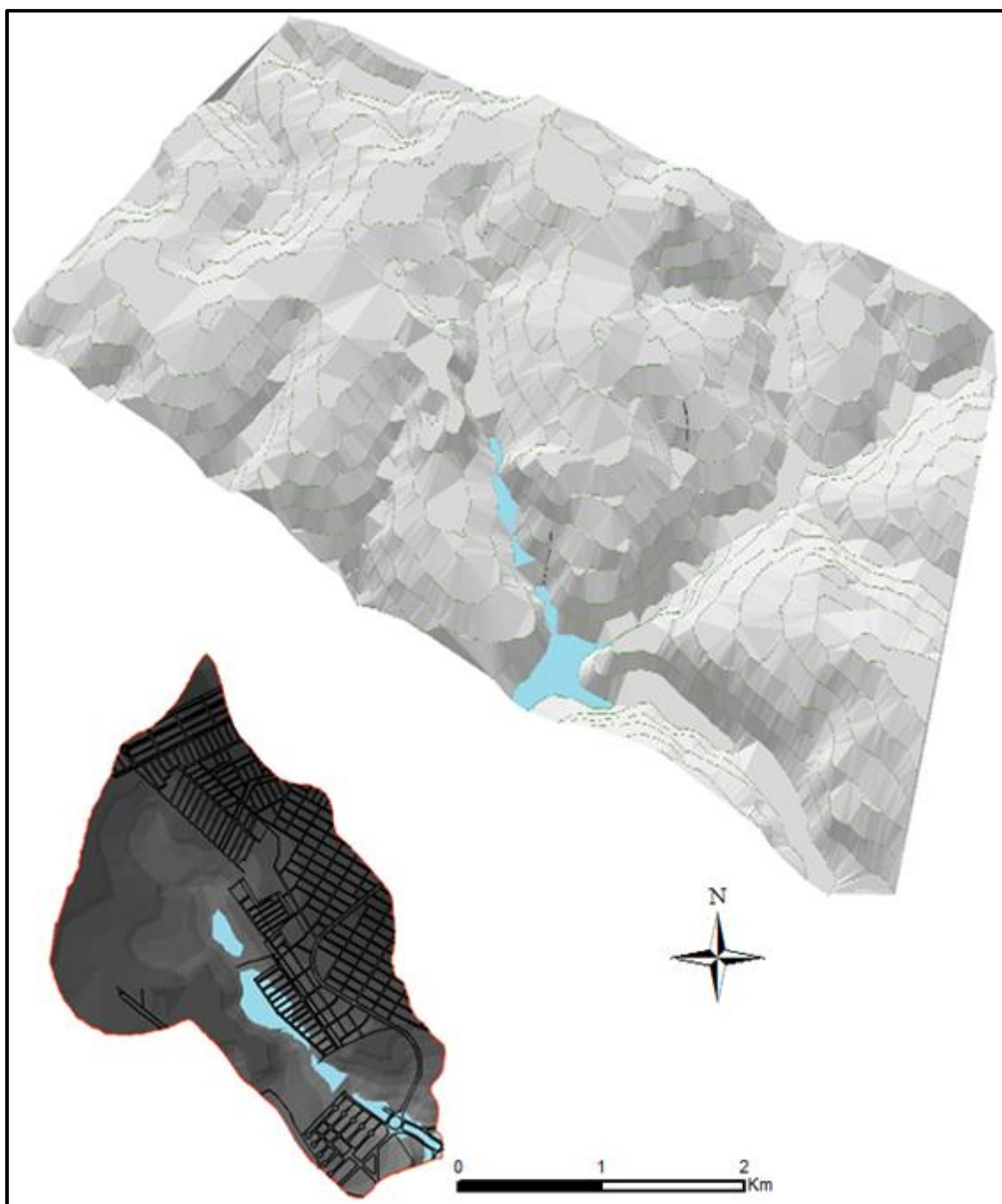
Na figura 35 é possível ver que toda extensão do canal principal e suas proximidades apresentam algum local alagado sendo encontrando na variação da cota 780 ate a cota 793,6.

**Figura 35** – Simulação de inundação cenário atual com tempo de retorno de 100 anos



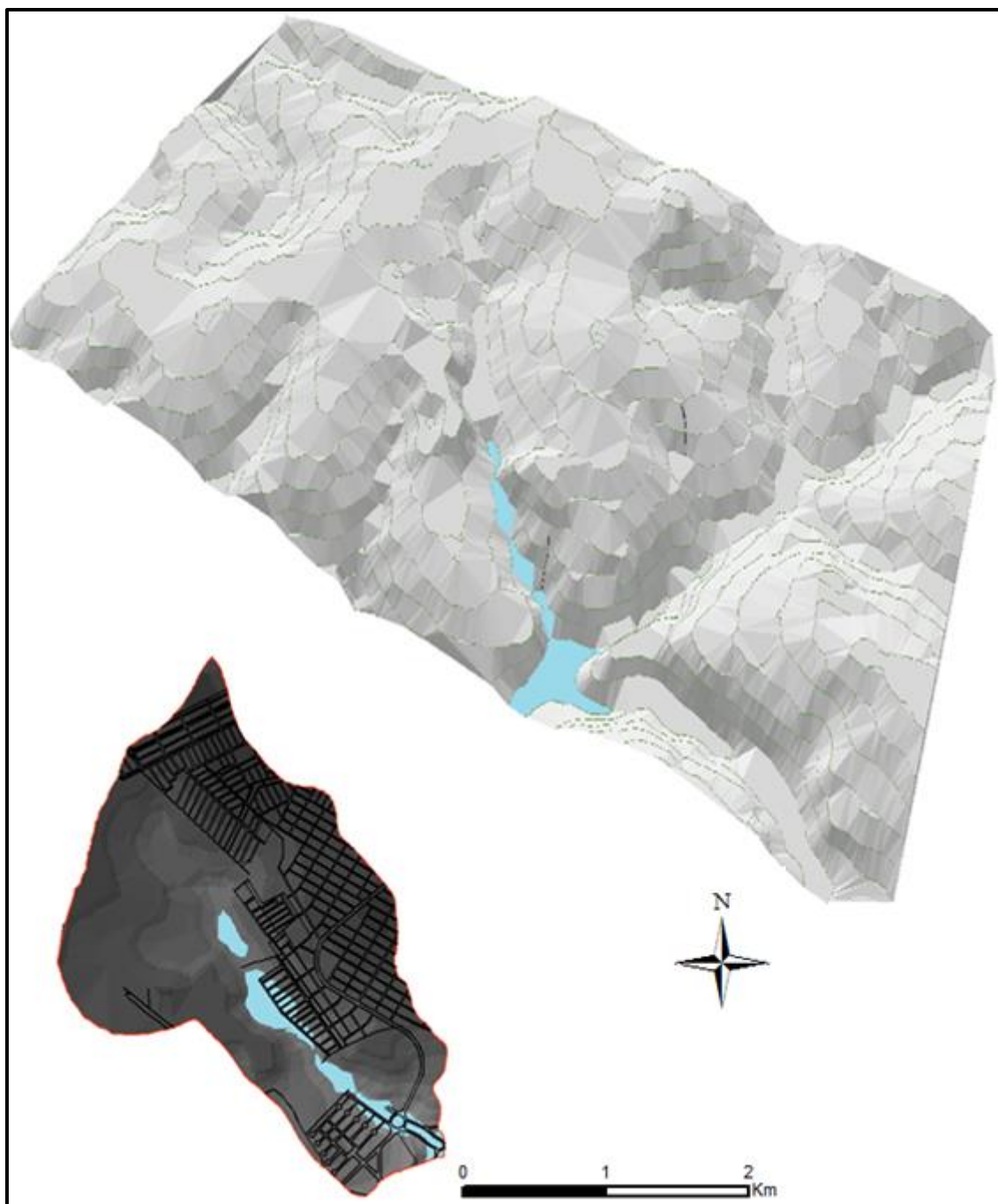
Com a tendência do atual crescimento das áreas impermeáveis na bacia do córrego do mineirinho, as simulações já mostram seus possíveis efeitos, com o cenário do futuro alternativo com chuva com período de retorno se aproximando das cotas do cenário atual com um período de 50 anos. Essa mudança fica evidenciada na figura 36.

**Figura 36** – Simulação de inundação cenário futuro alternativo com tempo de retorno de 25 anos



Na simulação de futuro alternativo com chuvas de retorno 25 e de 50 anos quase não apresenta diferença entre cotas com áreas alagadas ficando entre as cotas 780 e 793,4 que pode ser verificado na figura 37.

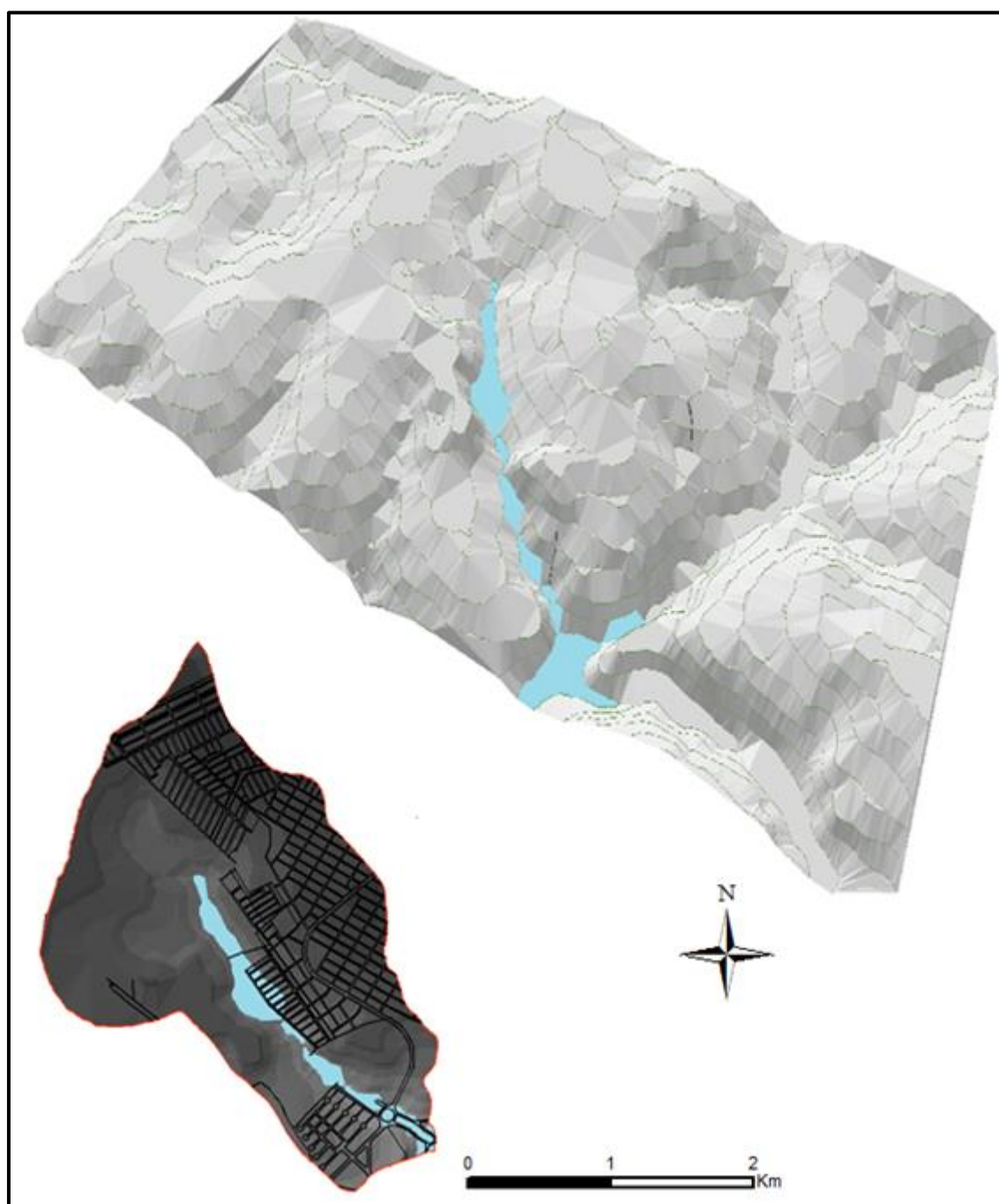
**Figura 37** – Simulação de inundação cenário futuro alternativo com tempo de retorno de 50 anos



Na figura 38 podemos visualizar que para o período de retorno 100 anos mesmo com a mudança da área impermeável da bacia as cotas que são possíveis haver alagamentos quase não se alteram saindo o valor máximo da cota 793,4 para cota 795,3.

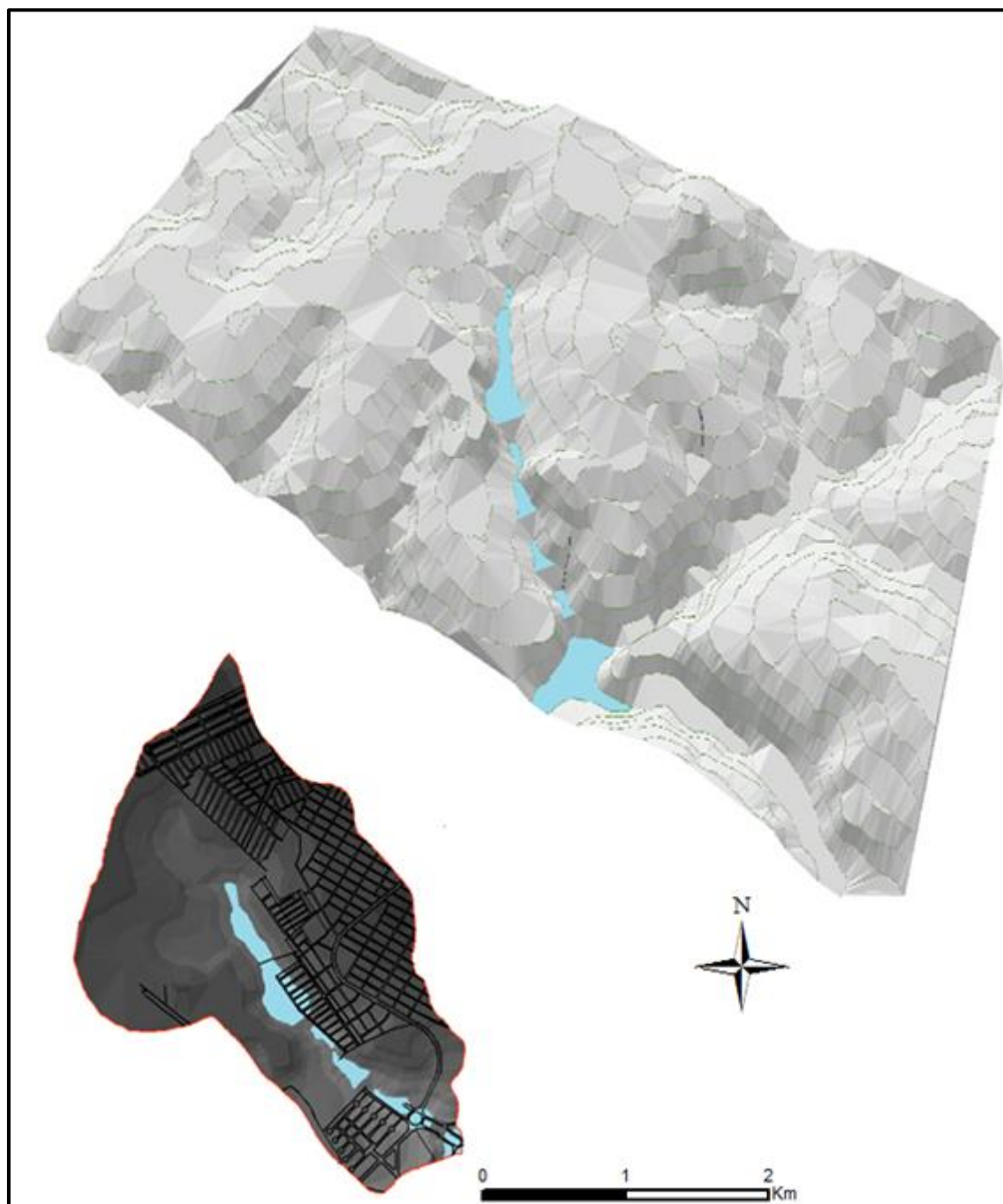


**Figura 38** – Simulação de inundação cenário futuro alternativo com tempo de retorno de 100 anos



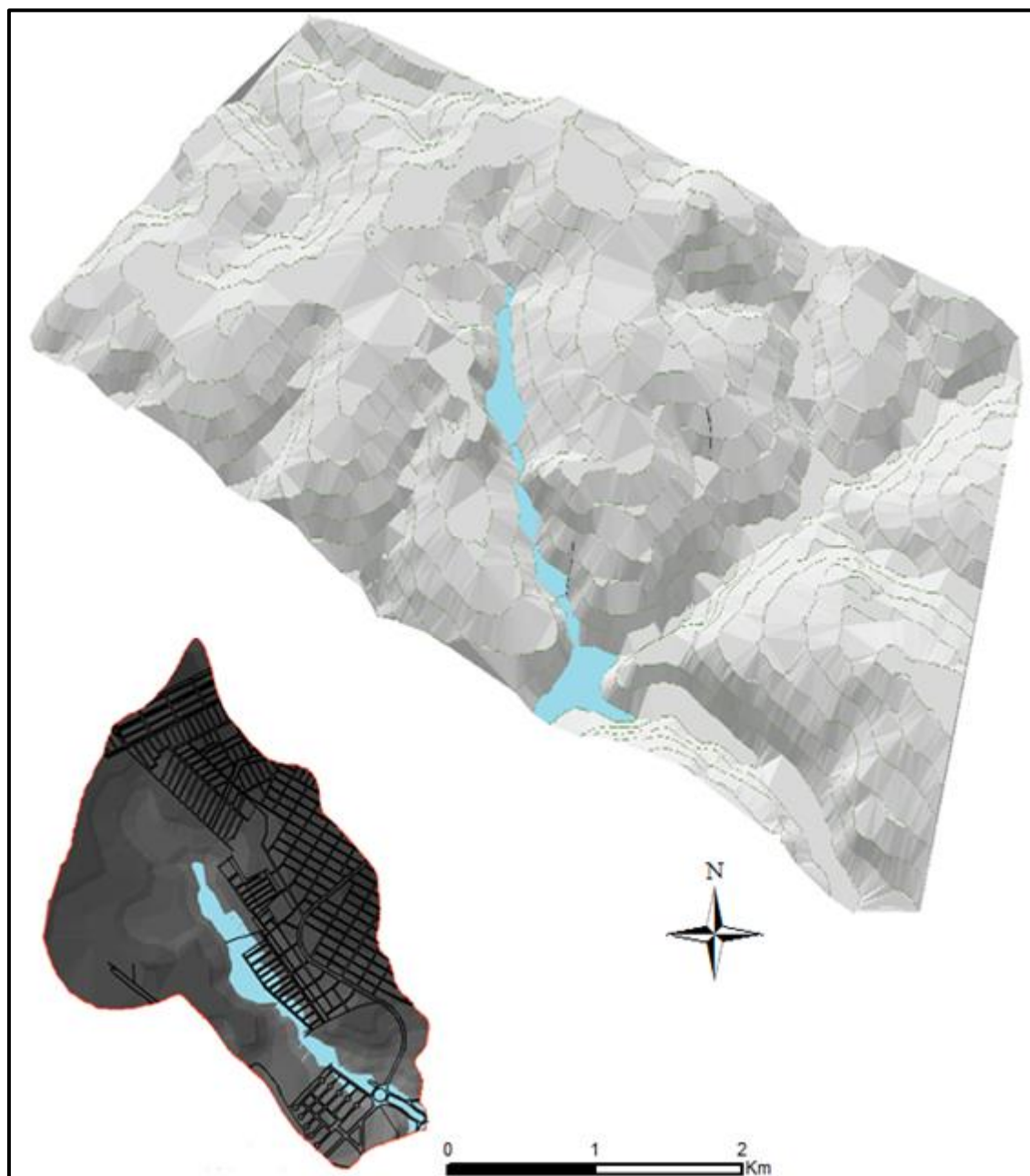
No cenário abordado na figura 39 já mostra o evento atingindo cotas mais altas mas não todo o trecho propenso a inundação da calha do córrego Mineirinho chegando cota máxima de 796.

**Figura 39** – Simulação de inundação cenário Futuro tendencial com tempo de retorno de 25 anos



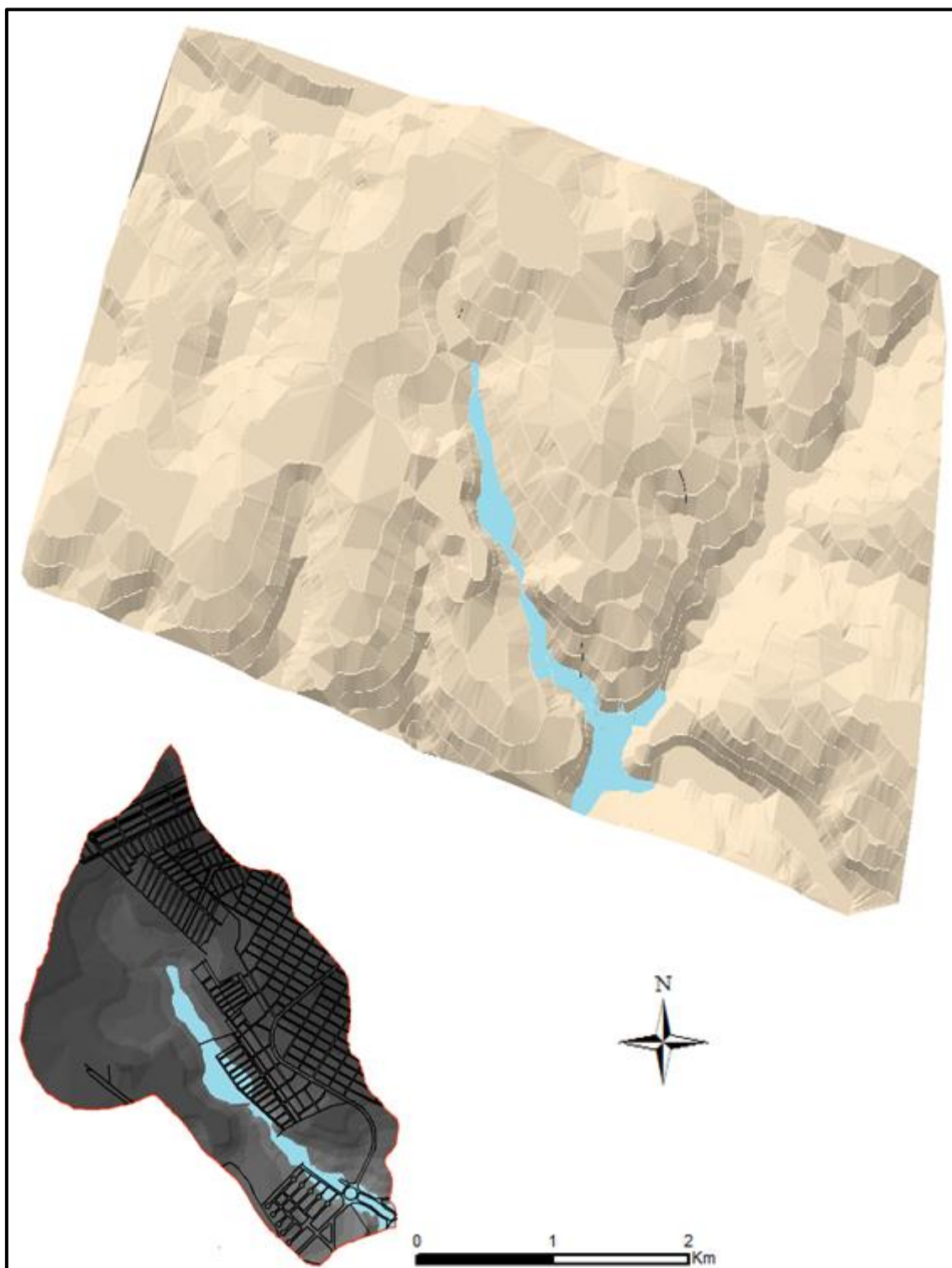
No cenário de futuro tendencial com evento de precipitação de período de retorno de 50 anos toda a calha e suas proximidades apresenta regiões inundáveis ficando com a cota máxima propensa inundações ate a cota 804,5 o que pode ser verificado na figura 40.

**Figura 40** – Simulação de inundação cenário Futuro tendencial com tempo de retorno de 50 anos



Na figura 41 se apresenta o cenário que atingiu as maiores cotas com regiões propensas a inundações com o evento simulado que tem período de retorno de 100 anos.

**Figura 41** – Simulação de inundação cenário Futuro tendencial com tempo de retorno de 100 anos



Na simulação do cenário futuro tendencial com período de 100 anos toda área entre as cotas 780 e 816 se apresentam pontos de alagamento ou inundação.

A simulação de eventos de precipitação que incidem sobre a bacia do córrego do mineirinho se mostra viável, mesmo com poucos dados de entrada. A visualização dos eventos 3D é verificável em ambiente de mídia que possa ser acompanhada ao longo do tempo seguindo o hidrograma de cada um de seus respectivos cenários.

## 6 CONCLUSÕES

A proposta dessa pesquisa foi elaborar em modelo simulações de cenários de inundações na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho fazendo todas as partes de pré e pós processamento em um único software para agilizar os resultados.

Para a realização da modelagem, compilamos os dados obtidos junto a EESC-USP por meio do projeto HIDROECO relacionando as características físicas e os usos e ocupações em toda a extensão da microbacia do Córrego do Mineirinho.

A imagem de satélite foi a base inicial para realizar análise espacial de toda a área da bacia geralmente feita em software específicos de processamento de imagens, no nosso caso utilizamos as ferramentas do ArcGIS para realiza-lo o que além de agilizar o processo não gera perdas na qualidade do processamento acarretados pela mudança de sistemas.

As simulações por meio do modulo L-THIA se mostraram promissoras, e mesmo com poucos dados e um pré-processamento relativamente simples nos da informação de como as alterações antrópicas do meio ambiente podem vim a influenciar na quantidade da água de escoamento de microbacias ou de bacias maiores desde que essas sejam subdivididas em bacias menores.

Com posse da informação podemos inferir quais as melhores medidas para diminuir os impactos acarretado por eventos extremos, como medidas estruturais na forma de bacias de retenção e algumas medidas sócio educativas para evitar que galerias e bueiros estejam obstruídos na ocasião desses eventos simulados.

A obtenção dessas informações simuladas ajuda na modelagem e pode trazê-la para mais próximo da realidade do que usar valores tabelados de outros locais que nem sempre condizem com as características que estamos trabalhando.

Os resultados obtidos servem para nortear os gestores em bacias que tenham poucos dados e é justamente devido a falta de dados que nos impossibilita na maioria das vezes a calibração do modelo sendo necessário observar eventos que incidam na bacia com as características simuladas para uma posterior validação.

A modelagem realizadas no ArcScene são estimativas da resposta dos eventos simulados que incidem na bacia mas que comparado com resultados obtidos por outros pesquisadores que estudaram a mesma área, como Graciosa (2010) e Pontremolez (2013) estão próximos entre se, o que não necessariamente é garantia de que seja coincidente com a realidade, mas da um bom indicio que esteja pelo menos próximo.

Embora alguns desses eventos simulados não tenham dados para ser validados a probabilidade dele ocorrer só aumenta com o passar dos anos e os gestores públicos tem que estar atento para essa possibilidade de ocorrência de forma a tomar as medidas mais adequadas.

A modelagem do comportamento hidrológico em microbacias urbanas é uma importante ferramenta para a gestão desse ambiente, nos dando a chance de antever problemas de modo a estarmos preparados para mitiga-los ou evita-los quando possível.

## REFERENCIAS

- ALMEIDA, R. C.; FREITAS, D. As mudanças da paisagem urbana contadas pelos velhos cidadãos. **Ensino em Revista**, Uberlândia, v. 18, n. 2, 2011, p. 363-373.
- ALTMANN, A. L.; ECKHARDT, R. R.; REMPELL, C. Evolução temporal do uso e cobertura da terra – Estudo de caso no município de Teutônia – RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v. 61, n. 3, p. 273-283, 2009.
- ANDRADE, M. A. **Simulação hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região alto Rio Grande**. 135 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, 2011.
- APRÍGIO, P. de O. **Avaliação de modelos de simulação de cargas difusas em bacias urbanas**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2012.
- AQUAFLUXUS. (S.l.: s.n., 2016). Disponível em: <<https://www.aquafluxus.com.br>>. Acesso em; 10 jan 2016.
- AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. **Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 111 p.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 29-49.2002.
- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos – SP**. 1991. 213 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos– EESC, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 1991.
- BARTH, F. T. et al. **Modelo para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel, 1987. v. 1, p.1 – 91.
- BATES, P. D.; ROO, A. P.J . de. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 236, n. 5, p. 54 -77, 2000.
- BERRY, J.; SAILOR, J. Use of geographic information system for storm runoff prediction for small urban watersheds. **Environmental Management**, New York, v. 11, p 21 – 27, 1987.
- BRASIL. **Estatuto da cidade**: guia para implementação pelos municípios e cidadãos. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações. p. 2002.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 384 p.



CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo -RJ. **Revista Árvore**, Viçosa- MG, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A.T. (Org.). **Ministério das cidades Instituto de Pesquisas Tecnológicas**: mapeamento de riscos em encostas e margens de rios. Brasília – DF: [n. s.], 2007, 176 p.

CENTRO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL- CDCC . **Roteiro visita sub-bacia hidrográfica do córrego do Gregório**. São Carlos: Universidade de São Paulo-USP, 2007. 22 p.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais**. Curitiba: UFPR, 2003. p. 233 – 242.

CHEN, J.; HILL, A. A.; URBANO, L. D. A gis-based model for urban flood inundation. **Journal of Hydrology**, Orlando, v. 373, p. 184-192, 2009.

COELHO, M. V. R. **Estudo de hidrogramas de cheia para bacia hidrográfica do córrego do mineirinho em São Carlos- SP**. Ilha Solteira: UNESP- FEIS, 2014. 18 p. Trabalho de Iniciação Científica- TIC.

CORREIA, M. M. R. **Contribuição para avaliação e gestão de riscos de inundações. caso de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Nabão – Portugal**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2013.

CRAWFORD, M.; LINSLEY. **Digital simulation in hydrology stanford watershed model IV**. 1966. 210 f. Thesis (MA)- Department of Civil Engineer, Stanford. 1966.

DUTTA, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. **Hydrological Process**, Chichester, v. 14, p. 497-519, 2000.

ECKHARDT, R. R.; SALDANHA, D. L.; ROCHA, R. S. Modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas urbanas sujeitas às inundações da bacia de Lajeado. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v. 3, n. 60, p. 253-262, 2008.

FERRAZ, F. F. de B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, p. 45-56, v. 14, 1999.

FOTHERINGHAM, A. S.; ROGERSON, P. A. **Spatial analysis and GIS**. London: Taylor & Francis, 1994. 189 p.

GAMA, W. M. **Impactos das mudanças climáticas na resposta hidrológica da Bacia hidrográfica do Rio Paraíba do meio (AL/PE)**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Maceió 2011.

GONÇALVES, N. M. S. Impactos fluviais e desorganização do espaço urbano em Salvador. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Org.). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. 13 p.

GOODCHILD, M. F.; HAINING, R.; WISE, S. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. **International Journal of Geographical Information Systems**, Abingdon, v. 6, n. 5, 1992, p. 407-423.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. 2010. 191 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2010.

HA, S. J.; STENSTROM, M. K. Predictive modeling of storm-water runoff quantity and quality for a large urban watershed. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v.134, p 703 -711, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Censo demográfico 2010**. Brasília – DF: [s.n.], 2010. 711 p.

JAMBERSI, B. P. **A escola normal e a formação da elite intelectual da cidade de São Carlos (1911 - 1930): um estudo dos valores republicanos da época**. 2008. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2008. 75 f. (Graduação em Pedagogia)- Centro de Educação e Ciências Humanas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

JORDÃO, L. C. S. **Novas periferias urbanas: a expansão de São Carlos através de condomínios fechados**. São Carlos: [s.n.], 2010. 13 p.

KORTE, G. B. **The GIS book**. New York: Albany, 2001. 87 p.

LERSCH, R. P. **Integração de técnicas de SIG e sensoriamento remoto na classificação de imagens digitais com o uso da teoria da evidencia**. 2003. 87 f. Dissertação ( Mestrado)- Faculdade de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2003.

LIMA, A. P. **Análise de impactos associados à precipitação na cidade de São Carlos-SP**. 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Presidente Prudente, 2012.

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2012.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed imagens: an introduction**. 2. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 1999. 471p.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1998. 190 p.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 593 p.

MELANCON, P. A. **A GIS based watershed analysis system for Tillamook bay, Oregon**. Austin: Center for Research in Water Resources, University of Texas, 1999. 376 p.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. da. **Hidrologia de superfície: estimativa de vazões máximas**. Lavras-MG: UFLA, 2001. 32 p.

MELO, H. de A.; CUNHA, J. E. B. L.; NOBREGA, R. L. B.; RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. de O. Modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica (sig): integração possível. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Simpósio...** Salvador: [s.n.], 2008. p. 1-14

MENDES FILHO, W. M.; VENDRAME I. F.; CARVALHO, R. G. Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., Florianópolis, 2007. **Simpósio...** Florianópolis: [s.n.], 2007. p. 3453-3460.

MENESES, P. R. Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: MENESES, P. R. SOBRENOME NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 203-222.

MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília-DF: [s.n.], 2012. 276 p.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. de. Relação entre intensidade, duração e Frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 9, n. 13, P. 59 – 68, 2009.

NAKAYAMA, P. T.; MENDES, J. B.; LOBO, G. de A.; SILVEIRA, G. M. Avaliação do parâmetro CN do método de soil conservation service (SCS) nas bacias do Ribeirão dos Marins e Córrego Bussocaba – estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS- SBRH., 9., 2011, Maceió. **Simpósio...** Maceió: [s.n.], 2011. 16 p.

NANIA, L. S.; MOLERO, E. **Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1**. Granada: [s.n.], 2007. 59 p.

NASCIMENTO, M. C. do; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S.; SILVA, E. Uso do geoprocessamento na identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente da Bacia Hidrográfica do Rio Alegre, Espírito Santo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 207-220, 2005.

OLIVEIRA, F. S. Identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente no entorno do parque nacional do Caparaó, Estado de Minas Gerais. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, v. 32, n. 5, p. 899 - 908, 2008.

- OLIVEIRA, R. C. de. **Medidas não estruturais na prevenção e controle de enchentes em área urbanas, como subsídios para o planejamento de uso e ocupação do solo:** estudo de caso bacia do córrego do Gregório – São Carlos (SP). 1998. 133 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 1998.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Relatório sobre a situação da população mundial 2011.** [S.l.]: UNFPA, 2011. 113 p.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 406, p. 170 – 181, 2011.
- PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G. D.; GEMITZI, A.; TSIHRINTZIS V. A. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the soil and water assessment tool (SWAT). **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 250, p. 274 - 286, 2010.
- PONTREMOLEZ, N. S. **Estudo das inundações em cenários alternativos de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Mineirinho em São Carlos, SP.** 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos. 2013.
- PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana.** Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998. 47 p.
- PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: BARROS, M.T.; PORTO, R.L.; TUCCI, C.E.M (Organizadores). **Drenagem urbana.** Porto Alegre: ABRH, 1995. cap. 4, p.107-165.
- REIS, P. E. **O escoamento superficial como condicionante de inundação em Belo Horizonte, MG:** estudo de caso da sub-bacia córrego do Leitão, bacia do ribeirão Arrudas. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica:** aplicação a bacias hidrográficas. 2003. 148 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2003.
- RIGHETO, A. M.; PORTO, R. M.; VILLELA, S. M. **Hidráulica computacional aplicada a problemas de drenagem urbana.** [S.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1994. 23 p.
- SANTOS, M. **A urbanização brasileira.** São Paulo: Editora de Humanismo, Ciência e Tecnologia- Hucitec, 2009. 76 p.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica. In: CONGRESSO NACIONAL DE TECNOLOGIAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, 12., Granada, 2006. **Congresso....** Granada: [s.n.], 2006. p. 465-479.

SARHADI, A.; SOLTANI, S.; MODARRES, R. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: linking GIS techniques and frequency analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 459, p. 68–86, 2012.

SARTORI, A; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10 ,n. 4, p. 5 - 18, 2005

SAUNDERS, W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE, San Diego, 1999. **Conference...** San Diego: [s.n.], 1999. p. 1 - 8

SÉ, J. A. S. O. **Rio do Monjolinho e sua Bacia Hidrográfica como integradores de sistemas ecológicos:** um conjunto de informações para o início de um processo de pesquisas ecológicas, de educação, planejamento e gerenciamento ambientais a longo prazo. 1992. 381 f. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo- USP, 1992.

SECRETARIA do meio ambiente e recursos hídricos. (S.l.: s.n., 2015). Disponível em: <<http://www.meioambiente.pr.gov.br>>. Acesso em: 18 jul. 2015.

SEYBERT, T. A. **Stormwater management for land development:** methods and calculations for quantity control. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 144 p.

SILVA, J. B. L. **Modelos de previsão de inundações em tempo real para o município de Nova Era - MG.** 2006. 99 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa - MG, 2006.

SOUZA, F. C. B. **Integrando sistemas de informação geográficos e MCDA.** 1999. 154 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 1999.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos.** São Carlos: Editora UFSCAR, 2007. p. 76.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais:** conhecer para prevenir. São Paulo : Instituto Geológico, 2009. 160 p.

TSOU, M. S.; WHITTEMOREZ, D. O. User interface for ground-water modeling: arcview extension. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 6, p. 251 – 257, 2001.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia:** ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. rev. e aum. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, 1997.

UCHIGAGO. (S.l.: s.n., 2015). Disponível em: <<http://cier.uchicago.edu/gis/gis.htm>>. Acesso em: 27 jul 2015.

UNITED STATE ARMY CORPS OF ENGINEERS.- USACE. **HEC-RAS river analysis system**: user's manual. Davis: HEC – Hydrologic Engineering Center, 2010

UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Urban hydrology for small watersheds**: natural resources conservation service. technical release 55. Washington: USDA, 1986.

UNITED STATE. GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Independent technical review and analysis of hydraulic modeling and hydrology under low-flow conditions of the des plains river near riverside**. Illinois: [s.n.], 2012. 73 p.

VISSMAN Jr, W; HARBAUGH, W.; KNAPP, T. E . **Introduction to Hidrology**. New York: [s.n.], 1972. 704 p.

WHITEAKER, T.; MAIDMENT D. R. **Geographically integrated hydrologic modeling systems**. 2004. 220 f . Dissertation (Mestrado)- Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin, 2004.

ZAHAR, J. **O mapa fantasma**: como a luta de dois homens contra o cólera mudou o destino de nossas metrópoles. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. 271 p.

## ANEXO

### 1. Fotos da área de estudo

Figura 1 – Área de lazer contígua à nascente do Córrego do Mineirinho, próximo à Rua Olavo Godoy



Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)

Figura 2 – Vegetação próxima a mata ciliar de um afluente do Córrego do Mineirinho, imagem vista do campus II da USP.



Fonte: (APRIGIO, 2012)

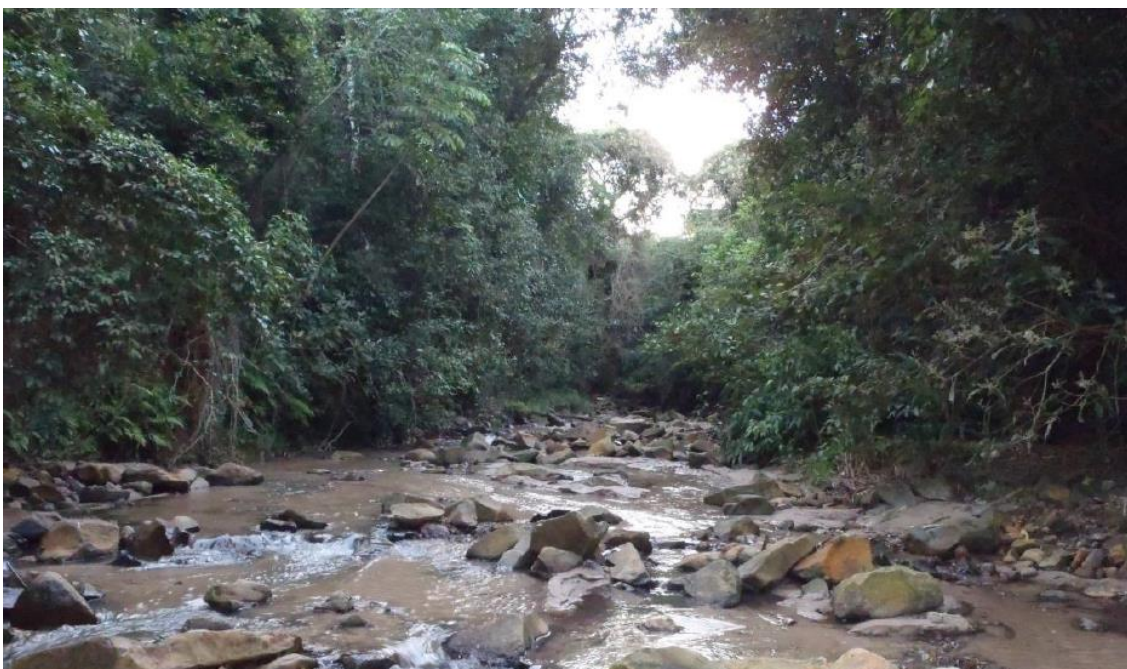


Figura 3 – Rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho. Área onde foi instalado o condomínio Faber Castell ficando as margens do Córrego do Mineirinho



Fonte: (APRIGIO, 2012)

Figura 4 – Córrego do Mineirinho após secção de controle na rotatória da Av. Bruno Ruggiero Filho



Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)

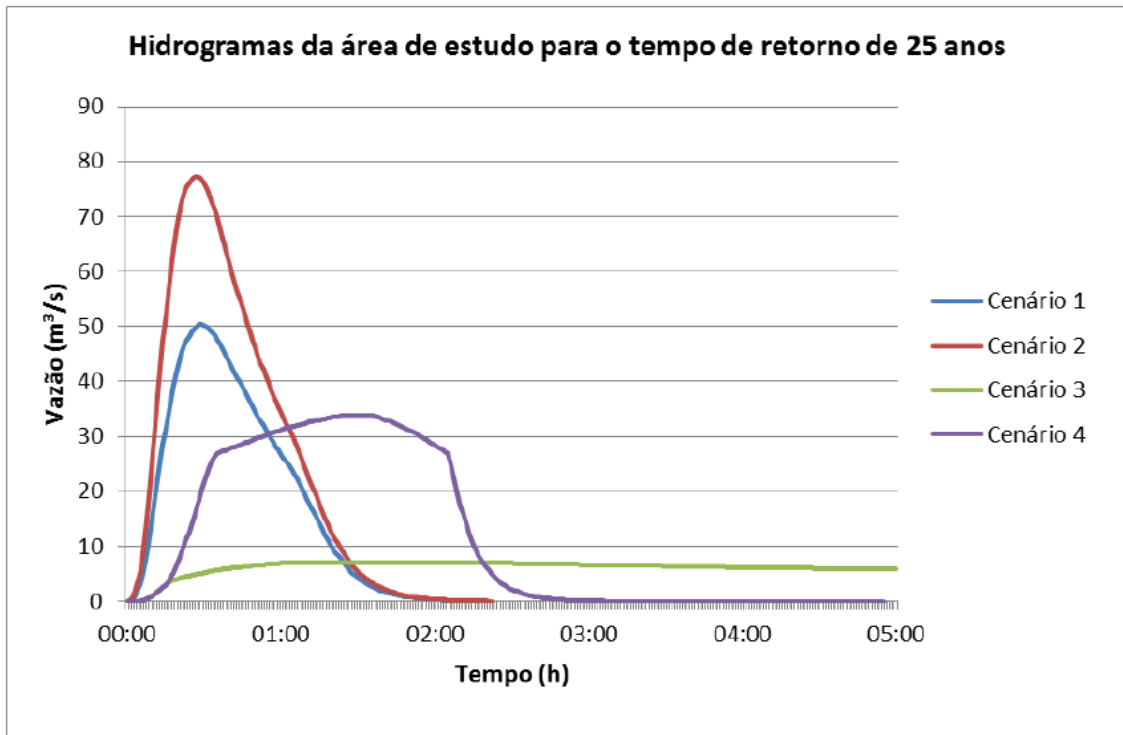


Figura 5 - Foz do Córrego do Mineirinho.

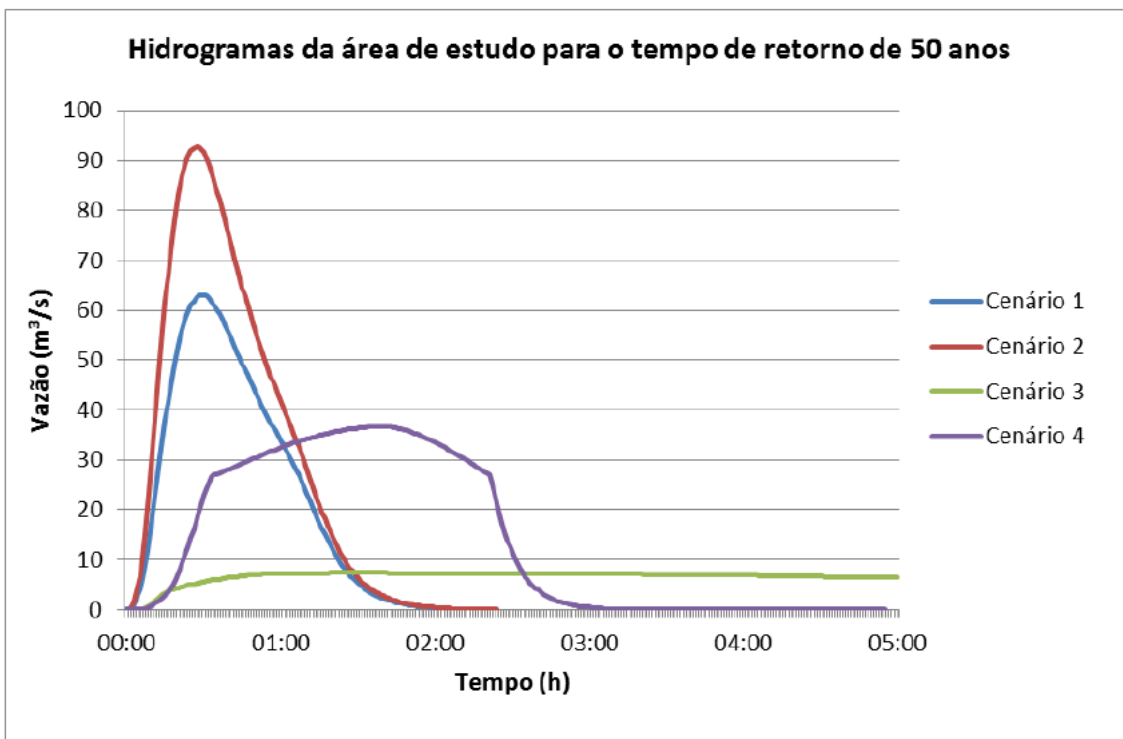


Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)

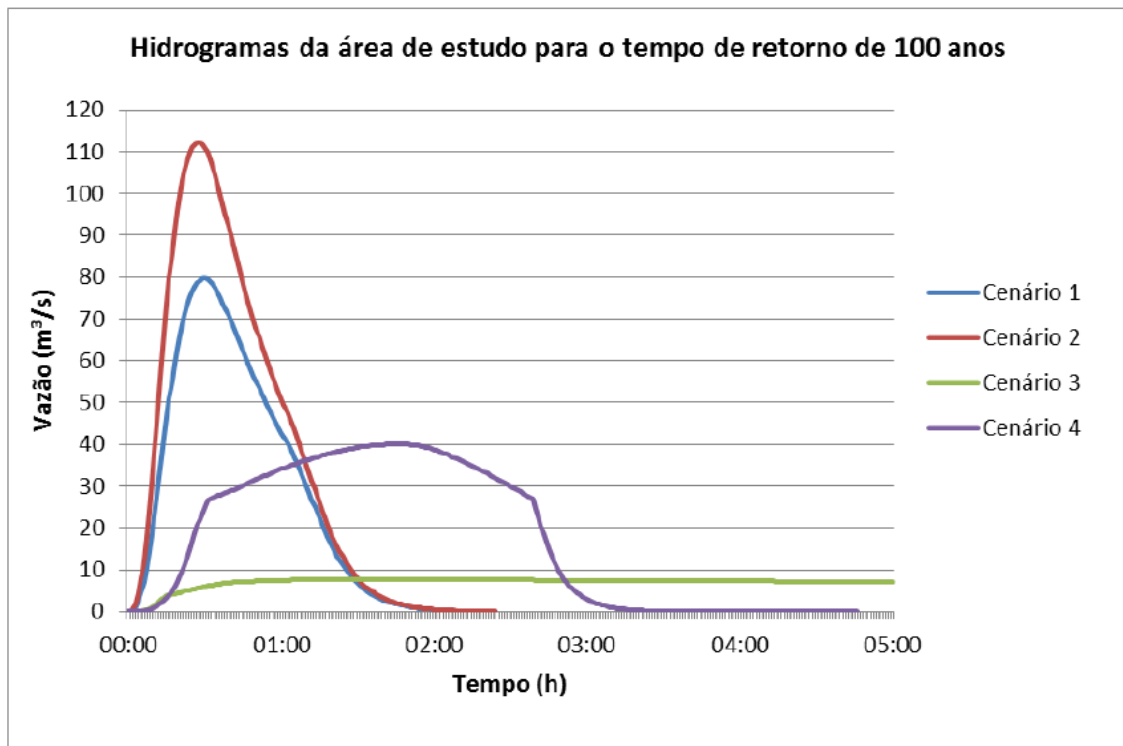
## 2. Hidrogramas utilizados para simulações no ArcScene



Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)



Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)



Fonte: (PONTREMOLEZ, 2013)