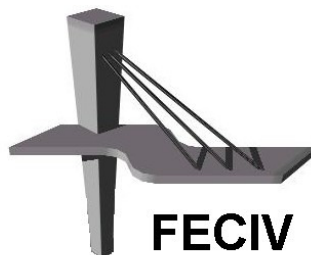


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA
ESTIMATIVA DA INFLUÊNCIA DO CRESCIMENTO
URBANO NA FORMAÇÃO DE ZONAS INUNDÁVEIS
ADJACENTES AO CÔRREGO DO MONJOLO, EM
PATOS DE MINAS, MG**

ANA CLARA MENDES CAIXETA

UBERLÂNDIA, 28 de fevereiro de 2013



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Ana Clara Mendes Caixeta

**SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA ESTIMATIVA
DA INFLUÊNCIA DO CRESCIMENTO URBANO NA
FORMAÇÃO DE ZONAS INUNDÁVEIS ADJACENTES AO
CÓRREGO DO MONJOLO, EM PATOS DE MINAS, MG**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de **Mestre em
Engenharia Civil**.

Área de concentração: Engenharia Urbana

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2013



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 108/2013

CANDIDATA: Ana Clara Mendes Caixeta

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

TÍTULO: "Simulações computacionais para estimativa da influência do crescimento urbano na formação de zonas inundáveis adjacentes ao Córrego do Monjolo, em Patos de Minas/MG"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Infraestrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 28 de fevereiro de 2013

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 09:10 - 11:30

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:


Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**


Membro externo: **Prof. Dr. Johannes Gerson Janzen – UFMS**


Membro: **Prof.ª Dr.ª Ana Luiza Ferreira Campos Maragno – FECIV/UFU**

Uberlândia, 28 de fevereiro de 2013.

*Á Deus, à minha família, ao meu namorado e aos meus
amigos pelo carinho, apoio e principalmente incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força para perseverar nos momentos difíceis da vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor José Eduardo Alamy Filho, pelo norteamento da dissertação e pelas filtragens no direcionamento da dissertação, também pela paciência com as minhas dificuldades, com os programas, os dados, a escrita e principalmente os cálculos necessários.

A Professora Nágela por ter me norteado pela carreira acadêmica, após o estágio docente. Aos professores das disciplinas cursadas, o Professor Márcio e a Professora Ana Luiza. Agradeço também ao Professor Carlos Eugenio pelos campos no estudo de drenagem urbana em Uberlândia.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, que forneceram o apoio necessário à realização da pesquisa e nas possibilidades do departamento em apoiar eventos, que são importantes para o aprimoramento e atualizações na temática da dissertação. Agradeço principalmente, a Sueli, a Marianny e a Professora Maria Cristina pelas orientações administrativas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A Prefeitura Municipal de Patos de Minas pelas informações concedidas. Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados pluviométricos concedidos. Ao Professor Carlos Henrique do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) pelos dados de solo.

A toda a minha família pelo apoio e compreensão com a minha ausência nas comemorações e nos encontros familiares. Agradeço pelo auxílio e apoio nos momentos difíceis da realização do trabalho, e por sempre me darem notícias e guardarem jornais sobre a área de estudo e também sobre a cidade de Patos de Minas, para que eu esteja sempre atualizada dos principais eventos hídricos da cidade. Portanto, todos me apoiaram no estudo.

A meu Padrinho César pelo apoio nos estudos com conversas e informações da dinâmica de Patos de Minas. Ao meu primo André Magalhães pelos auxílios nos trabalhos de campo e na coleta de dados.

Aos meus pais, Vilmar e Maria Inês pelo incentivo e apoio em todos os momentos. A minha família que sempre me apoiou, principalmente me informando se o Córrego do Monjolo transbordou e se choveu muito. Ao meu irmão, Davi, que sempre rezou para que tudo desse certo, mesmo longe me apoiando. Ao Vítor, meu companheiro pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus amigos da Faculdade de Engenharia Civil, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho, a Monise, o Thiago Augusto, o Thiago Omena, a Paula, a Fernanda e Antônio José. Além disso, a Luciana pelo companheirismo nos eventos para aprimorar e atualizar o tema da dissertação.

A todos o meu muito obrigada.

“Fecharam-se as fontes do Abismo e as comportas do céu, e a chuva parou de cair.

Pouco a pouco as águas foram se retirando da terra.” Gn 8, 2-3

CAIXETA, A.C.M. **Simulações computacionais para estimativa da influência do crescimento urbano na formação de zonas inundáveis adjacentes ao Córrego do Monjolo, em Patos de Minas, MG.** 227 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013

RESUMO

Ao longo dos anos, o crescimento das cidades ocorreu nas regiões próximas às bacias hidrográficas, dificultando as áreas de recarga dessas bacias e tendo como consequências as enchentes urbanas. Baseando-se no estudo de bacias urbanas, este trabalho tem o objetivo de estimar e delimitar áreas inundáveis da bacia do Córrego do Monjolo em Patos de Minas. Desta forma, a partir da aplicação de modelos hidrológicos (Método Santa Bárbara) e hidráulicos (onda cinemática) na simulação computacional de enchentes para diferentes cenários de crescimento da urbanização da área remanescente a montante da bacia, foram definidas situações extremas de enchentes, que são as mínimas (aproximadamente 2000 m² de área de envoltória e menor tempo de retorno) e as máximas (tempo de retorno de 100 anos com as máximas áreas de envoltórias). Além disso, este trabalho verificou os efeitos, na macrodrenagem da bacia, de diferentes taxas de áreas permeáveis na ocupação dos loteamentos. Nas simulações realizadas, constatou-se o surgimento das inundações adjacentes ao canal artificial, comprovando que, para determinados cenários de precipitação e de urbanização da bacia, ocorre o transbordamento em alguns pontos da sua extensão. Com alargamento significativo da base do inundograma foi observado que fica evidente a tendência das enchentes perdurarem por mais tempo, com a crescente ocupação da bacia. Com a análise dos resultados das simulações, foi possível estabelecer uma taxa de ocupação máxima sugerida de 55%, para a bacia. Este estudo também propôs a adoção de uma área permeável mínima de 37% nos futuros lotes, com uma urbanização de 100% da área remanescente, de forma a evitar as inundações na Bacia do Córrego do Monjolo. Por meio destas análises e observações, este trabalho pode ser utilizado pelos gestores para um planejamento urbano mais adequado, no que diz respeito à ocupação da bacia.

Palavras-chave: Simulação Computacional – Modelos hidrológicos e hidráulicos – Inundações – Urbanização – Patos de Minas

CAIXETA, A.C.M. **Computer simulations to estimate the influence of urban growth in the formation of flood areas adjacent to Monjolo Stream in Patos de Minas, Minas Gerais.** 227 pp. MSc Dissertation, Civil Engineering College, Uberlândia Federal University, 2013.

ABSTRACT

Over the years, urban growth occurred in regions close to watersheds, making difficult the recharge areas of these basins and having consequences as urban flooding. Based on the study of urban watersheds, this work aims to estimate and delineate floatable areas around Monjolo Stream in Patos de Minas. Thus, from the application of hydrologic models (Method Santa Barbara) and hydraulic (kinematic wave) in computer flooding simulation, for different urbanization growth scenarios from remaining area of the basin, extreme floods situations were defined, which are the mínimas (approximately 2000 m² of envelopment and faster recovery time area) and maximum (return time of 100 years with the highest envelopment areas). Furthermore, this study verified the effects, on basin macro drainage, different rates of permeable areas in occupied allotments. In these simulations, we observed the appearance of adjacent flooding to the artificial watercourse, proving that for certain precipitation and basin urbanization scenarios, the overflow occurs at some points of its extension. With the base of inundograma significant widening, it was observed that there is an evident trend of longer lasting floods, with basin growing occupation. Analysing the simulation results, it was possible to establish a suggested maximum occupancy rate of 55% for the basin. This study also proposes the adoption of a minimum permeable area rate of at least 37% in future allotment, with 100% urbanization of the remaining area in order to prevent flooding on the Stream Monjolo Basin. This work analysis and observations, can be used by gestors to a more suitable urban planning, regards the basin occupation.

Keywords: Computer simulation – Hydrologic and hydraulic models – Overflows – Urbanization – Patos de Minas

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

$\%$	- Porcentagem
A_i	- área da bacia correspondente ao número de curvas (m^2)
B	- Largura do canal
CN	número CN composto da bacia em estudo;
CN_i	número CN para um determinado utilização ou cobertura do solo da bacia;
A_{total}	área total da bacia
i	- intensidade máxima de precipitação
T_r	tempo de retorno ou recorrência
t_d	duração
B_d	largura da calha principal.
Q	vazão
q_r	contribuição Lateral
n	coeficiente de Manning
S_o	declividade de fundo
k	índice indica variáveis no instante atual
$k+1$	instante subsequente.
Δx e Δt	o espaçamento entre cada seção discreta do canal e o passo de tempo dos cálculos
β	é o expoente igual a 0,60
θ	é fator um parâmetro de ponderação que varia entre 0,5 e 1.
$j+1$	sub índice indica a seção transversal de jusante, na qual a vazão deve ser calculada.
P_m	o perímetro molhado
A_m	área molhada
R_h	raio hidráulico

Fr	Froude
$p(\%)$	porcentagem de precipitação;
m	ordenamento dos valores por ordem decrescente;
n	é o número de dados da série analisada;
\bar{P}	precipitação média obtida na serie observada;
k :	constante (fator de frequência);
σ	desvio padrão da serie;
Y	variável reduzida de Gumbel;
\bar{y}	valor médio da variável reduzida
σ_y	desvio padrão dessa variável
i_e	intensidade calculada a partir da equação de chuva
A	área molhada da seção [m^2];
V	velocidade média na seção transversal [m/s];
Δs	deslocamento do flutuador [m], medido entre duas seções;
Δt	variação do tempo [s] para ocorrência do deslocamento Δs .
t_c	tempo de concentração da bacia (min);
L	comprimento do talvegue principal (km);
i_{mp}	porcentagem impermeável na bacia (%).
I	entrada do reservatório imaginário (m^3/s);
i	precipitação total da chuva no intervalo Δt (m/s);
i_e	escoamento da chuva excedente;(m/s)
d	fração da área impermeável em relação a área total;
A	área total de drenagem (m^2)
Q	<i>runoff</i> ou chuva excedente (mm);
P	precipitação (mm);
I_a	abstração inicial (mm);
S	potencial máximo de retenção após começar o runoff (mm).
Q_j	vazão saída do reservatório;
$Q_{(j-1)}$	vazão no instante de tempo anterior;
K_r	coeficiente de retardo;
$I_{(j-1)}$	instantânea do reservatório imaginário;
$I_{(j)}$	instantânea do reservatório imaginário.

$n-1$	nível de tempo anterior
n	nível de tempo atual
j	indica a seção
N	quantidade de seções na qual o canal foi discretizado.
Δt	passo de tempo das simulações
ΔV	volume armazenado lateralmente entre as duas seções
ΔL	espaçamento entre cada seção discreta.
(ΣA_{IN})	somatório das áreas inundadas

ABREVIATURAS e SIGLAS

<i>INMET</i>	- Instituto Nacional de Meteorologia
<i>IBGE</i>	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>ABNT</i>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>UFU</i>	- Universidade Federal de Uberlândia
<i>UTM</i>	- Universal Transversal de Mercator
<i>SCS</i>	-Soil Consevation System
<i>SRTM</i>	-Shuttle Radar Topography Mission
<i>COPASA</i>	- Companhia de Saneamento de Minas Gerais
<i>PMPM</i>	- Prefeitura Municipal de Patos de Minas
<i>GPS</i>	- Global Positioning System
<i>INPE</i>	-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>MNT</i>	-Modelo Numérico do Terreno
<i>CBERS-2B</i>	- China–Brazil Earth Resources Satellite Program

LISTA

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais fundamentos do estudo.....	31
Figura 2.2 – Porcentagem do comportamento hidrológico com o crescimento urbano..	35
Figura 2.3 – Processos urbanos nos recursos hídricos.....	36
Figura 2.4 – As curvas fornecem o valor de R, aumento da vazão média de inundação função da área impermeável e da canalização do sistema de drenagem.....	38
Figura 2.5 – Parâmetros iniciais do Método Santa Bárbara.....	46
Figura 2.6 – Métodos para a estimativa da chuva efetiva.....	48
Figura 2.7 – Quadris do método de Huff.....	49
Figura 2.8 – Áreas da macrodrenagem.....	54
Figura 2.9 – Evolução de obras de retenção em centros urbanos.....	56
Figura 2.10 – Distribuição brasileira de desastres naturais ocorridos no período de 1900-2006.....	60
Figura 3.1 – Mapa de localização da Bacia do Córrego do Monjolo, 2011.....	64
Figura 3.2 – Avenidas importantes para o estudo na malha urbana de Patos de Minas..	65
Figura 3.3 – Localização da Bacia do Córrego do Monjolo no perímetro urbano de Patos de Minas.....	72
Figura 3.4 – Estrangulamento no cruzamento das Avenidas Fátima Porto com a JK.....	73
Figura 3.5 – Ocupação urbana na Bacia do Córrego do Monjolo no entorno da Avenida Fátima Porto no ano de 2008.....	74
Figura 3.6 – Ocupação urbana na Bacia do Córrego do Monjolo no entorno da Avenida Fátima Porto no ano de 2012.....	74
Figura 3.7 – Avenida Ivan Borges com a retirada do asfalto pela chuva.....	74
Figura 3.8 – Reforma no Córrego Caixa d'água no centro da Avenida Ivan Borges. Este córrego é despeja suas águas no trecho urbano do Córrego do Monjolo.....	75

Figura 3.9 – Boca de lobo com sedimentos na Avenida Ivan Borges.....	76
Figura 3.10 – Parque do Mocambo.....	76
Figura 3.11 – Início da edificação da Avenida a esquerda do Córrego do Monjolo (a - Vista de topo Google Earth).....	78
Figura 3.11 – Início da edificação da Avenida a esquerda do Córrego do Monjolo (b - vista Frontal).....	78
Figura 3.12 – Via em construção sobre o Córrego do Monjolo.....	78
Figura 3.13 – Avenida Fátima Porto (a- Prolongamento da Avenida Fátima Porto em outubro de 2012).....	79
Figura 3.13 – Avenida Fátima Porto (b- Final da Avenida Fátima Porto antes do prolongamento).....	79
Figura 3.14 – Loteamento na Bacia do Córrego do Monjolo.....	80
Figura 3.15 – Visualização da malha urbana no interior da Bacia do Córrego do Monjolo.....	81
Figura 3.16 – Enchentes no leito do Córrego do Monjolo.....	82
Figura 3.17 – Erosão Marginal.....	82
Figura 3.18 – Enchente na Avenida Ivan Borges Porto, após o termino da chuva em 2012.....	82
Figura 3.19 – Leito do Córrego do Monjolo no momento de chuva. 2012.....	83
Figura 3.20 – Leito do Córrego do Monjolo 2012.....	83
Figura 4.1 – Mapa geral com as curvas de nível originais, distribuição de pontos coletados e modelo numérico de terreno (malha geral), cujos pontos apresentam espaçamentos uniformes.....	86
Figura 4.2 – Curvas de nível da malha de vizinhança do canal.....	87
Figura 4.3 – Esquema de hidrogramas gerados por duas áreas de contribuição de uma bacia genérica.....	89
Figura 4.4 – Traçado de um corte transversal à seção do canal e comparação entre as cotas da superfície livre (NA) e do terreno (NT), com intuito de identificar coordenadas dentro de zonas de inundação. As linhas de grade verdes definem a malha de vizinhança, contendo pontos onde as coordenadas e cotas são conhecidas..	91
Figura 4.5 – Fluxograma de dados preliminares.....	93
Figura 4.6 – Carta Imagem de Patos de Minas, na região da bacia do Córrego do Monjolo – 2012.....	94

Figura 4.7 – Informações necessárias para obtenção do número CN composto de uma bacia de contribuição.....	102
Figura 4.8 – CN maiores que 90, diferenciando áreas permeáveis e impermeáveis.....	102
Figura 4.9 – Alturas pluviométricas máximas anuais do Município de Patos de Minas (1980 – 2010).....	103
Figura 4.10 – Seção Transversal da Estaca 1.....	107
Figura 4.11 – Seção utilizada para levantamento da vazão inicial.....	109
Figura 4.12 – Medidas do canal para cálculo da vazão inicial, no trecho de percurso do flutuador.....	109
Figura 4.13 – Seção Modelo de sistema hidrológico simples.....	111
Figura 4.14 – Hidrogramas calculados em três seções específicas do trecho analisado.....	114
Figura 4.15 – Curvas-chave de área molhada e perímetro molhado para a seção situada a 1 km do início do trecho analisado.....	117
Figura 4.16 – Esquema de armazenamento lateral de água na planície de inundação..	118
Figura 4.17 – Esquema de área inundada entre duas seções consecutivas.....	119
Figura 4.18 – Exemplo de inundograma, relacionando a distribuição temporal da chuva ($P \times t$), a área total inundada e o volume total transbordado para diversos instantes.....	120
Figura 5.1 – Cenários Simulados na Bacia do Córrego do Monjolo.....	122
Figura 5.2 – Modelo Numérico do Terreno MNT- 3D.....	123
Figura 5.3 – Modelo Numérico do Terreno MNT com delimitação da bacia do Córrego do Monjolo.....	124
Figura 5.4 – Perfil do canal no trecho canalizado.....	124
Figura 5.5 – Mapa de Declividade (%).....	125
Figura 5.6 – Mapa de Orientação de Vertente.....	126
Figura 5.7 – Altura da calha principal do canal.....	127
Figura 5.8 – Revestimento do Canal do Córrego do Monjolo.....	127
Figura 5.9 – Sub-Bacia do Mocambo, correspondente a uma área de contribuição ao Córrego do Monjolo.....	128
Figura 5.10 – Área de Contribuição da seção natural.....	129
Figura 5.11 – Área de Contribuição da bacia do Córrego do Monjolo.....	129
Figura 5.12 – Áreas permeáveis e impermeáveis.....	130

Figura 5.13 – Mapa de uso do solo na Bacia do Córrego do Monjolo.....	131
Figura 5.14 – Afluência de galerias de água pluvial ao longo do Córrego do Monjolo.....	132
Figura 5.15 – Curvas $P \times T_r$, com dados observados, com as aproximações pelo método de Gumbel e pela linha de tendência logarítmica.....	133
Figura 5.16: Alturas pluviométricas (mm) nos determinados.....	134
Figura 5.17: Curvas alturas pluviométricas (mm), obtidas como função da sua duração e período de retorno.....	134
Figura 5.18: Curvas de intensidade de precipitação, obtidas como função da sua duração e período de retorno.....	135
Figura 5.19: Curvas de intensidade de precipitação: comparações entre a equação de chuva proposta e os dados obtidos pela função logarítmica.....	136
Figura 5.20 – Condições iniciais que caracterizam o regime permanente no canal.....	137
Figura 5.21: Máximas áreas de envoltória de enchentes.....	138
Figura 5.22: Variação dos parâmetros de simulação.....	139
Figura 5.23 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e Chuva tipo 1.....	141
Figura 5.24 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e Chuva tipo 2.....	141
Figura 5.25 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e Chuva tipo 3.....	141
Figura 5.26 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e Chuva tipo 4.....	141
Figura 5.27 – Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $T_r = 5$ anos, duração = 60 minutos e chuva tipo 4.....	141
Figura 5.28 – Pontos atingidos para o instante de 55 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.....	143
Figura 5.29 – Pontos atingidos para o instante de 57 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.....	143
Figura 5.30 – Pontos atingidos para o instante de 58,5 minutos, correspondente à fase	

de recessão da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.....	144
Figura 5.31 – Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $T_r = 15$ anos, duração = 43 minutos e chuva tipo 3.....	144
Figura 5.32 – Pontos atingidos para o instante de 31 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.....	145
Figura 5.33 – Pontos atingidos para o instante de 33,5 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.....	145
Figura 5.34 – Pontos atingidos para o instante de 35 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.....	146
Figura 5.35 – Inundograma de enchente máxima, gerada para precipitação de $T_r = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4.....	146
Figura 5.36 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	147
Figura 5.37 – Pontos atingidos para o instante de 54,5 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	148
Figura 5.38 – Pontos atingidos para o instante de 58 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	148
Figura 5.39 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 1.....	149
Figura 5.40 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 2.....	149
Figura 5.41 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 3.....	150
Figura 5.42 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 4.....	150
Figura 5.43 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $T_r = 2,5$	

anos, duração = 44 minutos e chuva tipo 4.....	151
Figura 5.44 – Pontos atingidos para o instante de 40,5 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4....	151
Figura 5.45 – Pontos atingidos para o instante de 41 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4.....	152
Figura 5.46 – Pontos atingidos para o instante de 43 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4.....	152
Figura 5.47 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4.....	153
Figura 5.48 – Pontos atingidos para o instante de 49 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	153
Figura 5.49 – Pontos atingidos para o instante de 54 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	154
Figura 5.50 – Pontos atingidos para o instante de 59 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.....	154
Figura 5.51 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e Chuva tipo 1.....	155
Figura 5.52 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e Chuva tipo 2.....	155
Figura 5.53 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e Chuva tipo 3.....	156
Figura 5.54 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e Chuva tipo 4.....	156
Figura 5.55 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1,5$ anos, duração = 33 minutos e chuva tipo 4.....	157
Figura 5.56 – Pontos atingidos para o instante de 30 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente,	

tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4.....	157
Figura 5.57: Pontos atingidos para o instante de 31 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4.....	158
Figura 5.58 – Pontos atingidos para o instante de 33 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4.....	158
Figura 5.59 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 51 minutos e chuva tipo 4.....	159
Figura 5.60 – Pontos atingidos para o instante de 45 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.....	160
Figura 5.61 – Pontos atingidos para o instante de 50 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.....	160
Figura 5.62 – Pontos atingidos para o instante de 55 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.....	161
Figura 5.63 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e Chuva tipo 1.....	162
Figura 5.64 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e Chuva tipo 2.....	162
Figura 5.65 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e Chuva tipo 3.....	162
Figura 5.66 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e Chuva tipo 4.....	162
Figura 5.67 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 21 minutos e chuva tipo 4.....	163
Figura 5.68 – Pontos atingidos para o instante de 19 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.....	164
Figura 5.69 – Pontos atingidos para o instante de 21 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de	

retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.....	164
Figura 5.70 – Pontos atingidos para o instante de 22 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.....	164
Figura 5.71 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 46 minutos e chuva tipo 4.....	165
Figura 5.72 – Pontos atingidos para o instante de 40 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.....	166
Figura 5.73 – Pontos atingidos para o instante de 46 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.....	167
Figura 5.74 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.....	167
Figura 5.75 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 1.....	168
Figura 5.76 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 2.....	168
Figura 5.77 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 3.....	169
Figura 5.78 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 4.....	169
Figura 5.79 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 17 minutos e chuva tipo 4.....	170
Figura 5.80 – Pontos atingidos para o instante de 16 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.....	170
Figura 5.81 – Pontos atingidos para o instante de 17 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.....	171
Figura 5.82 – Pontos atingidos para o instante de 18 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo	

de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.....	171
Figura 5.83 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $T_r = 100$ anos, duração = 32 minutos e chuva tipo 4.....	172
Figura 5.84 – Pontos atingidos para o instante de 27 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.....	173
Figura 5.85 – Pontos atingidos para o instante de 33 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.....	173
Figura 5.86 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.....	174
Figura 5.87 – Variação do tempo de concentração com a taxa de área permeável dos lotes.....	176
Figura 5.88 – Área de envoltória máxima para porcentagem dos lotes permeáveis.....	176
Figura 5.89 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	177
Figura 5.90 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	177
Figura 5.91 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	178
Figura 5.92 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	178
Figura 5.93 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	179
Figura 5.94 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	179
Figura 5.95 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	180
Figura 5.96 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	180
Figura 5.97 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	181

Figura 5.98 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	181
Figura 5.99 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	181
Figura 5.100 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	181
Figura 5.101 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	183
Figura 5.102 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	183
Figura 5.103 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	183
Figura 5.104 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – Chuva tipo 4.....	183
Figura 5.105 –: Diagrama utilizado para proposição da máxima taxa de ocupação da área restante da bacia.....	186
Figura 5.106 – Diagrama utilizado para proposição da máxima taxa de impermeabilização dos lotes. Condição de 100% de ocupação residencial da área restante da bacia.....	188

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Gráfico 2.1 – População brasileira por localização de domicílio (%).....	33
Gráfico 3.1 – Temperaturas de Patos de Minas no ano de 2010.....	70
Tabela 3.1 – Evolução Populacional do Brasil, Minas Gerais e Patos de Minas.....	66
Tabela 3.2 – PIB per capita do Município de Patos de Minas (2009).....	67
Tabela 5.1 – Valores iniciais para aplicação dos modelos.....	130
Tabela 5.2 – Contas de pontos relevantes para o estudo.....	132
Tabela 5.3 – Parâmetros de edificações na cidade de Patos de Minas.....	175
Tabela 5.4 – Matriz dos instantes de Chuva.....	185
Tabela 5.5 – Matriz dos instantes de Chuva para % permeável dos Lotes.....	187

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Tecnologia no gerenciamento dos recursos hídricos.....	42
Quadro 2.2 – Síntese dos métodos de vazão de pico.....	44
Quadro 2.3 – Síntese dos Modelos Hidráulicos.....	51
Quadro 2.4 – Síntese das medidas estruturais extensivas.....	56
Quadro 2.5 – Síntese das medidas estruturais intensivas.....	57
Quadro 2.6 – Medidas não-estruturais para evitar enchentes.....	58
Quadro 4.1 – Chave de interpretação para a Bacia do Córrego do Monjolo (2012).....	96
Quadro 4.2 – Grupo de solos e características do solo.....	97
Quadro 4.3 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.....	98
Quadro 4.4 – Condições de umidade antecedente do solo.....	101
Quadro 4.5 – Ajuste do número CN em função das condições de umidade do solo....	101

SUMÁRIO

Capítulo 1 Introdução	26
Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	31
2.1 O processo de urbanização e os recursos hídricos	32
2.2 Modelos hidrológicos para chuva-vazão	43
2.3 Modelos hidráulicos.....	50
2.4 Drenagem urbana e controle de enchentes.....	52
2.5 Alguns trabalhos científicos sobre simulação de inundações de áreas ribeirinhas, devido à urbanização	58
capítulo 3 Caracterização da área de estudo	64
3.1 Patos de Minas aspectos socioeconômicos.....	66
3.2 Patos de Minas aspectos geográficos.....	69
3.3 Patos de Minas e a bacia do córrego do monjolo	71
3.4 Histórico de enchentes de 2008 a 2012	81
Capítulo 4 Materiais e Métodos	84
4.1 Fundamentos do código base.....	85
4.2 Aquisição de informações	92
4.2.1 <i>Análise topográfica</i>	93
4.2.2 <i>Grupo e uso do solo para o cálculo do CN</i>	95
4.2.3 <i>Equação de chuva de Patos de Minas</i>	103
4.2.4. <i>Projeto do canal</i>	106
4.2.5 <i>Levantamentos de campo</i>	108
4.3 Modelos hidrológicos	110
4.3.1 <i>Tempo de concentração (t_c)</i>	110
4.3.2 <i>Método Santa Bárbara e áreas de contribuição</i>	111
4.4 Modelo hidráulico	115
Capítulo 5 Resultados.....	121
5.1 Análise da bacia do Córrego do Monjolo utilizando informações adquiridas ...	122

5.2.1 Levantamentos de campo ao longo do comprimento do canal	132
5.2.2 Equação de chuva de Patos de Minas	133
5.2.3 Condições iniciais (regime permanente).....	136
5.2 Condições de urbanização	138
a) Condição atual	140
b) Condição atual mais 29% de ocupação da área livre	149
c) Condição atual mais 50% de ocupação da área livre	155
d) Condição atual mais 80% de ocupação da área livre	161
e) Condição atual mais 100% de ocupação da área livre	168
5.3 Condições de impermeabilização dos lotes	174
5.3.1- Alterações para 29% de ocupação da área remanescente da bacia	177
5.3.2- Alterações para 50% de ocupação da área remanescente da bacia	179
5.3.3- Alterações para 80% de ocupação da área remanescente da bacia	180
5.3.4 -Alterações para 100% de ocupação da área remanescente da bacia	182
5.4 Proposição de taxas máximas de ocupação da bacia e de taxas máximas de impermeabilização dos lotes.....	184
Capítulo 6 Conclusão	189
Referências	193
Anexo A: jornal local abordando enchentes em 2012. fonte: folha patense, 2012	203
Anexo B código base em visual basic aplicado ao excel	205
Anexo B1 – código para cálculo das curvas-chave.....	206
Anexo B2 – código para cálculo da propagação de cheias e das áreas inundáveis.....	209
Anexo B3 – funções utilizadas no código	224
Índice Inundogramas	226

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As áreas urbanas brasileiras tiveram um considerável movimento migratório, no sentido do campo para as cidades, após a década de 1960. Conforme Mota (2011), o Brasil tinha 55,9% da população urbana em 1970, índice que evoluiu para 84,4% em 2010. Diante disto, a população passou de essencialmente rural para urbana em cinquenta anos, gerando uma rápida ocupação do solo das cidades, desordenada e sem uma infraestrutura necessária.

O crescimento populacional, o aumento da taxa de natalidade, a redução da mortalidade e a migração campo-cidade gerou a intensificação no desordenamento do complexo processo da urbanização. De acordo com Sposito (2012), esse processo de desordenamento do espaço urbano gerou um “inchaço” populacional, que não foi absorvido como mão de obra das indústrias e teve dificuldade de adaptação na cidade, direcionando para a periferia, devido à falta de habitação.

A ocupação desordenada acarreta problemas ambientais urbanos, sendo que um dos principais problemas são as inundações, os impactos ambientais e os aglomerados das populações de baixa renda. A intensificação do processo de ocupação gera o aumento da carência de infraestrutura básica, de abastecimento de água e tratamento de esgoto, propiciando um alto grau de vulnerabilidade ambiental de fenômenos naturais. Além disso, o processo de ocupação de locais inadequados provoca a erosão de encostas, impermeabilização do solo, ocupação dos leitos de rios, favelização, enchentes e deslizamentos.

Na redução e mitigação dos impactos urbanos e para a estruturação das cidades utiliza-se o planejamento urbano, que propõe a organização das cidades com base nas suas características espaciais e temporais. De acordo com o tipo de ocupação do solo, a expansão das edificações nas cidades propicia a necessidade de aplicações de planos (planejamento, acompanhamento das ações e revisão dos resultados) de modo a integrar a área urbana.

No Brasil, dentre as leis de ordenamento territorial urbano há a Lei do Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001). Esta regulamenta e estabelece normas públicas para o uso das propriedades urbanas com o objetivo do bem-estar do meio ambiente social. Com base no Estatuto da Cidade, para cidades com mais de 20 mil habitantes é exigida a criação do Plano Diretor (Lei nº 10.257/2001).

Diversos planos norteiam as ocupações futuras atendendo os agentes formadores do espaço, como, por exemplo, o Estado, as empresas que possuem atrativos para ocupação no seu entorno, entre outros. Com base nos fatores determinantes para a expansão das cidades e a integração com o meio ambiente, utiliza-se a preposição de cenários futuros em diferentes escalas de antropização.

Para simulação de cenários futuros, utilizam-se os modelos matemáticos como uma ferramenta de planejamento. Os modelos matemáticos propiciam uma analogia do meio ambiente real para o ambiente computacional. Porém, é fundamental alimentar o modelo com as características locais, otimizando os cenários futuros.

A redução de áreas verdes nas cidades e o crescimento dos impactos urbanos geram uma modificação na dinâmica ambiental local, afetando a qualidade de vida da população. Na busca por uma dinâmica ambiental equilibrada, utilizam-se os cenários da expansão urbana integrados ao ambiente, contemplando principalmente as enchentes, os deslizamentos de encostas e a favelização.

As enchentes possuem um destaque por estarem baseadas em fatores fundamentais da dinâmica ambiental como a precipitação, o aumento da vazão de pico de cheia, a canalização aberta e fechada dos rios e córregos, o estrangulamento do canal por obras ou

entulhos, a modificação na drenagem urbana, além dos assoreamentos, da poluição das águas, dos resíduos sólidos (GUERRA, CUNHA, 2011).

No cenário de determinação de enchentes, utiliza-se a construção dos modelos hidráulico-hidrológicos. Normalmente são feitas abordagens físicas ou estocásticas do processo hidrológico, utilizando-se a equação da conservação de massa e a equação de quantidade de movimento na sua forma completa ou simplificada. Esses elementos propiciam a utilização de modelos de alta resolução (RIGHETO, 1998 *apud* SILVA 2006).

No presente trabalho, o processo de urbanização, tanto no que tange ao planejamento, como no que diz respeito aos problemas ambientais, terá como cenário e objeto de pesquisa uma bacia hidrográfica urbana, na cidade de Patos de Minas. Esta cidade está situada no estado de Minas Gerais, com área urbana composta por seis bacias hidrográficas, dentre elas, a bacia hidrografia do Córrego do Monjolo.

Nessa bacia, observam-se vários problemas de ocupação humana, devido à forma de ocupação do solo, o crescimento urbano e também as características geográficas similares às da grande maioria das cidades brasileiras, que sofrem problemas de drenagem urbana. A referida bacia ainda apresenta, na sua cabeceira, áreas não ocupadas. Desta forma, podem ser simulados diversos cenários de ocupação futura dessas áreas, permitindo estimar qual forma de urbanização acarreta menores danos relacionados com alagamentos urbanos.

O Córrego do Monjolo possui um trecho de canalização a céu aberto, no eixo da Avenida Fátima Porto. Esta avenida foi criada, em 1980, para solucionar alguns problemas sanitários, devido ao fato de esta área sofrer com problemas de alagamento e de saúde pública. Esta avenida foi executada como uma medida estrutural na área urbana de Patos de Minas. A Avenida Fátima Porto está localizada próximo ao centro da cidade, mas não está inserida nele. Foi construído, próximo à referida avenida, o Centro Administrativo do Município de Patos de Minas, que propiciou a expansão urbana nesse setor da cidade.

Diante disto, o trabalho tem o objetivo geral de estimar e delimitar áreas inundáveis por meio de simulação computacional para diferentes cenários de urbanização e de precipitação na bacia do Córrego do Monjolo – Patos de Minas/MG. Além disso, como

desdobramentos do objetivo geral, serão sugeridas taxas de ocupação das áreas remanescentes, com lotes residenciais, e taxas de impermeabilização dos loteamentos, considerando o hietograma mais crítico obtido pelas distribuições de Huff. Essas taxas serão compatíveis com a capacidade de transporte do canal, de modo a minimizar a ocorrência de enchentes. Assim, espera-se avaliar os efeitos da urbanização de áreas que ainda não foram ocupadas, no que tange à possibilidade de indução enchentes por transbordamento do canal.

Desta forma, a partir da aplicação de modelos de simulação de enchentes, tem-se uma projeção de como futuros loteamentos podem ser planejados, incluindo a fixação de taxas de ocupação máximas, bem como de áreas permeáveis mínimas, para que não se atinja um cenário indesejado. Acredita-se que este estudo permitirá um conhecimento mais incisivo do comportamento hidráulico do canal, bem como do comportamento hidrológico da bacia do Córrego do Monjolo face à urbanização das suas áreas remanescentes. Com isso, espera-se criar uma ferramenta que contribuirá na redução dos problemas hidrológicos e hidráulicos existentes na cidade de Patos de Minas – MG.

Considerando os propósitos metodológicos apresentados, este trabalho será organizado em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, apresentou-se uma introdução sobre a organização e estrutura do trabalho, com vistas a uma abordagem geral e aos objetivos do estudo.

O segundo capítulo apresenta os elementos doutrinários e científicos sobre as principais conceituações que sustentam o trabalho, além de alguns estudos recentes sobre a temática. Essa temática foi estruturada relacionando os recursos hídricos e a dinâmica ambiental com o crescimento antrópico, destacando principalmente os fatores que propiciam um desequilíbrio na drenagem e o foco na propagação de enchentes.

O terceiro capítulo contempla a área de estudo, que é Bacia do Córrego do Monjolo e as características socioambientais da bacia.

O quarto capítulo apresenta a metodologia utilizada, como estrutura e as etapas dos modelos hidrológicos e hidráulicos acoplados. Além disto, serão elucidadas as maneiras de realização dos levantamentos de dados para a alimentação dos modelos.

No quinto capítulo, são apresentados resultados da simulação dos modelos hidrológicos e hidráulicos, além da determinação das áreas inundáveis e das envoltórias de enchente. Com a proposição da taxa de impermeabilização e considerando o tipo de uso do solo direcionado para as áreas da bacia que não foram ocupadas, será proposta uma ferramenta para redução de problemas hidrológicos e hidráulicos da Bacia do Córrego do Monjolo.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as considerações feitas sobre o estudo e as propostas para trabalhos futuros.

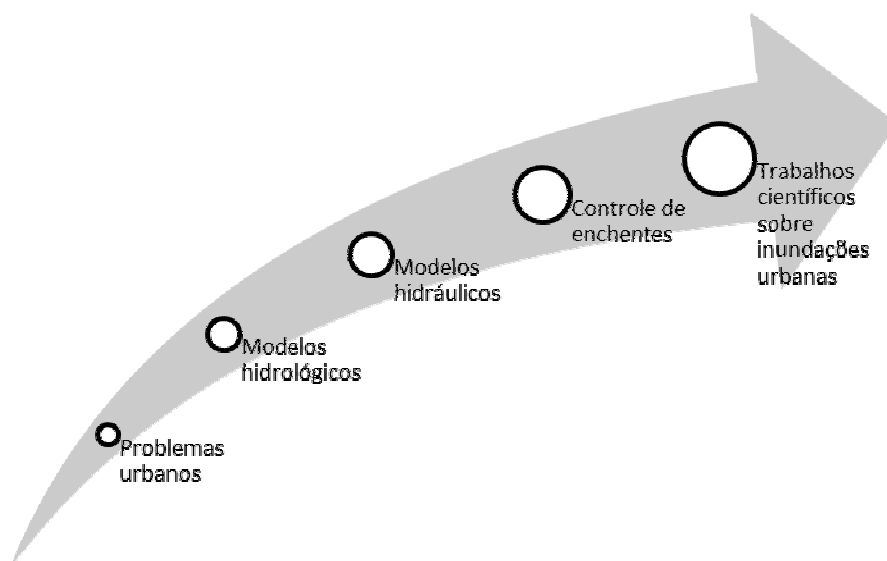
CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será tratado o referencial teórico do trabalho. Inicialmente optou-se por fazer uma contextualização sobre a influência do crescimento urbano nos recursos hídricos, para a compreensão dos problemas ambientais nas cidades. Em seguida, aborda-se sobre a legislação brasileira, com foco na organização do espaço geográfico, para entender as determinações legais da organização das cidades.

Além disso, também serão tratados os modelos hidrológicos e hidráulicos, que são tecnologias para projeções de cenários mais próximos da realidade, utilizados pelos gestores no planejamento urbano na atuação do controle de enchentes. A Figura 2.1 apresenta resumidamente os principais aspectos que fundamentam o estudo, que são os problemas urbanos das enchentes.

Figura 2.1 – Principais fundamentos do estudo.



Com isso, observa-se que é possível uma fundamentação para o desenvolvimento do estudo, com os conceitos básicos e os principais trabalhos que já foram desenvolvidos sobre o assunto. Possibilita-se, assim, a compreensão da relação dos recursos hídricos com o crescimento urbano e a aplicação dos modelos na determinação dos eventuais cenários de enchente, na busca pelo crescimento urbano sustentável e com qualidade de vida para a população.

2.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E OS RECURSOS HÍDRICOS

O processo de urbanização¹ teve uma significativa expansão com a estruturação do modo de produção capitalista, devido às bases desse processo se dar nas relações com o modo de produção, juntamente com os aspectos sócios ambientais e culturais de cada cidade. Também ocorreu uma articulação entre as cidades, formando as redes urbanas. Conforme Catelan (2006), este processo de urbanização faz uma (...) “composição da morfologia urbana da cidade conta com influências intra e interurbanas que são responsáveis, até mesmo, por definir a forma e função da cidade.” (CATELAN, 2006, p.2).

As formações internas das cidades estão instituídas nos agentes formadores do espaço urbano, que estão representados tanto nas classes dominantes como na massa e no Estado. Porém, a relação e a interação dos agentes geraram uma consolidação da urbanização, que foi um processo lento nos países desenvolvidos e um processo rápido nos países em desenvolvimento, passando por estruturação e organização com base nas leis do espaço econômico e social (SPOSITO, 2012).

Os agentes formadores agem na estruturação das grandes cidades, com modificação dos usos e funcionalidade da terra, que formam os centros das cidades, caracterizados pelo comércio, serviços, as áreas industriais e as áreas residenciais. Outros fatores que influenciam no uso do solo baseiam-se no comportamento social e cultural. De acordo com Corrêa (2005), “este complexo conjunto de usos da terra é, em realidade, a organização

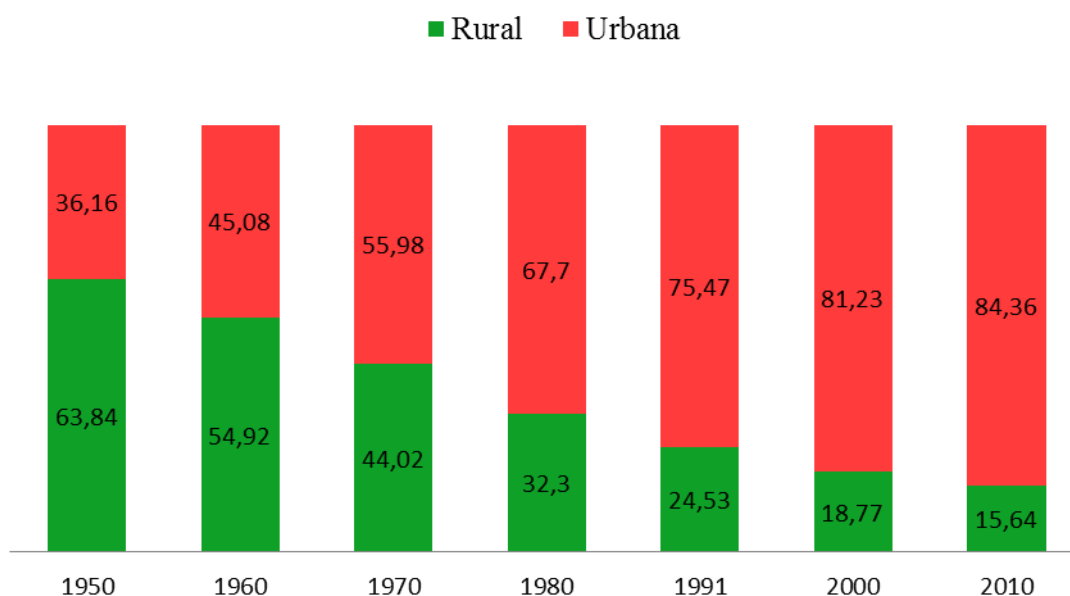
¹ Para compreender o complexo processo de urbanização e o entendimento da sociedade urbana consultar “A revolução urbana” de Henri Lefebvre.

espacial da cidade ou, simplesmente, o espaço urbano, que aparece assim como espaço fragmentado” (CORRÊA, 2005, p.7).

Com as funcionalidades dos lugares nas cidades, o valor da terra na cidade encareceu, gerando um adensamento habitacional, principalmente nas periferias, com casas pequenas e compactas. Esse adensamento originou problemas como a dificuldade de escoamento de esgoto, a falta de água limpa, a dificuldade na eliminação dos resíduos sólidos, a falta de ventilação das casas, entre outros. Além disso, também ocasionaram os problemas externos às casas como a poluição, aumento dos impactos urbanos, enchentes.

O processo de formação das cidades teve um significativo crescimento no Brasil, da década de 1970 até os dias atuais. Na década de 1970, o Brasil possuía 55,98% da população vivendo nas cidades. De acordo com o Gráfico 2.1, a população sofreu uma migração gradativa do campo para a cidade, com destaque para a década de 1970 e 2010, o último censo. Já no ano 2000, a população urbana já constava com mais de 80% da população total brasileira.

Gráfico 2.1 – População brasileira por localização de domicílio (%)



Fonte: IBGE, Censo Demográfico 1950/2010. Até 1991, dados extraídos de Estatísticas do Século XX, Rio de Janeiro : IBGE, 2007 no Anuário Estatístico do Brasil, 1993, vol 53, 1993.

Esta configuração da população no Brasil é semelhante ao processo populacional dos países em desenvolvimento. De acordo com Sposito (2012): “a segunda metade do século XX é marcada por uma urbanização acelerada nos países de economia dependente, e suas cidades manifestam todo tipo de problemas, relacionados ao “inchaço” populacional que vivem.” (SPOSITO, 2012, p.71).

Com os usos diferenciados e especializados do solo, ocorreu uma divisão social, gerando a segregação dos espaços. As áreas dotadas de boa infraestrutura foram utilizadas pelas elites, com padrões do mundo desenvolvido. E a massa trabalhadora, que sofre intensamente com o “inchaço” e a falta de serviços e equipamentos elementares, ficou com as áreas com menos infraestrutura. Diante disso, a falta de planejamento ocasiona ocupação de áreas irregulares, gerando uma série de problemas ambientais (SMOLKA, 1996).

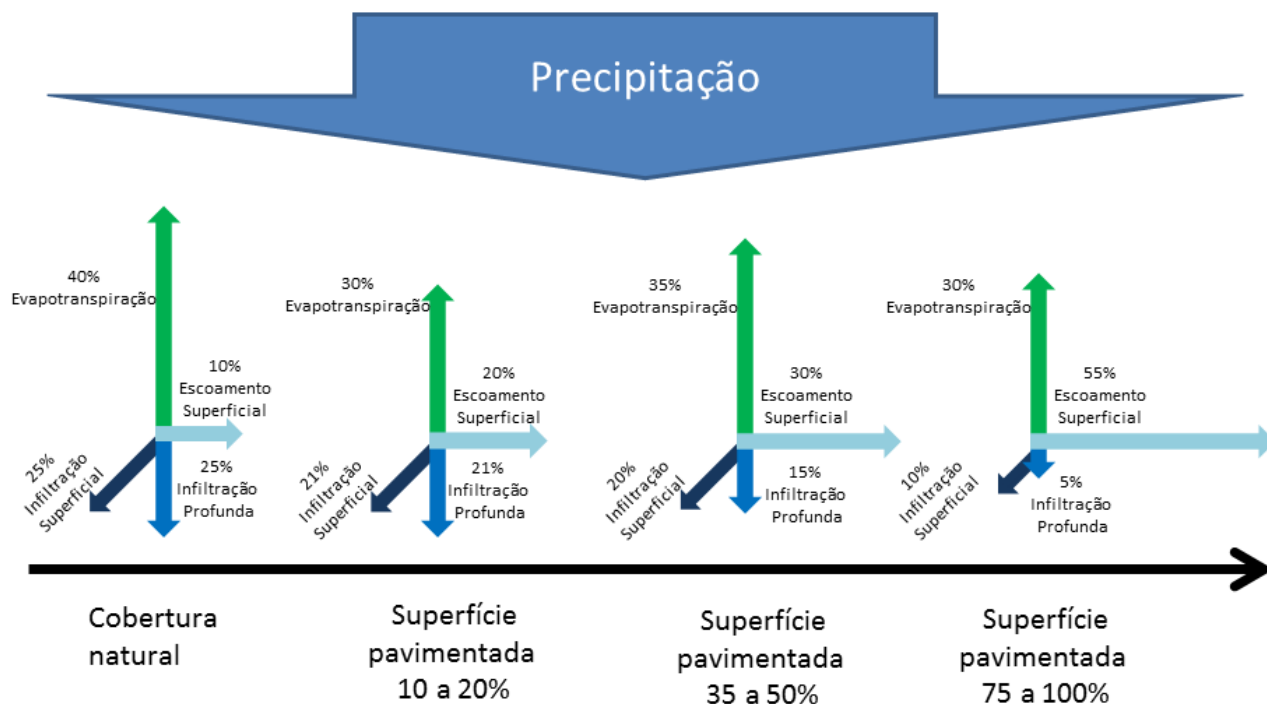
Os problemas ambientais não podem ser entendidos somente como situações de intervenções, mas também como interações no ambiente social. De acordo com Smolka (1996):

(...) problemas ambientais adquirem conotações bem complexas no contexto intra-urbano, ao mesmo tempo que problemas, aparentemente não-ambientais, assumem proporções que pouco devem à gravidade daqueles. As mortes decorrentes hoje em dia da violência urbana certamente não são menores do que as ocasionadas pelas enchentes ou deslizamentos de encostas (SMOLKA, 1996, p.141).

Com isso, percebe-se a necessidade de estudos integrados no ambiente social, com a busca pela melhoria da qualidade de vida. Para alavancar essa melhoria, é fundamental o uso adequado do solo na busca pelo equilíbrio ambiental. Mas, devido à complexidade dos problemas urbanos, este estudo contempla somente os problemas relacionados com enchentes ocasionadas pelo transbordamento de canais do sistema de macrodrenagem.

Assim, esses problemas ambientais urbanos afetam diretamente o comportamento hidrológico de bacias situadas em cidades. No caso mais específico deste trabalho, leia-se o “comportamento hidrológico” como alterações que ampliaram as vazões de escoamento superficial induzidas por eventos de precipitação. Na Figura 2.2, ilustra-se essa modificação do comportamento hidrológico com o crescimento das áreas urbanas.

Figura 2.2 – Porcentagem do comportamento hidrológico com o crescimento urbano.



Fonte: MOTA (2011) apud U.S.A. Nashville – Davison County (1973). Org: CAIXETA, 2012

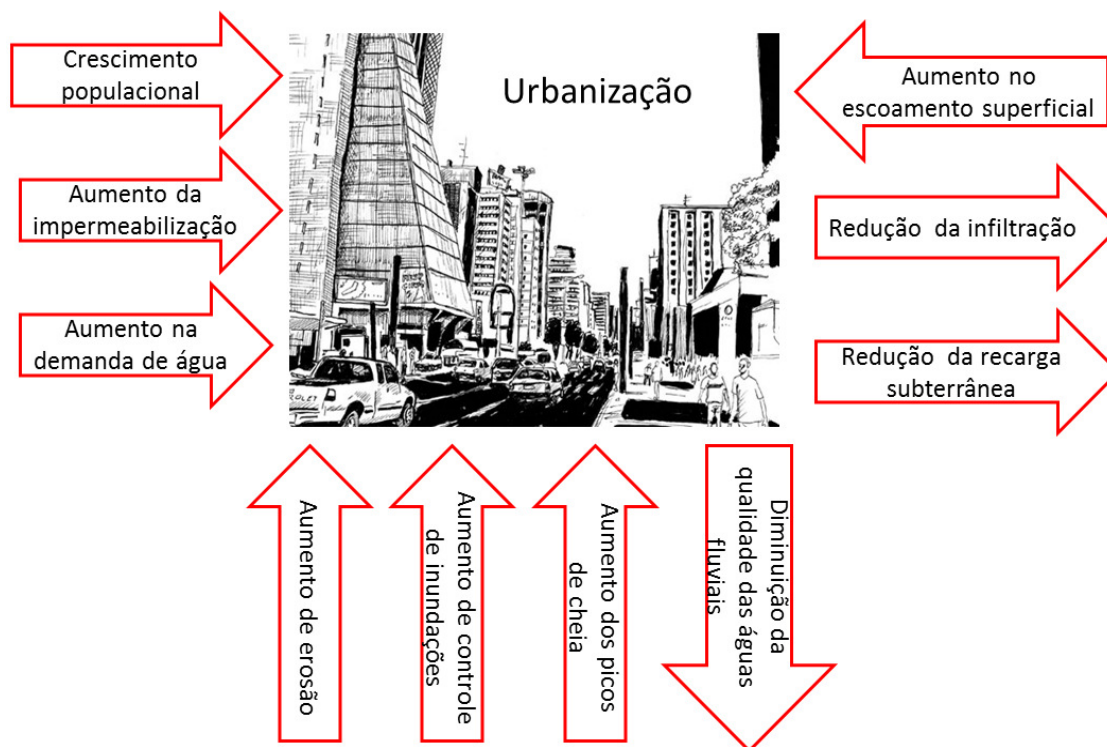
De acordo com Pinto et al. (1976), o escoamento superficial pode ser compreendido como:

(...) o movimento da água a partir da menor porção de chuva que, caindo sobre o solo saturado de umidade ou impermeável, escoar pela sua superfície, formando sucessivamente as enxurradas ou torrentes, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação (PINTO, 1976, p. 36)

O escoamento superficial é o principal elemento indutor de enchentes e de transbordamentos de cursos de água. O aumento das vazões de escoamento superficial é induzido pelo processo de urbanização que, na maioria das vezes, está associado com a impermeabilização do solo.

O escoamento superficial direto, gerado sobre a área da bacia, é direcionado para as áreas de vale (ou talvegues). Estes setores são propícios à ocorrência de inundações em função da concentração das águas nos canais urbanos, os quais nem sempre possuem capacidade de transportar grandes vazões sem que ocorra extravasamento. Desta forma, são apresentados os problemas urbanos relacionados com os recursos hídricos na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Processos urbanos nos recursos hídricos



Fonte: idéias inspiradoras.files.wordpress.com; Hall, 1984 apud TUCCI, 2009. Org: CAIXETA, 2012

O aumento da vazão do escoamento superficial gera o aumento da erosão e o crescimento do pico de cheia que provoca as enchentes. Com isso, necessita-se de medidas de controle de cheias para o controle da dinâmica ambiental. As enchentes constituem um sério problema das cidades, uma vez que a ocupação do espaço urbano foi iniciada próxima aos corpos de água. Segundo Guerra e Cunha (2011), as secas e as inundações representam cerca de 40% dos desastres naturais no mundo.

Além disso, as ocupações urbanas propiciam a alteração do escoamento superficial com a impermeabilização do solo, dificultando a infiltração. A impermeabilização do solo também ocasiona o aumento das vazões máximas e reduz o chamado tempo de concentração das bacias, fazendo com que as águas cheguem mais rapidamente aos fundos de vale. Em casos extremos, percebe-se o transbordamento da calha principal dos canais, de forma que a água passa a avançar lateralmente sobre as várzeas, também conhecidas por planícies de inundação.

Com isso, são necessárias novas obras hidráulicas para evitar inundações, escorregamentos de taludes e redução dos problemas socioambientais gerados. Nesse caso, as obras de infraestrutura urbana também esbarram no fator ocupação urbana, que dificilmente pode ser remanejada, nos transtornos das obras nas vias das cidades e na falta de espaços disponíveis.

Diante disto, é necessário um estudo hídrico relacionado com o planejamento urbano (COLOMBO, 2001). Fatores como o aumento das áreas permeáveis nos lotes, o uso de reservatórios de detenção domiciliares e a ampliação, ou pelo menos a manutenção de áreas verdes e não impermeabilizadas, constituem alternativas diferentes de grandes obras de intervenção nos canais, como os piscinões, além do alargamento e aprofundamento da calha principal.

Nas áreas urbanas, o escoamento superficial direto está vinculado ao aumento do fluxo hídrico em lotes, sarjetas, galerias e, finalmente, nos canais situados nos talwegues do terreno. O aumento do fluxo pluvial, devido à ocupação a montante, gera uma grande descarga a jusante e a ampliação do seu impacto nas cidades.

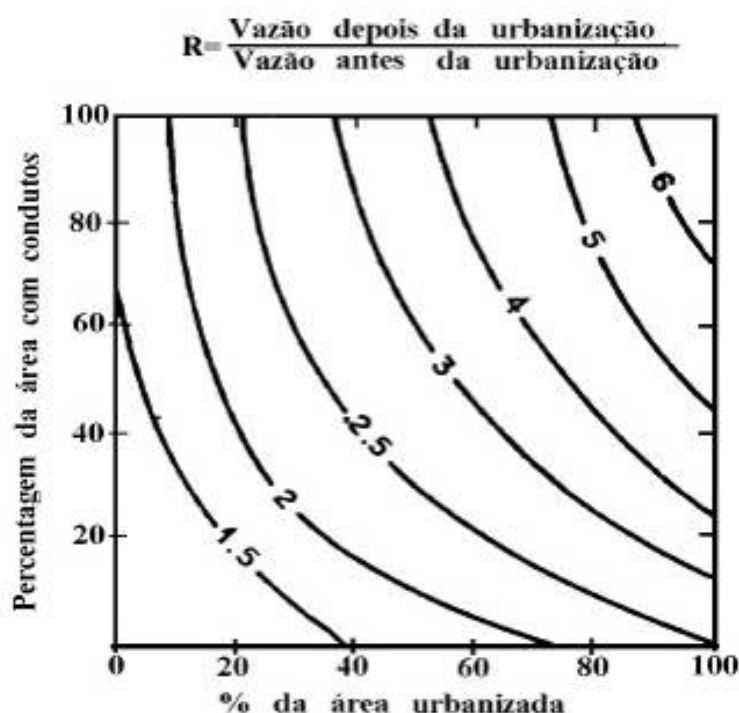
Assim, obras de drenagem situadas nas partes mais elevadas da bacia, ou no alto curso do canal urbano, tendem a ampliar as velocidades de escoamento, removendo mais rapidamente a água desses setores. Uma consequência disso é que as águas drenadas chegam mais rapidamente às áreas vizinhas ao baixo curso do canal, que passam, paulatinamente, a serem mais susceptíveis a inundações. Estas áreas ficam diretamente sujeitas a enchentes.

Outro problema das cidades, condicionado pela ocupação das planícies de inundação, é que as enchentes propiciam o carregamento de resíduos sólidos, contribuindo para a poluição do canal e para a disseminação de doenças na área afetada pelas inundações.

O mais grave impacto local da urbanização em áreas de pluviosidade normal é o desequilíbrio do regime hidrológico, caracterizado, freqüentemente, pelo rebaixamento do lençol freático em áreas elevadas e sua ascensão em áreas baixas, aterradas, efeito este acompanhado da exacerbação dos caudais torrenciais, redução das vazões, de base, contaminação dos aquíferos, poluição dos cursos d'água, erosão, assoreamento e inundações. (CARVALHO, PRANDINI, 1998, p.488).

Para compreender a proporção dos impactos da urbanização nos recursos hídricos, Tucci (2005) quantificou a variação das vazões relacionadas com o aumento da impermeabilização e da capacidade de escoamento. Na Figura 2.4, apresentam-se amplificações das vazões (em até 7 vezes).

Figura 2.4 – As curvas fornecem o valor de R, aumento da vazão média de inundação função da área impermeável e da canalização do sistema de drenagem.



Fonte: TUCCI, 2005, p. 19. *apud*: (Leopold, 1968)

Diante desses problemas ambientais urbanos, tem-se a necessidade de elaboração de planos diretores para gerenciar essas ocupações inadequadas, como, por exemplo, a proliferação de ocupações irregulares, loteamentos inadequados, poluição dos corpos de água. Sobre esse assunto, cabe ressaltar a importância de como os planos diretores propiciam a regulamentação da cidade e sua organização, levando tal observação para uma análise da Constituição Federal e demais leis pertinentes à elaboração dos planos diretores.

O processo de ordenamento territorial das cidades brasileiras foi estabelecido pela Constituição Federal de 1988, nos artigos 182 e 183. No artigo 182 da Constituição Federal, contempla-se a criação do plano diretor pelas câmaras municipais para cidades

maiores que vinte mil habitantes. Contudo, não há na Constituição Federal nada estabelecido sobre os quesitos, determinações e descrições do que é necessário ter no plano diretor. Além disso, anteriormente à Constituição Federal, foi decretado o Código das Águas, Decreto n 24.643, de 10/07/1934, que determina os usos da água em geral e suas propriedades.

Somente em 2001, para a determinação e a regulamentação das áreas urbanas, foi criado o Estatuto da Cidade, que é a Lei nº 10.257 de 2001, que com base jurídica define estratégias de gestão para o planejamento adequado das cidades, buscando o bem coletivo e o equilíbrio ambiental. O artigo 42 dessa Lei aborda o conteúdo de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grandes impactos, inundações e entre outros, no plano diretor dos municípios.

Os problemas de drenagem urbana também estão presentes na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, conforme dispõe a Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Esta lei aborda as medidas de drenagem urbana com o intuito de reduzir os impactos ambientais com a determinação de parcelamentos do solo, zoneamento urbano, mapeamento das áreas de riscos. Por essa lei, deve haver um planejamento territorial urbano.

O plano diretor também deve abordar o plano de recursos hídricos, que é determinado pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Essa Lei é a Política Nacional de Recursos Hídricos, que estabelece a regulamentação, tipo de gestão e fundamentação dos usos da água em domínio público, com valores econômicos, com a prioridade de consumo humano e dessedentação de animais. Além disso, estabelece que a bacia hidrográfica é uma unidade territorial de atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A Lei Orgânica de Patos de Minas, promulgada em 24 de maio de 1990, foi instituída para reger o município no seu ordenamento territorial, juntamente com as demais leis estaduais e federais. Dentre os artigos dessa Lei Orgânica, o art. 142 contempla a determinação dos recursos hídricos no município. Dessa forma, estabelece no inciso VII: “registrar, acompanhar e fiscalizar as repercussões das atividades de pesquisas e exploração de recursos hídricos e minerais em seu território” (Lei orgânica, 1990).

Após, a análise dos meios legais de regulamentação territorial, é necessário compreender o conceito de planejamento para poder utilizá-lo. Desta forma, Souza (2003) destaca que o conceito de planejamento pode ser entendido como:

[...] O planejamento é a preparação para a gestão futura, buscando-se evitar ou minimizar problemas e ampliar margens de manobra; e a gestão é a efetivação, ao menos em parte (pois o imprevisível e o indeterminado estão sempre presentes, o que torna a capacidade de improvisação e a flexibilidade sempre imprescindíveis, das condições que o planejamento feito no passado ajudou a construir. Longe de serem concorrentes ou intercambiáveis, planejamento e gestão são distintos e complementares (SOUZA, 2003, p. 46).

No planejamento, é fundamental que se conheça o que será planejado e se saiba qual é a realidade. Desta forma, as decisões não podem vir “de cima para baixo”, isto é, o planejador do escritório não deve fazer a ação sem conhecer o local. Ele deveria compreender o local para que o planejamento tenha um maior desempenho do seu objetivo (FERREIRA, 2002).

Elabora-se um plano simples, sistematizado e justificado, com o acompanhamento da ação, a revisão e a crítica dos resultados. O plano deve ser simples de modo que justifique os objetivos. O acompanhamento da ação deve interferir no que for necessário, localizando os erros que não foram previstos e modificando-os para chegar mais próximo aos objetivos. Levando-se em conta a complexidade do plano, quanto mais complexo menor os erros (FERREIRA, 2002).

Mas, tendo em vista as complexidades do planejamento, este trabalho utiliza a Bacia Hidrográfica como unidade de estudo de recursos hídricos, conforme regulamentado pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Com isso, há a compreensão dos fatores presentes nas bacias hidrográficas urbanas.

Segundo Botelho (1999) “o planejamento ambiental em microbacias hidrográficas exige, em função da escala de trabalho em nível local, um levantamento intenso de dados sobre a distribuição e comportamento das variáveis de análise selecionadas” (BOTELHO, 1999, p.292).

Assim, percebe-se a necessidade de uma integração entre governos para a alimentação de dados sobre as microbacias. Para ocorrer esta integração, é necessária a presença da drenagem nos planos diretores municipais. De acordo com Rezende (2012), um Plano Diretor de Drenagem Urbana tem o objetivo de planejar a distribuição da água pluvial no tempo-espaço.

Além disso, de posse dessas informações, deve determinar diretrizes para obras nas cidades, uso do solo, análise das áreas de risco. Para auxiliar na elaboração desse plano, utilizam-se ferramentas de simulação numérica para vários cenários possíveis para as áreas urbanas. Portanto, a simulação de inundações subsidia o planejamento urbano e incrementa diretrizes para o plano diretor.

O estudo de Travassos (2011) aborda as atividades dos planos em reduzir e eliminar as inundações utilizando medidas estruturais. Como exemplos há o mapeamento de risco, a restrições de edificações, a remoção de estruturas já existentes, as melhorias nas previsões e alerta para inundações, a restauração e a revitalização dos rios (TRAVASSOS, 2011, p.3).

De acordo com Catelan (2006), a população possui uma relação com o local em que vive, sendo fundamental a ação de gestão complexa nas cidades.

A maioria da população em áreas de enchentes prefere permanecer nelas, seja por falta de condições socioeconômicas, em favelas e bairros mais pobres, seja pelo apego ao lugar, em bairros mais antigos. Nos dois casos, os moradores dizem-se indignados com descaso do poder público (CATELAN, 2006, p.11).

Diante da dinâmica urbana, ocorre a necessidade de geração de novos conhecimentos que acompanhem as modificações e interações na busca pelo equilíbrio ambiental. Para Guerra e Cunha (2011), uma necessidade atual do planejamento é “(...) gerar instrumentos técnicos-científicos capazes de produzir conhecimentos necessários para a adoção de um planejamento territorial que seja socialmente justo, ecologicamente sustentável e economicamente viável” (GUERRA, CUNHA, 2011, p.48).

O Quadro 2.1 aborda as tecnologias no gerenciamento dos recursos hídricos no período de 1945 até dos dias atuais. Além disso, este quadro também faz um comparativo entre países desenvolvidos e o Brasil, relacionando-o ao contexto mundial.

Quadro 2.1 – Tecnologia no gerenciamento dos recursos hídricos

Período	Países desenvolvidos	Brasil
1945 – 1960 Crescimento industrial e populacional	<ul style="list-style-type: none"> - uso dos recursos hídricos: abastecimento, navegação, energia etc. - qualidade da água dos rios. - controle das enchentes com obras. 	<ul style="list-style-type: none"> - inventário dos recursos hídricos. - início dos empreendimentos hidroelétricos e planos de grandes sistemas.
1960 – 1970 Início da pressão ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - controle de efluentes. - medidas não estruturais para enchentes. - legislação para qualidade da água dos rios. 	<ul style="list-style-type: none"> - início da construção de grandes empreendimentos hidroelétricos. - deterioração da qualidade da água de rios e lagos próximos a centros urbanos.
1970 – 1980 Início do controle ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - legislação ambiental. - contaminação de aquíferos. - deterioração ambiental de grandes áreas metropolitanas. - controle na fonte da drenagem urbana da poluição doméstica e industrial. 	<ul style="list-style-type: none"> - ênfase em hidroelétricas e abastecimento de água. - início da pressão ambiental. - deterioração da qualidade da água dos rios, em razão do aumento da produção industrial e da concentração urbana.
1980 – 1990 Interações do ambiente global	<ul style="list-style-type: none"> - impactos climáticos globais. - preocupações com a conservação das florestas. - prevenção de desastres. - fontes pontuais e não pontuais. - poluição rural. - controle dos impactos da urbanização no ambiente. - contaminação de aquíferos 	<ul style="list-style-type: none"> - redução do investimento em hidroelétricas. - piora das condições urbanas: enchentes, qualidade de água. - fortes impactos das secas do Nordeste. - aumento de investimentos em irrigação. - legislação ambiental.
1990 – 2000 Desenvolvimento sustentável	<ul style="list-style-type: none"> - desenvolvimento sustentável. - aumento do conhecimento sobre o comportamento ambiental causado pelas atividades humanas. - controle ambiental das grandes metrópoles. - pressão para controle da emissão de gases, preservação de camada ozônio. - controle da contaminação dos aquíferos das fontes não pontuais. 	<ul style="list-style-type: none"> - legislação de recursos hídricos. - investimento no controle sanitário das grandes cidades. - aumento do impacto das enchentes urbanas. - programas de conservação dos biomas nacionais: Amazônia, Pantanal, Cerrado e Costeiro. - início da privatização dos serviços de energia e saneamento.
2000 Ênfase na água	<ul style="list-style-type: none"> - desenvolvimento da visão mundial da água. - uso integrado dos recursos hídricos. - melhora da qualidade da água das fontes difusa: rural e urbana. - busca de solução para os conflitos transfronteiriços. - desenvolvimento do gerenciamento dos recursos hídricos dentro de bases sustentáveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - avanço do desenvolvimento dos aspectos institucionais da água. - privatização do setor energético e de saneamento. - diversificação da matriz energética. - aumento da disponibilidade e água no Nordeste. - planos de drenagem urbana para as cidades.

Fonte: TUNDISI, (2011, P. 135); APUD TUCCI (2000)

Observa-se, assim, a necessidade de utilizar as novas tecnologias para melhorar planejamento urbano. Além disso, com a heterogeneidade e a complexidade dos problemas urbanos, é fundamental a utilização de cenários para previsões de realidades futuras. Para determinar os cenários mais próximos da realidade precisam-se aprofundar as tecnologias

de modificação do espaço, como a utilização de ferramentas como as medidas estruturais, e a modificação no modo de vida da população, com as ações de parcerias e interação da comunidade, como medidas não estruturais.

Tendo em vista o que foi apresentado até o presente ponto, este trabalho está baseado nos modelos hidrológicos e hidráulicos integrados. Segundo Tomaz (2002), os modelos matemáticos de hidrologia e hidráulica proporcionam a simulação de um cenário futuro com base nas variáveis atuais e suas interações com o meio. Estes modelos também são fundamentais nos prognósticos, na tentativa de prever inundações induzidas por eventuais cenários futuros de ocupação do solo urbano.

2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS PARA CHUVA-VAZÃO

Os modelos são descrições de sistemas físicos ou processos que utilizam equações matemáticas. Os modelos podem ser empíricos, probabilísticos e determinísticos. Os modelos empíricos são realizados por observações diretas resultados dos experimentos. Os modelos probabilísticos são baseados nas leis de distribuição de probabilidade e estatística para os resultados possíveis. Os modelos determinísticos possuem dados de entrada com condições iniciais em um sistema que determinam os resultados de acordo com esses dados de entrada.

O modelo utilizado neste trabalho faz uma mescla de aspectos probabilísticos, relacionados principalmente com as precipitações e sua relação com o escoamento superficial, com aspectos determinísticos, na busca pela determinação da área de enchente da Bacia do Córrego do Monjolo em Patos de Minas.

Ao realizar a modelação de cheias urbanas com a macrodrenagem, os canais, os rios, as ruas e as quadras recebem um enfoque bidimensional no plano de escoamento com a interação de variáveis e de áreas alagadas. Porém, é difícil trabalhar essas equações bidimensionais sendo adotada uma representação espacial por compartimentos, sendo sua interação realizada pelas relações matemáticas (equações unidimensionais) entre os diferentes compartimentos (MIGUEZ, 1999).

(...) os modelos são empregados apenas como uma primeira aproximação da realidade, devido à maior magnitude dos erros envolvidos decorrentes das aproximações adotadas. Finalmente, quando a realidade é muito mais complexa do que a abrangência das hipóteses adotadas para a formulação de um modelo matemático, então o emprego de um modelo matemático inadequado pode gerar conclusões duvidosas (PORTO, et.al, 1991, p.70).

Dessa forma, os modelos hidrológicos mais utilizados para o cálculo de chuva \times vazão possibilitam o estudo de análise do comportamento da bacia. O Quadro 2.2 apresenta uma síntese dos modelos de vazão de pico (modelos hidrológicos) de acordo com as necessidades área de estudo e suas características hidrológicas:

Quadro 2.2 – Síntese dos métodos de vazão de pico

Modelo	Descrição/fundamentos	Vantagens	Desvantagens
Método Racional	Cálculo da vazão do pico em pequenas áreas (1km ²). Utilizado para cálculos de bacias de detenção.	Cálculo em pequenas bacias.	Não é adequado porque a área de bacia é maior.
Método do SCS (Soil Conservation Service)	Apresenta uma média de um grande número de hidrogramas unitário.	Abrangem uma soma de hidrogramas parciais.	Este método foi desenvolvido para a duração de precipitação excedente (t_R) $\leq 0,25$ do tempo de ocorrência de pico (t_p) ou duração de precipitação excedente (t_R) $\leq 0,17$ do tempo de concentração (t_c). Restringindo os cenários para a área de estudo.
Método de Santa Bárbara	Utiliza a parcela impermeável conectada ao sistema de drenagem.	Utiliza de deflúvios para áreas impermeáveis e permeáveis, com hidrogramas instantâneos das vazões excedentes.	Foi desenvolvido na Califórnia, nos Estados Unidos.
Convolução Contínua	Utiliza função de amortecimento e uma parcela de precipitação excedente e, função do tempo.	Relacionar o coeficiente de armazenamento é igual ao inverso do tempo de concentração.	A precipitação excedente fica constante em função do tempo, isto dificulta a determinação de variação da intensidade de chuva.
Método CUHP (Método Colorado Urban Hydrograph Procedure)	Utilizado em bacias urbanas com base no comportamento de dados físicos e de precipitação.	Utiliza as áreas impermeáveis das bacias urbanas e também da extensão do talvegue. Considerado características do canal e da bacia.	As larguras características do hidrograma unitário de 50% e 75% são determinadas pelas relações empíricas de estudos realizados em Denver, nos Estados Unidos. O que descaracteriza a área de estudo.

Modelo	Descrição/fundamentos	Vantagens	Desvantagens
Método Triangular	Utilizado para cálculo de hidrogramas em bacias hidrográficas rurais e urbanas para tempestades isoladas.	Utilizado na determinação de projetos de infraestrutura. E também em projeto de pequenas barragens.	Utilização de hidrogramas direcionados para áreas urbanas.
Modelo TOPMODEL (Topography based hydrological MODEL)	É um modelo conceitual e semi-distribuído baseado no conceito varável de contribuição para a formação do escoamento superficial.	Baseado na topografia do terreno para correções.	Baseado intensamente no tipo de solo.
Modelo SHE (European Hydrological System)	Modelo criado em 1986, de base física e distribuídos.	Apresenta processos de interceptação, evapotranspiração, escoamento em zonas saturadas e não saturadas, escoamento na superfície e escoamento do canal.	O escoamento do rio é calculado por um modelo de difusão unidimensional.
Modelo TOPKAPI (Topographic Kinematic Approximation and Integration)	É um modelo distribuído e de base física. Este modelo é caracterizado pelo escoamento horizontal em um ponto do solo, próximo a abordagem da onda cinemática.	Apresenta processos de evapotranspiração, neve, água no solo e escoamento superficial do canal.	Os processos apresentados são simulados da mesma forma.

Fonte: CANHOLI (2005); PEREIRA E SALLA (2010); GARCIA E RAMOS (2007); TUCCI (2009)

O presente trabalho utilizou o Método Santa Bárbara, que propicia a obtenção dos hidrogramas em seções específicas do canal. Nesse caso, a magnitude das vazões geradas depende das características da precipitação, do tipo de solo e de sua ocupação, além de fatores fisiográficos como a declividade da bacia.

Na aplicação do Método Santa Bárbara, é necessário levantar alguns parâmetros para alimentar a simulação. De acordo com Rezende (2012) são necessários os parâmetros de entrada, que são: o passo de tempo (variação do tempo para valores de vazão) os parâmetros da bacia (área total, área permeável, tempo de concentração e CN) e parâmetros de precipitação (equação de chuva, tempo de recorrência, duração e tipo de distribuição temporal (Huff)). Estes parâmetros estão apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Parâmetros iniciais do Método Santa Bárbara



Fonte: Rezende, 2012, p.45

Com base nos parâmetros, é necessário principalmente o cálculo da equação de chuva, área total, área impermeável, tempo de concentração (t_c), chuva efetiva (*runoff*) e as variações de vazões com o tempo (hidrogramas).

Em seguida são apresentadas algumas variáveis que precisam ser levantadas, preliminarmente à aplicação do Método Santa Bárbara:

- *Equação de Chuva*

Os estudos das equações de intensidade-duração-frequência (IDF) foram significativos em âmbito mundial após a década de 1960, com as construções de mapas de intensidades de chuvas e tempos de retorno. Estes estudos tiveram, principalmente, influência nos Estados Unidos com a reprodução destes mapas em manuais e livros didáticos. Também ocorreu, em outros países, essa disseminação dos conhecimentos das equações de chuvas para estudos de recursos hídricos.

As equações de chuva IDF (equação 2.1) são caracterizadas pela distribuição temporal das precipitações intensas de uma determinada região. Sua construção baseia-se no ajuste de

uma distribuição estatística a uma série de precipitações diárias máximas, registradas em cada ano. Hoje em dia, a aplicação destas equações é fundamental para análise e projeções de eventos extremos, principalmente na hidrologia, e cruciais para projetos de obras hidráulicas. As equações IDF apresentam, em geral, a seguinte forma básica:

$$i = \frac{A \cdot T_r^B}{(t + C)^D} \quad \text{Em que: } A, B, C, D \text{ são parâmetros a serem obtidos por calibração} \quad (2.1)$$

Para uma boa determinação da relação da intensidade, duração e frequência (inverso do tempo de retorno) é necessária uma base de dados da série histórica anuais, diárias ou parciais de chuvas intensas de representativos locais a serem analisados. A utilização das séries parciais é recomendada quando a série histórica é pequena (<12 anos) e os tempo de retorno inferiores a 5 anos. Para a utilização das séries anuais, é necessária uma série histórica maior e variados tempos de retorno (TUCCI, 2009). No caso específico do presente trabalho, utilizou-se uma série de dados históricos anuais.

Desta forma, com base no histórico pluviométrico do Município de Patos de Minas e nas características da área de estudo, de acordo com Righetto (1998) *apud* Francischet e Alamy Filho (2011), na construção da equação IDF com as precipitações máximas, o método de Gumbel é um dos mais adequados, uma vez que o referido método realiza a estimativa da precipitação máxima para um tempo de recorrência previsto. Também para Kevin e White (2004), o método de Gumbel apresenta valores extremos de distribuição na análise estatística dos dados hidrológicos, que é fundamental para o desenvolvimento do estudo em questão.

- *Tempo de Concentração (t_c)*

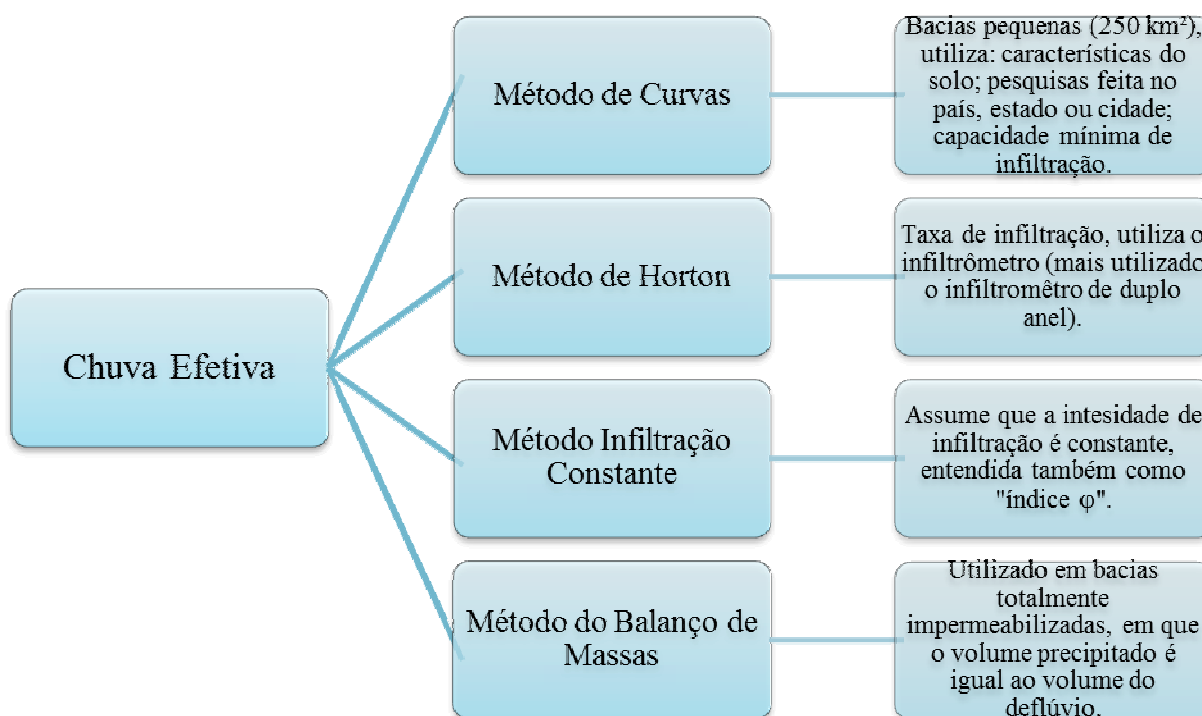
De acordo com Tucci (2009) o tempo de concentração pode ser compreendido como o “tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia, descola-se até a seção principal.” Também nos estudos de hidrograma “este tempo é definido também como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma” (TUCCI, 2009, p. 394).

De acordo com Canholi (2005), para bacias urbanas, o cálculo do tempo de concentração deve ser criterioso devido ao fato da maioria dos métodos serem realizados para bacias rurais. O método de Germano e o método de SCS utilizam, no cálculo do tempo de concentração, áreas impermeáveis e parâmetros vinculados ao uso e ocupação do solo. Em função destas características, que são bastante influentes e heterogêneas nas cidades, estes dois métodos são bastante aplicáveis no estudo de enchentes ribeirinhas urbanas.

- *Chuva Efetiva*

O cálculo da chuva efetiva (*runoff*) consiste na quantificação, geralmente em milímetros, da fração de precipitação que se transforma em escoamento superficial direto em uma determinada área de contribuição. Segundo Tomaz (2002), são quatro os métodos principais utilizados na estimativa da chuva efetiva. A Figura 2.6 apresenta os métodos e suas principais características:

Figura 2.6 – Métodos para a estimativa da chuva efetiva



Fonte: TOMAZ, 2002, P. 11-213, CANHOLI, 2005, P.87

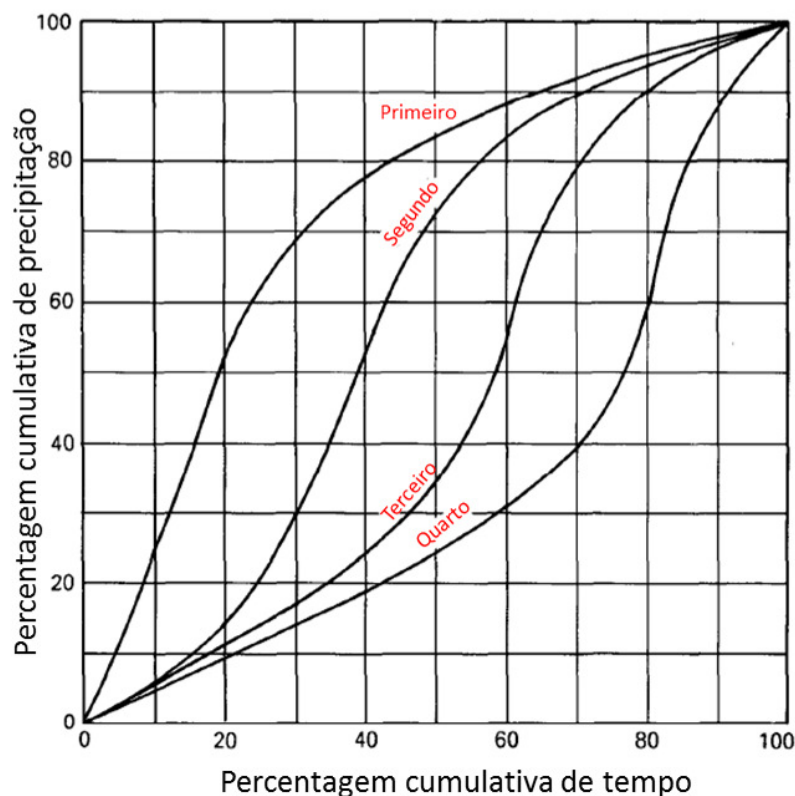
De acordo com Mello (2003), os modelos devem se ajustar às realidades locais para que o erro seja reduzido, mas obedecendo a algumas variáveis de referência para realizar as

estimativas. Com base na realidade local, o presente trabalho optou pelo método de curvas, tendo em vista as proporções da área de estudo, o conhecimento do uso e tipo de solo, além da possibilidade de vincular esta metodologia ao cálculo do tempo de concentração da bacia. Pelo fato deste método associar o uso e ocupação do solo com um parâmetro numérico denominado curva número (CN), ficam facilitadas as entradas de dados para simulações referentes a inundações decorrentes de ocupações de áreas atualmente livres.

- *Distribuição Temporal da Chuva*

As chuvas que ocorrem sobre determinada área de contribuição apresentam distribuições temporais das mais diversas. O gráfico que relaciona a distribuição da precipitação com o tempo é denominado hietograma. Assim, diferentes hietogramas de entrada nos modelos, condicionam hidrogramas desiguais, com diferentes picos de cheia nos canais. No presente trabalho, optou-se pela aplicação das distribuições de Huff, com 50% de probabilidade (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Quadris do método de Huff



Fonte: HUFF, 1990, p.15. Adaptado: CAIXETA, 2012

Este método foi desenvolvido nos Estados Unidos para a obtenção da distribuição temporal de precipitação, com base na análise empírica de tempestades em estações pluviográficas, gerando a relação de percentis do total da precipitação com percentis de duração total, sendo agrupadas em quatro quadris (PINHEIRO E NEGHETTINI, 1998).

Para Huff, as chuvas são agrupadas em quatro curvas, de acordo com seu tempo de distribuição. Na Figura 2.7, apresenta-se a curva da média de distribuição de chuva para cada quadril. Por exemplo, as curvas do primeiro quadril representam tormentas cujos maiores volumes de água são descarregados em até 25% da duração. Para as chuvas do quarto quadril, os maiores volumes são despejados no final da tormenta, após decorridos 75% de sua duração.

Após todos os cálculos das variáveis dos parâmetros, pode-se observar que há uma base para alimentar o modelo hidrológico. Porém, é necessário compreender a escolha desses modelos, devido à extensa quantidade de metodologias aplicadas em estudos de recursos hídricos. No presente trabalho, os resultados dos modelos hidrológicos servem como dados de entrada dos modelos hidráulicos.

2.3 MODELOS HIDRAÚLICOS

No âmbito do presente trabalho, os modelos hidráulicos são utilizados para a análise da propagação de cheias no canal. No estudo hidráulico de canais, há os elementos essenciais do perfil que são o fundo do canal, a superfície da água e a linha do gradiente de energia (GRIBBIN, 2009).

Os modelos hidráulicos podem ser compreendidos como as utilizações de equações de transferência de fluidos em um sistema. De maneira distinta dos modelos hidrológicos, que ainda carecem de consideráveis contribuições estocásticas, os modelos hidráulicos tendem a ser mais deterministas, sendo fundamentados em princípios físicos consistentes, como a Conservação de Massa e a Segunda Lei de Newton, mas complementados por algumas informações empíricas. Conforme o grau de simplificação imposto a estas equações há diferentes modelos que, segundo Campos (2009), podem ser:

Quadro 2.3 – Síntese dos Modelos Hidráulicos

Modelos	Características	Equações Básicas
Modelos de armazenamento	Baseados nas equações da continuidade e relação entre vazão liberada e volume acumulado no corpo de água.	$S = K[XI^n + (1 - X)O^n]$ sendo, K= constante de armazenamento; X= fator de ponderação; I= vazão afluente; O= volumes acumulados; n= parâmetro empírico.
Modelos da onda cinemática	Baseados suposição de que a linha de energia apresenta a mesma declividade de fundo do canal.	$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} = q_L$ sendo, $Q = \alpha A^m$ A= área da seção transversal de escoamento; Q= vazão escoada; t= tempo; x= distância de origem; q_L = vazão de contribuição lateral por unidade de comprimento; α e m = parâmetros empíricos do modelo.
Modelos de difusão	Utilizam a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento sem os termos de inércia. Porém incorpora termos de segunda ordem nas derivadas parciais.	$\frac{\partial y}{\partial x} + c \frac{\partial h}{\partial x} = i + v_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ sendo, c= celeridade de referência para a onda de difusão; v_h = difusividade hidráulica.
Modelos hidrodinâmicos	Utilizam as equações completas de Saint Venant, sem simplificações.	$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L$ $\frac{\partial Q}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x}}_{\text{Inércia}} + \underbrace{g.A.\frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{pressão}} = \underbrace{g.A.S_0}_{\text{gravidade}} - \underbrace{g.A.S_1}_{\text{atrito}}$ sendo, y é a profundidade; S_0 é a declividade do fundo; S_1 é a declividade da linha de energia; g é a aceleração da gravidade;

Fonte: CAMPOS, 2009

Além disso, é necessário o conhecimento de elementos básicos da geometria do canal, o tipo do escoamento e a seção para a compreensão do comportamento hidráulico do canal. Estes elementos são o perímetro molhado (P_m), área molhada (A_m) e o raio hidráulico (R_h), que é a relação entre a área molhada e o perímetro molhado. Já o comportamento do escoamento pode ser caracterizado pelo número de Froude (Fr), sendo o escoamento subcrítico ($Fr < 1$), supercrítico ($Fr > 1$) e crítico ($Fr = 1$).

As rugosidades das paredes, tanto de fundo quanto laterais, também constituem importantes parâmetros para os modelos hidráulicos. Por exemplo, paredes muito rugosas exercem mais resistência ao escoamento, ocasionando, em geral, escoamentos com maior profundidade. É conveniente citar que não é somente a rugosidade que interfere na profundidade do escoamento, haja vista que fatores como a declividade do canal, bem como a vazão transportada, também são determinantes para a altura da lâmina de água.

No caso específico do presente trabalho, o modelo hidráulico a ser aplicado destina-se ao cálculo do escoamento da água na calha principal do canal e na planície de inundação. O modelo hidráulico deve ser alimentado pelos resultados do modelo hidrológico. Assim, este último fornece vazões que afluem ao canal principal. Os modelos hidráulicos fundamentam-se na equação da continuidade e na equação de quantidade de movimento.

Assim, no cálculo da propagação de cheias, podem-se utilizar diferentes modelos que são resolvidos por métodos numéricos. Para estimar a propagação de cheia em canais e rios, utilizam-se modelos hidrodinâmicos, que estão baseados nas características físicas do rio e variação temporal das vazões de cheia. De acordo com Pontes (2010), todos os modelos hidrodinâmicos simplificados servem para caracterizar a planície de inundação. Em geral, à medida que os modelos tendem abordar mais parâmetros, os métodos de solução matemática também tendem a evoluir no grau de dificuldade.

2.4 DRENAGEM URBANA E CONTROLE DE ENCHENTES

O conceito de drenagem urbana pode ser compreendido, de acordo com Tucci (2009), como um conjunto de medidas para gerenciar o escoamento superficial gerado pelas águas pluviais, com o objetivo de minimizar os riscos de enchentes.

A drenagem urbana sofre modificações com a interação entre o relevo, as edificações, a elevação do terreno para passagem de vias públicas, com a presença de galerias e com as canalizações e retificações de cursos de água. Estes últimos elementos são decorrentes da ação antrópica sobre o meio. Nesse sentido, o escoamento superficial pode ser modificado quando se tem, por exemplo, a construção de vias, fator que propicia um novo direcionamento para as águas pluviais.

Para Braga (1997), os problemas fundamentais relativos à drenagem urbana dos países tardiamente desenvolvidos ocorrem por causa de uma rápida expansão da população urbana. Somado a essa expansão, há o baixo nível de sensibilização da população a respeito da temática e a ausência de um planejamento estratégico estrutural no sistema de controle das cheias dos rios.

Além disso, também ocorreu um processo de modificação nas obras de infraestrutura com o conceito conservacionista (canalização) com a função de remoção rápida do escoamento com o aumento da área impermeável, gerando um aumento significativo do pico das enchentes, principalmente a jusante. Este conceito também pode ser chamado de “clássico”, de acordo com Souza (2007), e foi desenvolvido no século XIX baseado no princípio do higienismo buscando a evacuação rápida da água.

Porém, nas últimas décadas, também vem sendo utilizado o conceito de reservação, com a contenção temporária das águas pluviais, para subsequente liberação, evitando os picos de enchentes. Este conceito também é apontado por Souza (2007) como uma tecnologia alternativa e compensatória na busca de neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos.

No crescimento rápido da urbanização brasileira, considera-se a drenagem um fator fundamental no sistema ambiental urbano. Conforme já foi comentado anteriormente, a ocupação humana propicia a impermeabilização das bacias. Com isto, os volumes de águas pluviais, que antes se infiltravam, passam a ser transferidos para o escoamento superficial direto, sobrecarregando o sistema de macrodrenagem natural, constituído pelos canais situados nos talwegues (COLOMBO, 2001).

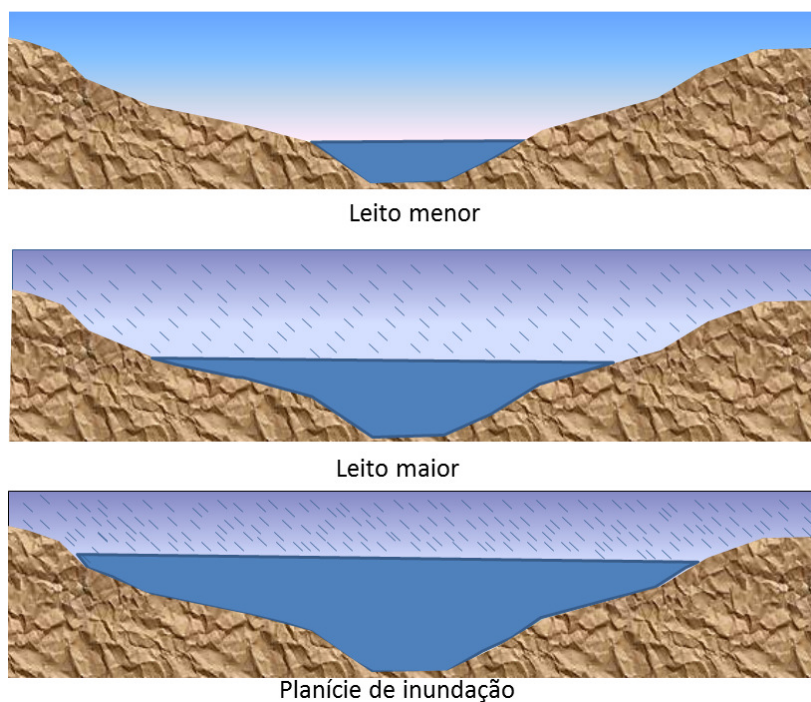
Para determinar a magnitude da drenagem urbana, são utilizadas diferentes metodologias. Porém, é necessário o conhecimento da área e da topografia da bacia, da rede de drenagem, das vazões afluentes, equação de inundação (com base no cálculo dos períodos de recorrência das inundações) e o uso do solo para realizar principalmente a relação com a cota altimétrica alcançada pelas águas do rio em função do seu nível (FERRAZ, 1998).

Um problema da quantificação da drenagem urbana é a aquisição de dados confiáveis, por causa das dificuldades de coletas e armazenamento de dados durante anos e a sua correlação com outras variáveis. Estes propiciam a aplicação de diferentes métodos e modelos hidrológicos para que se possa ter uma comparação de resultado, reduzindo o erro e aumentando a confiabilidade.

Além disso, é fundamental a diferenciação da macrodrenagem e microdrenagem, devido a ambas influenciarem diretamente nos canais urbanos. A macrodrenagem é compreendida pela drenagem de vazões mais significativas de sub-bacias da ordem de km². A microdrenagem é compreendida com pequenas vazões pluviais, com as vias, sarjetas, bocas de lobo e galerias.

Estudos de macrodrenagem também compreendem a previsão de inundações ribeirinhas, que podem ser verificadas quando o rio passa do seu leito menor para o leito maior, atingindo a planície de inundação (Figura 2.8). Nas áreas urbanas, quando o leito maior e a planície de inundação estão ocupados pelas edificações, as enchentes provocam problemas ambientais, econômicos e sociais.

Figura 2.8 – Áreas da macrodrenagem.



Esses problemas já elencados, de acordo com Tucci (2009), demonstram que o rio no período das chuvas tende a ocupar o seu leito maior e, em eventos de máximos de chuva, pode atingir a sua planície de inundação, como resultado de um processo natural, que possui um tempo de recorrência com uma média normalmente superior a dois anos (TUCCI, 2009).

Porém, é necessária a diferenciação entre os termos conhecidos como enchentes e inundações. Nas enchentes, o rio atinge o seu leito maior, que é até a altura máxima de suas margens. Na inundação, o rio transborda as margens até ocupar toda a sua planície de inundação (MARTINS, 2012).

Com o intuito de determinar setores propícios a enchentes e a relação de um equilíbrio ambiental nas cidades, utilizam-se os modelos matemáticos. Esses modelos são ferramentas cruciais para o planejamento urbano e para a atuação de medidas quantitativas nos planos diretores das cidades, uma vez que vem crescendo, no Brasil, a criação desses planos.

Para organização territorial, há as ações dos gestores com o controle de enchentes. O controle de inundações tem o objetivo de mitigar, monitorar e controlar a dinâmica hídrica de uma bacia urbana. De acordo com Canholi (2005), as medidas de controle podem ser divididas em estruturais e não estruturais. As estruturais abordam obras de infraestrutura no espaço urbano. As não-estruturais contemplam ações na sociedade para sensibilização sobre a temática.

Além disso, também se tem o processo de evolução das obras de controle de enchentes, conforme o nível de infraestrutura urbana da cidade e o desenvolvimento das medidas estruturais e não estruturais. Na Figura 2.9, apresenta-se este processo de evolução baseado nos países desenvolvidos que passaram por este processo. Inicialmente tem-se a necessidade do controle de enchentes, seguido pela recreação e paisagismo das áreas que anteriormente eram problemas ambientais urbanos. Num estágio seguinte, ocorre o controle de qualidade da água para que o local tenha uma qualidade de vida e, por fim, há a revitalização dos mananciais urbanos.

Figura 2.9 – Evolução de obras de retenção em centros urbanos.



Fonte: CANHOLI, 2005, p.36

- **Medidas Estruturais**

As medidas estruturais são compreendidas pela modificação na área urbana com a criação de obras para mitigar ou prevenir problemas com enchentes. Essas medidas podem ser classificadas como intensivas e extensivas. As medidas intensivas estão relacionadas diretamente com o canal, como, por exemplo, as obras de aceleração do escoamento, canalização e obras correlatas, retardamento do fluxo, entre outros (CANHOLI, 2005).

As medidas extensivas estão relacionadas com pequenos armazenamentos na bacia para retardamento ou contenção do escoamento superficial. Como, por exemplo, a recomposição de cobertura vegetal, o controle de erosão e a recomposição da bacia de drenagem. No Quadro 2.4, apresenta-se uma síntese das medidas estruturais:

Quadro 2.4 – Síntese das medidas estruturais extensivas

Medidas extensivas (pequenos armazenamentos)			
Medidas	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Cobertura vegetal	Redução do pico de cheia	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias
Controle de perda	Reduz assoreamento	Impraticável para grandes áreas	Pequenas bacias

Fonte: CANHOLI (2005); TUCCI (2009).

No Quadro 2.5, apresentam-se as medidas estruturais intensivas:

Quadro 2.5 – Síntese das medidas estruturais intensivas

Medidas intensivas			
Medidas	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
<i>Aceleração do escoamento (mudanças de canal)</i>			
Caminho da cheia	Amortecimento de volume	Depende da topografia.	Grandes bacias.
Desvios	Reduz vazão do canal principal.	Depende da topografia.	Bacias médias e grandes.
<i>Retardamento do fluxo (reservatórios)</i>			
Todos os reservatórios	Controle a jusante.	Localização difícil.	Bacias Intermediárias.
Reservatórios com comportas	Mais eficiente com o mesmo volume.	Vulnerável a erros humanos.	Projetos de usos múltiplos.
Reservatórios para cheias	Operação com o mínimo de perdas.	Custo não partilhado.	Restrito ao controle de enchentes.
<i>Melhoria do canal</i>			
Redução da rugosidade por desobstrução.	Aumento da vazão com pouco investimento.	Efeito localizado	Pequenos rios.
Corte de meandro	Amplia a área protegida e acelera o escoamento	Impacto negativo em rios com fundo aluvionar.	Área de inundação estreita.
<i>Desvio do escoamento (diques e polders)</i>			
Diques e polders.	Alto grau de proteção de uma área.	Danos significativos caso falhe.	Grandes rios.

Fonte: CANHOLI (2005); TUCCI (2009).

Assim, pode-se afirmar que as medidas estruturais são opções que os gestores utilizam no planejamento urbano de acordo com as necessidades do crescimento das cidades.

- ***Medidas Não-Estruturais***

As medidas não estruturais são aquelas em que se procura reduzir os danos ou as consequências das inundações, não por meio de obras. Ao contrário, essas medidas não-estruturais procuram pela introdução de normas, regulamentos e programas que visem, por exemplo, ao disciplinamento do uso e ocupação do solo, à implementação de sistemas de alerta e à conscientização da população para a manutenção dos dispositivos de drenagem.

No Quadro 2.6, apresentam-se as principais características de medidas não-estruturais para evitar enchentes:

Quadro 2.6 – Medidas não-estruturais para evitar enchentes

Medida	Características
Regulamentação do uso da terra ou zoneamento de áreas inundáveis.	Cotas no zoneamento de acordo com o grau de risco de enchente.
Construção à prova de enchente.	Conjuntos de medidas para reforçar e adequar os prédios situados nas áreas de várzeas.
Seguro	Proteção econômica para perdas eventuais ocasionadas pelas enchentes.
Previsão e alerta	Um sistema composto por aquisição de dados em tempo real e transmissão de informações integrado com a Defesa Civil.

Fonte: TUCCI (2009).

No plano diretor da macrodrenagem, deve-se considerar que a drenagem é um fenômeno de abordagem regional: a unidade de gerenciamento é a bacia hidrográfica. Fazendo parte da infraestrutura urbana, seu planejamento deve ser multidisciplinar e compatibilizado com os outros planos e projetos dos demais serviços públicos, principalmente voltados à gestão das águas urbanas, incluindo o abastecimento público e os esgotos sanitários (CANHOLI, 2005).

2.5 ALGUNS TRABALHOS CIENTÍFICOS SOBRE SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÕES DE ÁREAS RIBEIRINHAS, DEVIDO À URBANIZAÇÃO

De acordo com Tucci (2005), há dois processos de inundações nas áreas urbanas, os quais podem ocorrer isolados ou associados. O primeiro tipo são as inundações de áreas ribeirinhas, caracterizadas como fenômenos naturais de cheias que atingem o leito maior do rio ou a planície de inundação. O outro processo são as inundações devido à urbanização. Esta forma de ocupação do espaço é marcada pela impermeabilização do solo, redução do tempo de concentração das bacias urbanas, eventuais canalização do escoamento e obstruções de canais, portanto, nas cidades há tendência de aumentar a velocidade do escoamento das águas pluviais e diminuir da infiltração.

Para realizar esta diferenciação é necessário um estudo complexo para a determinação da fonte da inundação. No entanto, não é o foco deste trabalho determinar as fontes das inundações.

Sobre as simulações de enchentes em áreas urbanas, verificou-se que Liu et al (2012) utilizaram o sistema de Modelos Regional Hidrológico (Regional Hydrologic Modelling System – RHMS), com base na equação de fluxo de canal e assimilação progressiva dos dados de vazão, propiciando a restrição da estimativa do escoamento superficial. Este estudo foi realizado na sub-bacia de Huaihe, no oeste da China. Para melhorar a modelagem de inundação, utilizam-se os dados de vazão observados no rio Huaihe com três estações de vazões.

Para melhorar os valores obtidos na aplicação dos métodos, aplicaram-se diferentes métodos para a mesma área. Ou seja, ao comparar os valores obtidos por meio dos diferentes métodos, identifica-se qual é melhor para determinada área de inundação. Os impactos da inundação podem ser limitados pelo uso da terra ou pelo tipo de construção.

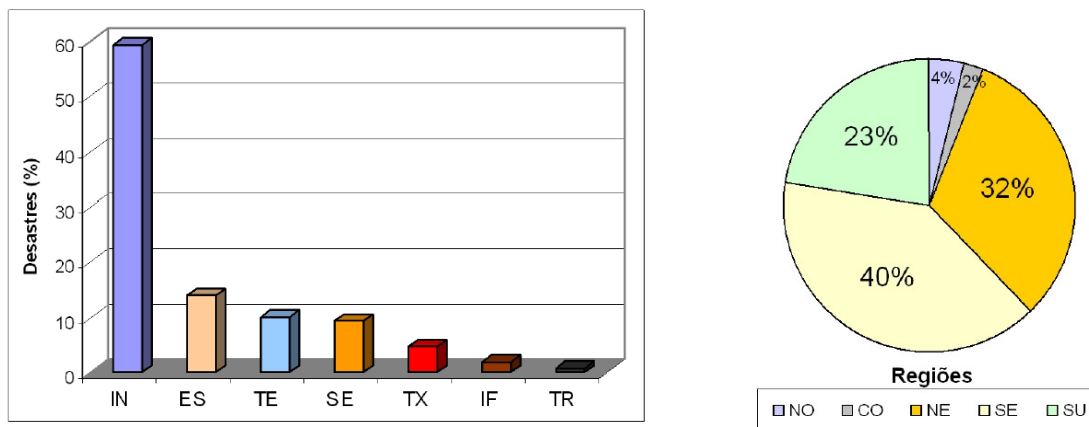
Schubert et al (2012) apresentaram a utilização de quatro métodos na edificação para modelos instáveis e multidimensionais no fluxo das águas urbanas. O primeiro modelo é a resistência da construção (BR), bloco de construção (BB), o furo de construção (BH) e construção de porosidade (PA). Os métodos são aplicados em Baldwin Hills (Los Angeles). Os autores concluíram que os quatro métodos são capazes de prever a extensão da inundação e vazão, usando unicamente malhas não estruturadas para explorar os pontos fortes de cada abordagem.

Já Hostache et al (2010) utilizaram os sensores de radar das inundações do Rio Mosel, localizado entre a França e a Alemanha. A determinação da inundação baseou-se nos níveis de água, utilizando imagens de alta resolução e o revestimento do canal em áreas homogêneas, com um erro de aproximadamente 40 cm de profundidade. Para o modelo hidráulico, adotaram o método 4D-var, derivado dos níveis de água.

Porém, ao utilizar os sensores remotos, percebe-se que não é possível determinar os picos de cheia diretamente. Entretanto, este estudo contribui para dados e informações espaciais, melhorando os parâmetros dos níveis de água e as características do canal em um modelo de inundação.

No caso brasileiro, as enchentes também possuem destaque entre os desastres naturais. A Região Sudeste apresentou, no período de 1900 a 2006, 40% total desastres naturais ocorridos no país (Figura 2.10).

Figura 2.10: Distribuição brasileira de desastres naturais ocorridos no período de 1900-2006



Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestade, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal, VU – Vulcanismo, TR – Terremoto e RE – Ressaca. Fonte: Marcelino (2007).

Legenda: NO – Norte, CO – Centro Oeste, NE – Nordeste, SE – Sudeste, SU – Sul. Fonte: Marcelino (2007).

Os estudos brasileiros sobre enchentes contemplam diferentes metodologias para determinar as proporções e os impactos deste fenômeno no território nacional. Ressalta-se que Suleiman e Barbassa (2005) desenvolveram um modelo de propagação de enchentes empregando as equações completas de *Saint Venant*, discretizadas pelo método de diferenças finitas de MacCormack (difícil de determinar a condição de estabilidade, que é a condição de Courant) utilizando ferramentas computacionais na determinação das áreas de maior ou menor risco de ocorrência de enchentes. Este modelo foi aplicado no município de Ribeirão Preto, localizado no Estado de São Paulo. Tal estudo possibilitou calcular vazões, velocidades e lâminas em quaisquer tempos e em todas as seções do canal.

Além disso, o modelo pode ser caracterizado, principalmente, por não limitar os dados de entrada, reajustar o passo de tempo com estabilidade numérica e na propagação hidrodinâmica no qual se apresentou estável, variando a declividade com tendência a escoamento supercrítico. No entanto, uma fragilidade do modelo é a dependência do levantamento topográfico (SULEIMAN; BARBASSA, 2005).

Paz (2010) defende que a modelagem matemática é a ferramenta ideal para prever os sistemas hidrológicos de grande escala. Com isto, este autor apresentou um sistema computacional de simulação composto pelo acoplamento de um modelo hidrodinâmico 1D, aplicado na calha principal dos rios e, um modelo de 2D, aplicado as inundações na planície. Para a realização da simulação, é necessária a discretização da planície, a topografia e a diferença de níveis de água. Esta simulação foi realizada para a Bacia do Alto Paraguai, no período de 11 anos e 4 meses, com resultados obtidos satisfatoriamente para o regime de vazões, variação de nível de água e áreas inundadas.

Para a visualização da quantificação das enchentes, Berti Sarlas (2008) utilizou mapas de inundação para definir áreas com risco para o zoneamento urbano. Este estudo foi realizado para a cidade de Santa Rita do Sapucaí, localizada no estado de Minas Gerais, a qual sofre problemas de enchentes há mais de 100 anos. O método utilizado na elaboração da mancha de inundação foi o processo de interpolação do vizinho mais próximo. Isto é, este autor usou dados sobre o histórico das cheias, levantamento da altimetria e do sistema de drenagem de Santa Rita do Sapucaí para gerar as manchas de inundação, variando o tempo de recorrência. Assim, determinou um estudo para incorporar no plano diretor da cidade de forma a promover a prevenção de inundações.

Rezende (2011) também determinou manchas de enchentes com o intuito de agregar valores ao plano diretor da cidade de Rio Verde (GO), porém com uma metodologia numérica dotada, principalmente, dos modelos hidrológicos e hidráulicos. O modelo hidrológico na geração de hidrogramas (Método Santa Bárbara) contempla as características da sub-bacia.

Neste estudo também se utilizou a discretização da sub-bacia para a alimentação do modelo hidráulico de propagação das vazões nos canais. Para obter as áreas inundadas, estabeleceram-se as simulações dos modelos hidrológicos e hidráulicos acoplados, gerando as estimativas de manchas de inundação. Com isto, a autora constatou que, nas simulações, as áreas de cabeceiras foram as zonas mais inundáveis, que possuem terrenos mais planos e com pequenas larguras na calha principal. Porém, ao aumentar o tempo de retorno, comprovou-se que ocorre a presença das inundações também a jusante do canal.

Além de abordar as inundações, Rezende (2011) também trabalhou com a proposição de cenários de impermeabilização, que é uma ferramenta importante para a tomada de decisão, principalmente, para gestores públicos.

Bazzan (2011) abordou o mapeamento de área de inundação, direcionando o risco e a vulnerabilidade da planície do Rio dos Sinos, na cidade de São Leopoldo, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para a realização deste trabalho, o autor utilizou quatro etapas: o levantamento, processamento dos dados, análise e integração das informações cartográficas. Trabalhou-se com dados das cotas fluviométricas, no período de 1980 a 2009, além de outros parâmetros como cota altimétrica, séries históricas de enchentes e da precipitação. Para determinar o mapa das áreas de suscetibilidade à inundação, realizou-se a correlação dos mapas de hipsometria, declividade, áreas inundáveis e limites de inundações.

Um destaque desta metodologia é a determinação das áreas inundáveis. Estas áreas foram determinadas de acordo com gráficos interpretativos e representativos da série histórica das inundações ocorridas entre o período dos anos de 1980 e 2009. Isto foi possível de acordo com a pesquisa documental dos dados históricos da ocorrência das inundações, conforme o ano, mês e os bairros atingidos. Assim, constatou-se que dos treze bairros localizados na planície, seis apresentam ocorrência de inundações, sendo que três deles possuem uma situação crítica de risco e vulnerabilidade (BAZZAN, 2011).

Também é fundamental pensar sobre a inundação inserida no espaço urbano. De acordo com Martins (2012), ao analisar a inundação inserida na macrodrenagem urbana, é necessário o aumento dos parâmetros para a alimentação dos modelos. Com isto, o autor realizou o levantamento dos parâmetros da macrodrenagem, por meio de técnicas de geoprocessamento, para a alimentação do modelo hidrológico computacional EESC (já existente para a Bacia do Córrego Gregóri, em São Carlos – SP). Desta forma, obtiveram-se diferenças consideráveis nos valores de vazão de pico (33,96%), tempo de pico (77,78%) e volume total de escoamento (29,86%).

A partir desta revisão bibliográfica, constatou-se, portanto, que são utilizadas diferentes metodologias para a análise das inundações. Além disso, nas áreas urbanas, estes métodos auxiliam no planejamento urbano e na busca de melhor e mais adequada ocupação do solo.

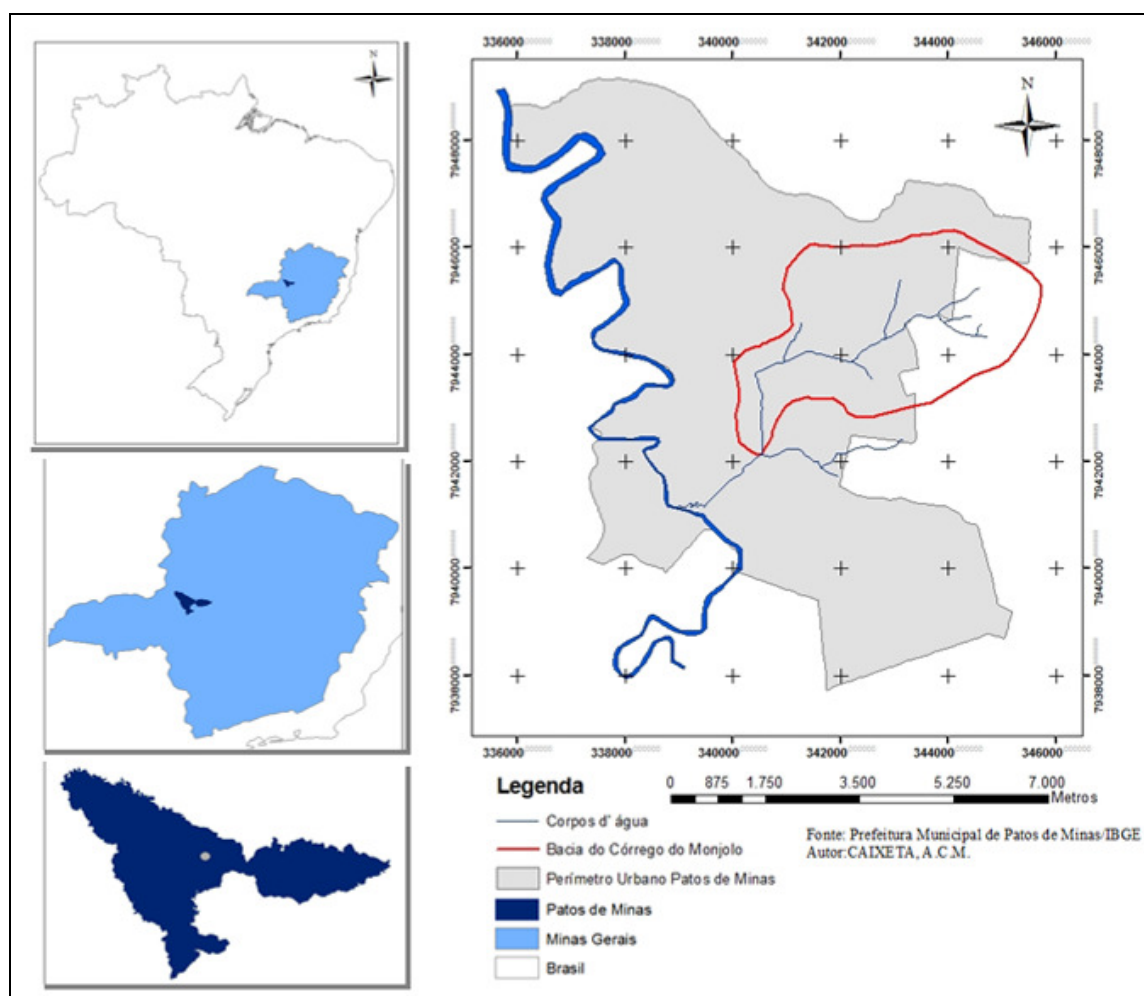
Assim, após a compreensão da formação das enchentes, é necessário focar na área de estudo, objeto do presente trabalho, que é a Bacia do Córrego do Monjolo na área urbana de Patos de Minas. Esta temática é contemplada no próximo capítulo com as características de sua formação e elementos relevantes para a formulação do estudo.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa é a Bacia do Córrego do Monjolo (Figura 3.1), situada no município de Patos de Minas. A Bacia está localizada na periferia da cidade de Patos de Minas.

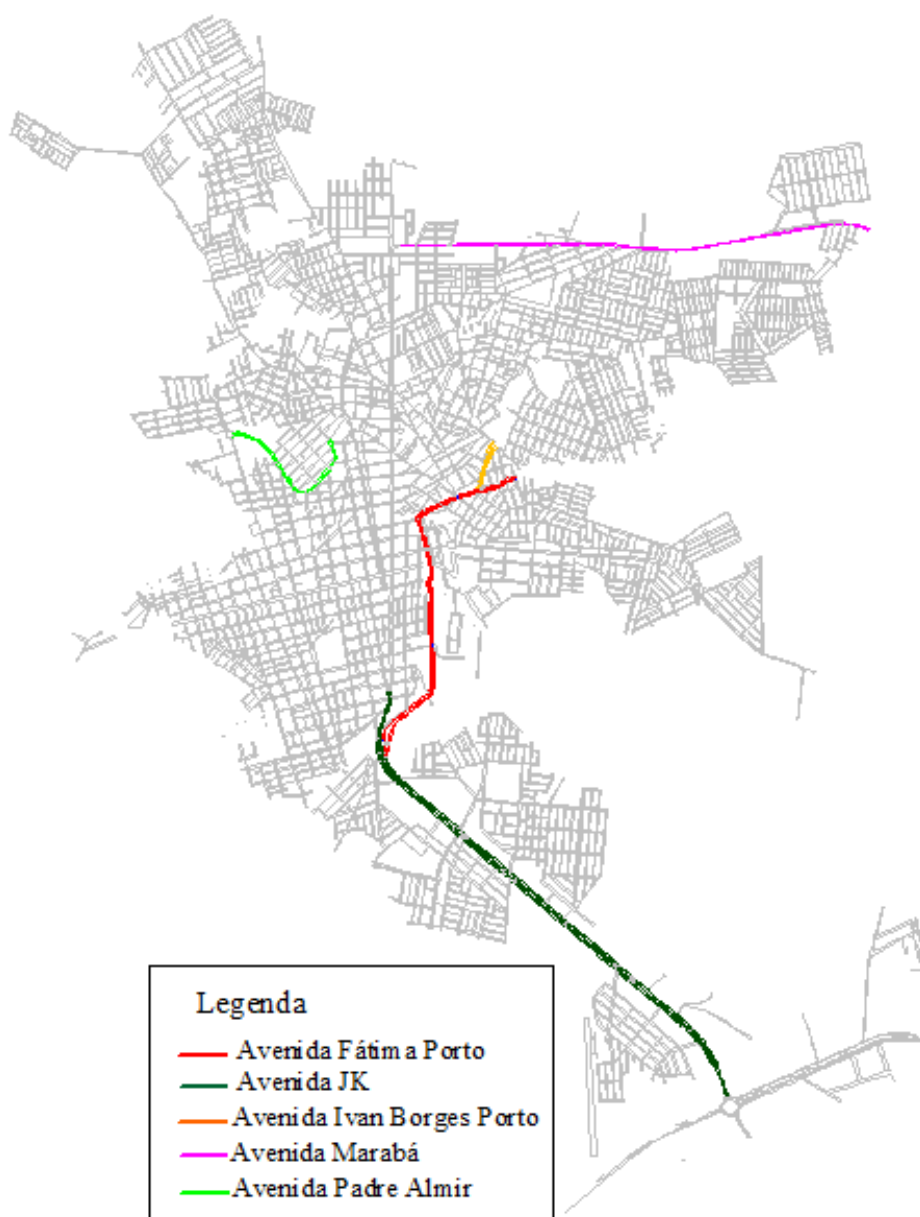
Figura 3.1 – Mapa de localização da Bacia do Córrego do Monjolo, 2011



Fonte: Prefeitura Municipal de Patos de Minas/IBGE. Org: CAIXETA, 2012.

Sobre este estudo, é importante considerar que a Cidade de Patos de Minas possui problemas de macrodrenagem e microdrenagem em diferentes setores, como nas regiões da Avenida Padre Almir e da Avenida Fátima Porto (Figura 3.2). Nesse sentido, destaca-se que a Bacia do Córrego do Monjolo, vem apresentando problemas recorrentes de inundações em diferentes pontos, principalmente na junção da Avenida Ivan Borges Porto com a Avenida Fátima Porto.

Figura 3.2 – Avenidas importantes para o estudo na malha urbana de Patos de Minas



Sobre a cidade de Patos de Minas está localizada no interior do Estado de Minas Gerais, com sua formação e crescimento resultante do processo de ocupação do interior do Brasil. Atualmente, possui características de uma cidade com relevância regional, que consolida um crescimento urbano gradual, que não ocorre em uma pequena cidade e também não possui o rápido crescimento das grandes metrópoles.

Em seguida, devem-se apresentar características dos aspectos socioeconômicas para a compreensão do crescimento urbano da cidade, que afeta os corpos de água urbanos e os aspectos geográficos que interferem na dinâmica hídrica da bacia e nos fatores geográficos. Diante desta caracterização social e física da área de estudo, há compreensão da dinâmica no local que influencia indiretamente na bacia. Após isto, o presente trabalho destaca as especificidades da bacia e os elementos relevantes para o estudo das enchentes.

3.1 PATOS DE MINAS ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A população da cidade de Patos de Minas atingiu, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 133.111 habitantes em 2007. No último senso, no ano de 2010, obteve-se o número de 132.332 habitantes. Houve um decréscimo de 779 habitantes, apesar da Prefeitura Municipal de Patos de Minas (PMPM) ter contabilizado a população com 138.710 habitantes. Diante desse conflito, tem-se a análise do seu crescimento nas décadas de 1990 e 2010, acompanhando o fluxo migratório do país (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Evolução Populacional do Brasil, Minas Gerais e Patos de Minas.

Ano	Brasil	Minas Gerais	Patos de Minas
1991	146825475	15743152	102946
1996	156032944	16567989	112384
2000	169799170	17891494	123881
2007	183987291	19273506	133054
2010	185712713	19159260	138710

Fonte: IBGE e PMPM. Org.: CAIXETA, 2011.

A economia do município tem seus alicerces na agropecuária e na agroindústria, com um considerável desenvolvimento por meio dos incentivos do Governo Federal na ocupação

do interior do Brasil, sobretudo os que ocorreram na década de 1970. A agricultura do município é caracterizada pela diversidade com a produção de grãos e hortifrutigranjeiros. De acordo com a realidade local e com os dados da cidade, os produtos em destaque são: o milho, arroz, soja, feijão, café, maracujá, tomate e horticultura (PREFEITURA MUNICIPAL DE PATOS DE MINAS, 2010).

Um marco na economia de Patos de Minas foi a descoberta da jazida de fosfato, no ano de 1974. Conforme Mello (1980):

Tal importância desta descoberta que, em 14 de fevereiro de 1977, a partir da decisão tomada em reunião do Conselho do Desenvolvimento Econômico, presidida pelo Presidente Ernesto Geisel (que visitara as jazidas fosfáticas de Rocinha em 24 de maio de 1975), em 2 de fevereiro de 1977, organizou-se a Fertilizantes Fosfatados S. A. – FOSFÉTIL – destinada ao aproveitamento da jazida de rocha fosfática de Patos de Minas. Tem a sede em nossa cidade e, efetivamente, começou suas operações em 1 de agosto de 1977. (MELLO, 1980, p. 07)

A pecuária também é uma base na economia, com a produção de leite, através da cooperativa local e das empresas privadas, e também com o gado de corte. O município é considerado destaque na genética suína, que possui 70% da tecnologia nacional em melhoramentos suínos (PREFEITURA MUNICIPAL DE PATOS DE MINAS, 2010).

Embora o destaque da economia do município esteja no setor agropecuário, de acordo com a Tabela 3.2, observa-se que o PIB tem o seu maior índice na prestação de serviços:

Tabela 3.2 – PIB *per capita* do Município de Patos de Minas (2009)

SETOR	Quantidade
Valor adicionado na agropecuária	233.585 mil reais
Valor adicionado na Indústria	291.275 mil reais
Valor adicionado no Serviço	1.056.036 mil reais
Total setor PIB	1.580.896 mil reais
PIB per capita	12.405,63 reais

Fonte: Produto Interno Bruto dos Municípios (2009). Fonte: IBGE, em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA. Organização: CAIXETA, 2011

Além disso, a economia de Patos de Minas pode ser caracterizada tendo em vista o seu crescimento populacional e a expansão da cidade. De acordo com Marçal (2005), Patos de

Minas teve seu crescimento populacional com base nos movimentos migratórios e nos Programas Governamentais.

Desta forma, a caracterização econômica atual permite entender como a cidade de Patos de Minas foi estruturada e o seu crescimento urbano. Mas, é importante ressaltar que a sua origem² ocorreu no período do processo de ocupação do interior do Brasil tendo uma expansão considerável no período de exploração das minas.

Ao longo dos anos, o arraial no entorno na igreja foi expandindo até se tornar a cidade de Patos de Minas. O processo de urbanização da cidade de Patos de Minas foi mais significativo após a década de 1930, quando o crescimento urbano teve o aumento com a instalação do hospital regional e também com a migração de empresas para a cidade. Junto com esse crescimento, houve a criação do primeiro terminal rodoviário, que está situado na borda da bacia do Córrego do Monjolo (MPPM, 2011). Nota-se, a partir daí, o significativo surgimento da ocupação da bacia analisada neste trabalho.

Um marco para o crescimento da cidade foi a localização da jazida de fosfato, conforme já foi mencionado, que na sua exploração propiciou incrementos na infraestrutura urbana. Além disso, também ocorreu a chegada de indústrias e empresas. Dentre as obras de infraestrutura, foi realizada a pavimentação da Avenida Sanitária, com a retificação do canal que delineia o Córrego do Monjolo.

Devido à expansão urbana na bacia do Córrego do Monjolo, na área ainda atraída pela proximidade com o Mercado Municipal, houve a construção da Biblioteca Municipal João XXIII e de alguns comércios. Além disso, o entorno do Parque Municipal do Mocambo, pertencente à bacia em questão, é uma área residencial que vem sendo edificada gradualmente.

² Para compreender o processo de formação da cidade de Patos de Minas ler “*Patos de Minas, meu bem querer*” de Oliveira Mello.

3.2 PATOS DE MINAS ASPECTOS GEOGRÁFICOS

O relevo do Município de Patos de Minas é composto por altitude média de 815 m e inserido no Planalto Central Minas/Goiás. O ponto mais alto do Município tem cerca de 1.178 metros de altitude, localizado na Serra do Pântano, na divisa com o Município de Coromandel. A altitude mais baixa é de 750 metros, na várzea do Rio Paranaíba, extremo noroeste (MELLO, 2008).

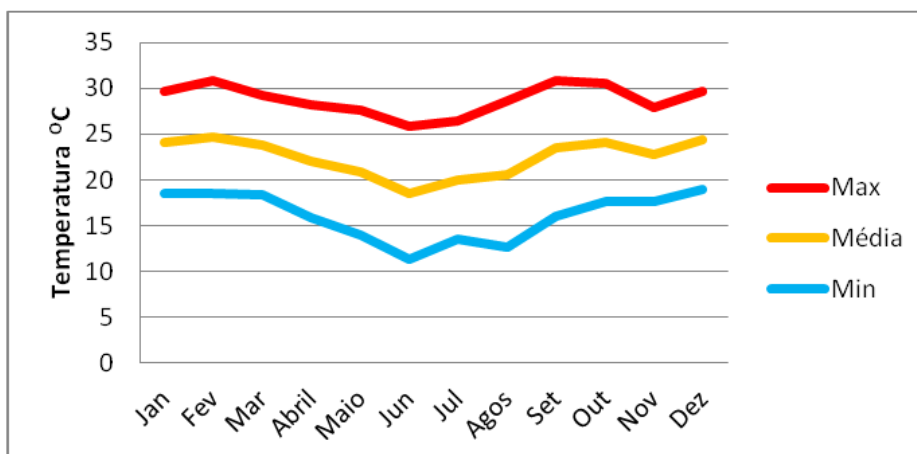
A formação geológica da região é a Formação Ibiá e a Formação Mata da Corda (material piroclástico e tufitos, com altos teores de ferro), formada no período cretáceo com produtos em decomposição das rochas. Também, em algumas áreas com a mesma formação, podem-se encontrar produtos da decomposição das rochas, com provável contribuição de materiais provenientes do intemperismo de rochas (siltitos, ardósias, calcários e dolomitos) da Formação Paraopeba, do Grupo Bambuí (Neoproterozóico) (VII RCC, 2005).

Nos topos de chapadas e nas margens próximas aos cursos de água, tem-se a Formação Geológica de Cobertura de Detrito-Lateríticas, provindas da alteração dos sedimentos supracitados, com provável contribuição de matérias provenientes do intemperismo de tufitos e conglomerados cineríticos da Formação Mata da Corda (Cretáceo), afetados por intenso concrecionamento (VII RCC, 2005).

O clima é caracterizado como tropical, com verão quente e úmido, com chuvas que se iniciam nos meses de setembro e outubro, e vão até os meses de março e abril. O inverno é seco, com temperaturas amenas, iniciando-se entre março e abril e estendendo-se até setembro e outubro. A temperatura média anual é de 21,2° C, com a mínima média de 16,6° C e a máxima média de 28,6°C (MELLO, 1982).

De acordo com o Gráfico 3.1, no ano de 2010, foram levantadas as variações de temperatura. Nota-se que o período de novembro a fevereiro possui as maiores temperaturas; no período de março a maio, ocorre uma redução nas temperaturas; no período de junho a agosto, há temperaturas amenas; e no período de setembro e outubro, verifica-se crescimento das temperaturas.

Gráfico 3.1 – Temperaturas de Patos de Minas no ano de 2010.



Fonte: INMET.

A classificação climática do modelo de Köppen (1846-1940) é adotada para estudos de solo em Minas Gerais. Segundo Ayoade (2004), a classificação da área de estudo de acordo com o modelo de Köppen (1846-1940) é clima Cwa, que significa o “C”, Clima temperados Chuvosos e quentes, “w” chuva de verão e o verão quente. “a” mês mais quente tem temperatura média maior do que 22°C (AYOADE,p.233, 2004).

A vegetação do município é caracterizada por matas, cerrados, campos e áreas de cultivo. As matas que ainda restam são encontradas próximas ao rio Paranaíba, visto que o cerrado está sendo utilizado para área de cultivo e de pastagem. Desta forma, com a degradação da flora e da fauna, estas áreas acabaram sendo prejudicadas, havendo, por exemplo, a extinção da onça pintada (MELLO, 1982).

A bacia que envolve a cidade de Patos de Minas é a do Rio Paranaíba, que nasce no Município de Rio Paranaíba, na Serra da Mata da Corda (altitude de 1.170 metros) e integra a Bacia do Paraná. Porém, o município também faz parte de outra bacia que é a Bacia do São Francisco, sendo esta uma das principais bacias brasileiras (MELLO, 2008).

O Rio Paranaíba abastece a cidade de Patos de Minas, além de ser o principal receptor dos esgotos gerados na zona urbana. Outros elementos da sua hidrografia são os córregos que passam pelo interior da cidade, o Córrego do Monjolo e o Córrego da Cadeia, além da Lagoa Grande e da Lagoinha (MELLO, 2008).

3.3 PATOS DE MINAS E A BACIA DO CÓRREGO DO MONJOLO

A ocupação urbana da Bacia do Córrego do Monjolo ocorre próxima do centro da cidade. Entretanto, os bairros no entorno do Córrego do Monjolo são considerados periferia. Os setores de ocupação urbana que margeiam o canal sofrem com as enchentes no período da chuva, ocasionando doenças e problema de saúde pública.

No entendimento da dinâmica hídrica da Bacia do Córrego do Monjolo, é fundamental caracterizar suas principais variáveis: a área, a forma, declividade da bacia, declividade do curso de água. A área da Bacia do Córrego do Monjolo é de 14,20 km². A rede de drenagem da bacia é a dendrítica e retilínea, semelhante a um galho de árvore e ocorre em substratos homogêneos como cristalino ou sequência de sedimentares.

Uma obra de infraestrutura significativa no leito do córrego foi realizada na década de 1980, com a criação da Avenida Sanitária. Esta obra tinha o intuito de levar infraestrutura para a periferia da cidade e solucionar problemas já elencados. Assim, propiciou-se um direcionamento da ocupação urbana ultrapassando as margens do Córrego do Monjolo.

O projeto de criação da Avenida Sanitária foi realizado pela Elenge Engenharia, de Belo Horizonte, juntamente com a Prefeitura Municipal de Patos de Minas, no ano de 1986. A viabilização da obra inicialmente foi realizada pelo Município e depois pelo Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais (BDMG), no período de gestão de três prefeitos.

O traçado pelo talvegue do Córrego do Monjolo consistiu em uma canalização a céu aberto. Além disto, ocorreu o detalhamento do projeto com os estudos hidrológicos (para evitar enchentes), topográficos, canalização, projeto geométrico, micro-drenagem, interceptores, especificações técnicas entre outros aspectos, para que a obra tivesse mais segurança e evitasse problemas futuros (PMPM, 2008).

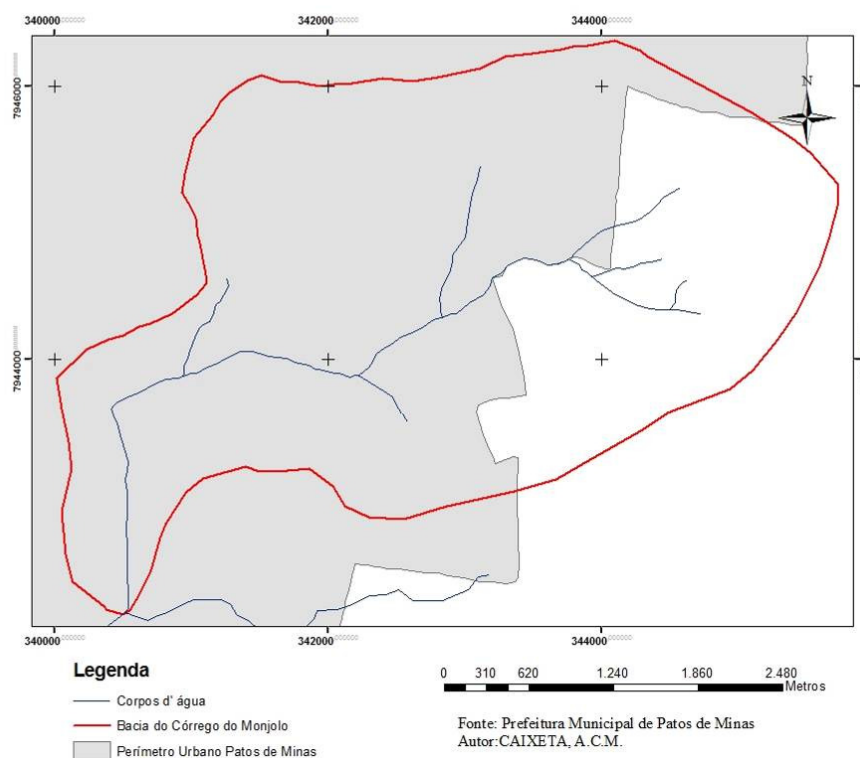
Também tinha-se uma preocupação com a canalização do esgoto dos bairros do entorno, a partir da implantação de interceptores debaixo da Avenida Sanitária, impedindo que os esgotos fossem diretamente lançados no córrego. Porém, com o crescimento urbano e com a proximidade do leito do Córrego do Monjolo ao centro da Cidade de Patos de Minas, a

rápida construção dos bairros no entorno do Córrego não foi realizada com interceptores. Com isso, o esgoto dos novos bairros foi lançado diretamente no corpo de água. A poluição do córrego não foi provisionada no projeto. Assim, não houve um planejamento em longo prazo, visto que, com a expansão urbana de Patos de Minas, a canalização foi realizada de maneira parcial por trechos, devido ao alto custo da obra.

Esta Avenida Sanitária passou a ser denominada Avenida Fátima Porto. Trata-se de uma via de grande extensão, com 2900 metros de comprimento inseridos na área de canalização aberta do Córrego do Monjolo, cruzando três diferentes bairros: Antônio Caixeta, Jardim Andradas e Cidade Jardim. Esta é a principal via de acesso rápido dos bairros do entorno do leito do Córrego do Monjolo ao centro da cidade e os principais pontos comerciais.

Com a edificação da infraestrutura da cidade e com o crescimento urbano, ocorreu a modificação no planejamento urbano local e a denominação de algumas ruas. O perímetro urbano da Cidade de Patos de Minas está inserido parcialmente na bacia do Córrego do Monjolo, porém, a montante da bacia, ainda há áreas que não foram ocupadas, o que possibilita um crescimento potencial da urbanização neste sentido (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Localização da Bacia do Córrego do Monjolo no perímetro urbano de Patos de Minas.



Na interseção da Avenida Fátima Porto com a Avenida JK, ocorreu uma alteração natural do terreno, para a construção do aterro sob a Avenida JK. Nesse local, o greide da pista ficou situado acima do terreno natural. Assim, o Córrego do Monjolo é canalizado por um bueiro (tubulação curta) que propicia a passagem do curso de água debaixo do aterro da Avenida JK.

Esta obra propiciou também um direcionamento do escoamento do córrego para uma seção transversal estrangulada em virtude da presença do bueiro (Figura 3.4). Estes estrangulamentos constituem importantes singularidades que influenciam no comportamento hidráulico, ou seja, em alterações nas profundidades de água do canal.

Figura 3.4 – Estrangulamento no cruzamento das Avenidas Fátima Porto com a JK.



Fonte: CAIXETA, 2008

Ao longo da Avenida Fátima Porto, tem-se um elevado grau de impermeabilização do solo, devido ao fato dela estar próxima do centro da cidade e ligando o bairro central aos bairros já elencados. A ocupação urbana na área (Figuras 3.5 e 3.6) ocorreu principalmente com a proliferação de estabelecimentos comerciais ao longo da Avenida Fátima Porto, por ser esta uma via arterial de fluxo rápido. Além disso, o crescimento também foi verificado com a construção de residências, nas vias paralelas à Avenida. Como exemplo, há a presença de prédios na Figura 3.6 que não estão presentes na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Ocupação urbana na Bacia do Córrego do Monjolo no entorno da Avenida Fátima Porto no ano de 2008.



Fonte: CAIXETA, 2008

Figura 3.6 – Ocupação urbana na Bacia do Córrego do Monjolo no entorno da Avenida Fátima Porto no ano de 2012.



Fonte: CAIXETA, 2012

Outro elemento da ocupação urbana da área é o aumento do escoamento superficial e a redução na infiltração, que vem induzindo a ocorrência de enchentes em alguns trechos do córrego. No cruzamento da Avenida Fátima Porto com a Avenida Ivan Borges Porto (Figura 3.7) já foi verificado o descolamento do revestimento asfáltico provocado pelo cisalhamento gerado pelas elevadas velocidades do escoamento superficial direto sobre a via.

Figura 3.7 – Avenida Ivan Borges com a retirada do asfalto pela chuva.



Fonte: CAIXETA, 2012

Na Avenida Ivan Borges Porto, há uma afluição caracterizada por pequena canalização fechada que veicula as águas provenientes das nascentes que correm no Parque Municipal do Mocambo. Porém, a canalização em 2012 sofreu reforma para reduzir os problemas de macrodrenagem e microdrenagem no afluente do Córrego do Monjolo. A Figura 3.8 ilustra a reforma no canal que também retangular.

Figura 3.8 – Reforma no Córrego Caixa d'água no centro da Avenida Ivan Borges. Este córrego despeja suas águas no trecho urbano do Córrego do Monjolo



Fonte: CAIXETA, 2012

Além disso, percebe-se a necessidade de medidas para que se tenha a redução do lançamento de resíduos sólidos e da produção de sedimentos, os quais obstruem escoamento da água pluvial para o canal central e não evitando problemas urbanos e principalmente as enchentes. A Figura 3.9 apresenta um uma boca de lobo com sedimentos na Avenida Ivan Borges, sendo este problema de microdrenagem que afeta diretamente a macrodrenagem.

Figura 3.9 – Boca de lobo com sedimentos na Avenida Ivan Borges.



Fonte: CAIXETA, 2012

Além disso, o Parque do Mocambo, criado na década de 1990 (Figura 3.10), possui nascentes, uma área de mata nativa, quadras e áreas de lazer. Mas, com a desativação das piscinas e a retirada dos animais ocorreu a falta de atrativos do parque o que reduziu os seus frequentadores. Com o menor fluxo de pessoas frequentando essa região do parque e com a presença de áreas verdes, gerou-se o aumento da criminalidade.

Figura 3.10 – Parque do Mocambo.



Fonte: CAIXETA, 2008

Porém, com a transferência do Conservatório Municipal de Patos de Minas, em março de 2012, para um edifício construído no interior do Parque Municipal do Mocambo, percebe-se um processo de revitalização do parque com atrativos de lazer e recreação para a população.

Tendo em vista a expansão da ocupação urbana da cidade, o Parque do Mocambo é uma área fundamental para a infiltração das águas da Bacia do Córrego do Monjolo e para a preservação da mata nativa, fatores que reduzem a geração de escoamento superficial. Porém, o parque também sofre com forte escoamento superficial no período chuvoso possibilitando o carreamento de sedimentos. Conforme Rocha (2012), do jornal local Patos Hoje, “enxurrada leva calçada e abre enorme buraco no Parque Municipal do Mocambo” (ROCHA, 2012)

Importante ressaltar que o início da Avenida Fátima Porto não possui uma avenida arterial, até 2012, como a Avenida JK e sim um prédio abandonado. Porém, iniciou-se a implantação de uma Avenida (Figura 3.11) à direita do Córrego do Monjolo (no sentido de montante para jusante). Esta avenida ocupa parcialmente a área de preservação permanente (APP), mas, como a área está no perímetro urbano, a legislação brasileira possibilita essa intervenção, de acordo com a Lei nº 4771/1965, o Código Florestal Brasileiro, segundo seu Art. 2º:

Parágrafo único. No caso de áreas urbanas, assim entendidas as compreendidas nos perímetros urbanos definidos por lei municipal e nas regiões metropolitanas e aglomerações urbanas, em todo o território abrangido, observar-se-á o disposto nos respectivos planos diretores e leis de uso do solo, respeitados os princípios e limite a que se refere este artigo (Lei nº 4.771/1965, Art. 2º).

Em 2012 foi implantado o prolongamento da Avenida Fátima Porto. No trecho do prolongamento da Avenida, suas duas pistas passaram a margear um lado do Córrego, favorecendo o crescimento da ocupação urbana em direção à cabeceira da bacia. Na figura 3.11-a, percebe-se o prolongamento da avenida à esquerda, que é o início apresentado na Figura 3.11-b, com o corte da vertente.

Figura 3.11 – Início da edificação da Avenida a esquerda do Córrego do Monjolo

a -Vista de topo Google Earth



b - vista Frontal.



. Fonte: GOOGLE EARTH, CAIXETA, 2011

Na realização da obra de prolongamento da Avenida Fátima Porto, o córrego passa da área central da avenida para sua margem, o que se percebe que a Avenida passa a ficar na mata ciliar de um lado do Córrego. Na Figura 3.12, observa-se o Córrego do Monjolo passando por baixo da via.

Figura 3.12 – Via em construção sobre o Córrego do Monjolo



Fonte: CAIXETA, 2012

A ausência parcial da vegetação na Figura 3.13-a é onde ocorre o prolongamento no início das obras. Além disso, na Figura 3.13-b, apresenta-se a vegetação no final da avenida, com as formações do canal anterior do Córrego do Monjolo. Desta forma, pode-se comparar as duas Figuras 13-a e 13-b, identificando a ocorrência da expansão urbana a montante do trecho canalizado, em um período de quatro anos.

Figura 3.13 – Avenida Fátima Porto

a- Prolongamento da Avenida Fátima Porto em outubro de 2012



Fonte: CAIXETA, 2012

b- Final da Avenida Fátima Porto antes do prolongamento



Fonte: CAIXETA, 2008

Com a consolidação do prolongamento da Avenida Fátima Porto ligando as duas avenidas de acesso da cidade, a Avenida JK e a Avenida Marabá, favorece-se a ocupação urbana na bacia do Córrego do Monjolo, com uma via de acesso rápido. Também essa continuação da Avenida Fátima Porto facilita o escoamento superficial, que anteriormente era retido parcialmente pela vegetação.

Outro elemento fundamental na ocupação da bacia são os loteamentos, que estão em processo de criação para iniciar a ocupação urbana. Na Figura 3.14, mostra-se o loteamento na Bacia do Córrego do Monjolo próximo ao canal, também ao longo do loteamento, percebe-se um nivelamento da vertente gerando uma nova dinâmica com a futura ocupação.

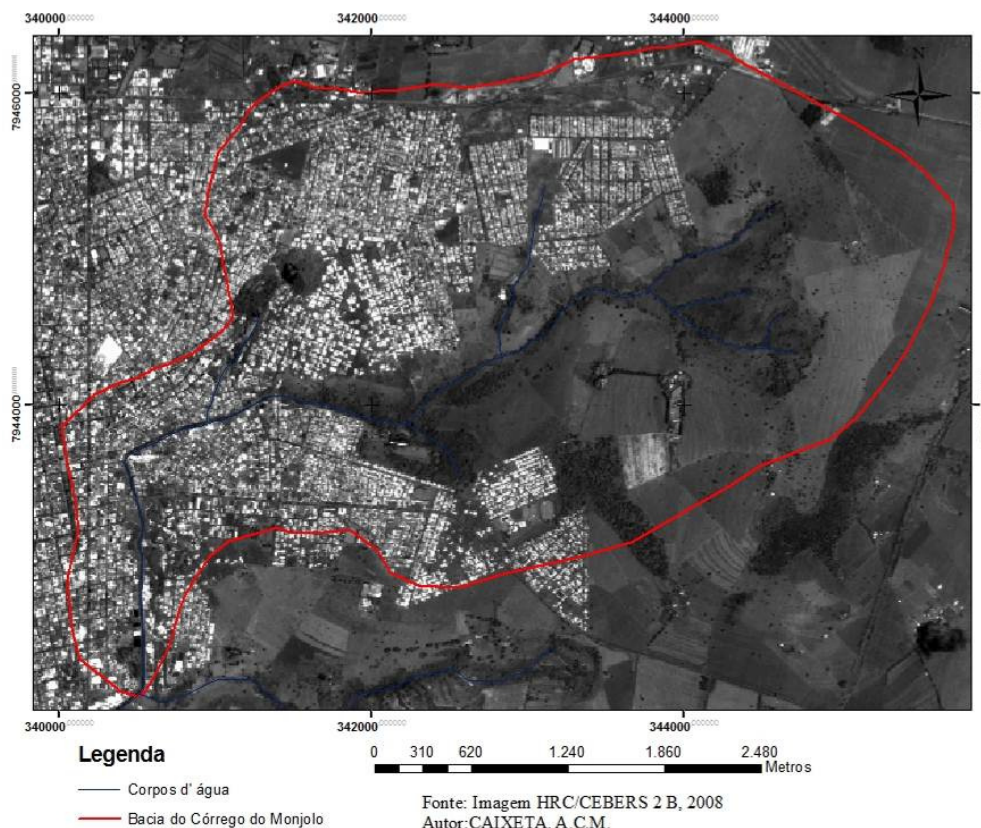
Figura 3.14 – Loteamento na Bacia do Córrego do Monjolo



Fonte: CAIXETA, 2012

Para a visualização do crescimento urbano na Bacia do Córrego do Monjolo, segue a carta imagem para representação da área urbana de tons mais claros, que são as edificações, situadas na bacia. A carta imagem está na Figura 3.15 com a área de estudo ao centro.

Figura 3.15 – Visualização da malha urbana no interior da Bacia do Córrego do Monjolo.



Fonte: HRC,CEBERS-2B, 2008

Diante do que já foi demonstrado até o presente ponto, observou-se a indicação dos prováveis pontos críticos do canal e o estudo da expansão urbana dentro da área de drenagem, com a finalidade de se compreender a ocupação do solo no interior da Bacia analisada. A junção da Avenida Fátima Porto com a Ivan Borges (Figura 3.7) apresenta problemas de macrodrenagem e microdrenagem. Assim, com a caracterização da bacia realizada e o referencial teórico sobre a temática de estudo pode-se estabelecer ferramentas de planejamento para um melhor direcionamento da expansão urbana de Patos de Minas.

3.4 HISTÓRICO DE ENCHENTES DE 2008 A 2012

O histórico da implantação da Avenida Sanitária, como já descrito, foi para solucionar problemas de infraestrutura urbana. Mas, com a modificação na dinâmica urbana, com o crescimento da cidade e com a falta de planejamento urbano, geraram-se outros impactos urbanos, propiciando uma nova dinâmica hídrica problemática em termos do surgimento de novas zonas inundadas. Assim, houve consideráveis problemas de enchentes após 2008 na bacia do Córrego do Monjolo, conforme mostram as Figuras 3.16 e 3.17.

Figura 3.16 – Enchentes no leito do Córrego do Monjolo.



Fonte: NUNES, 2008

Figura 3.17 – Erosão Marginal



Fonte: CAIXETA, 2009

Um ponto crítico da Avenida Fátima Porto é na interseção com a Avenida Ivan Borges Porto (Figura 3.18), que possui a canalização fechada das nascentes do Parque do Mocambo desaguardo no Córrego do Monjolo. Assim, ao longo dos anos, este local foi o principal ponto de enchentes no período de precipitações máximas, principalmente, nos meses de dezembro e janeiro.

Figura 3.18 – Enchente na Avenida Ivan Borges Porto, após o termino da chuva em 2012.



.Fonte: PATOS HOJE, 2012

Além disso, percebem-se problemas de macrodrenagem (Figuras 3.19 e 3.20), principalmente nos setores do Córrego do Monjolo que está na área urbana da cidade de Patos de Minas. Destaca-se novamente a área das Avenidas Fátima Porto e a Ivan Borges Porto, que é ponto de enchentes na Bacia do Córrego do Monjolo. Nesse sentido, após uma chuva intensa observa-se que ela provocou diversos estragos também de microdrenagem na cidade, de acordo com o Jornal local (Anexo A), no dia 30 de janeiro de 2012.

Figura 3.19 – Leito do Córrego do Monjolo no momento de chuva. 2012.



Fonte: PATOS HOJE, 2012

Figura 3.20 – Leito do Córrego do Monjolo 2012.



Fonte: CAIXETA, 2012

Pelas Figuras 3.19 e 3.20, percebe-se a elevação do nível de água do Córrego do Monjolo com o início de chuva. Esse efeito é ocasionado pelo aumento do escoamento superficial na bacia, propiciando o aumento da vazão e da profundidade do escoamento no Córrego, causando inundação à planície.

Portanto, após caracterização da área de estudo, principalmente com o histórico de enchentes, pode-se entender que é necessária uma metodologia sobre aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos que sejam preditores de áreas inundáveis. Além disto, se observa que é necessário o levantamento de dados complementares locais para a alimentação desses modelos. Essa análise sobre a metodologia é desenvolvida no capítulo seguinte, com o desenvolvimento dos passos a serem aplicados para a obtenção do objetivo do trabalho.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente, foi abordada nos capítulos anteriores a revisão bibliográfica sobre a temática e a caracterização da área de estudo. Diante disto, segue a descrição dos materiais e métodos utilizados. Porém, inicialmente é necessário compreender o método de estudos, mas devido as suas complexidades de distinção utilizou-se principalmente o método hipotético-dedutivo. Entretanto é necessária a compreensão dos principais elementos dos métodos científicos. Dentre estes métodos tem-se o método Dedutivo que pode ser entendido como partido do geral para o particular. De acordo com Gerhardt e Silveira (2009) “o raciocínio dedutivo é o silogismo, que, a partir de duas preposições chamadas premissas retira uma terceira chama conclusão” (GERHARDT E SILVEIRA, 2009, p.26).

Outro método é o Método Indutivo utiliza alguns estudos de casos para concluir generalizações. Porém para determinar esta conclusão é necessário de acordo com Gerhardt e Silveira (2009) verificar as circunstâncias e frequências com que ocorra o elemento analisado e suas relações de situações de elementos similares e diferentes. Com isto, este método chega a conclusões prováveis e possíveis (GERHARDT e SILVEIRA, 2009).

O método hipotético-dedutivo faz uma relação entre os dois métodos citados. Porém, ao relacionar com o indutivo necessita analisar infinitos casos isolados para definir o geral. Já no método dedutivo busca-se comprovar as hipóteses e no método hipotético-dedutivo busca o falseamento até obter a superação destes falseamentos. (GERHARDT E SILVEIRA, 2009)

Assim, o método hipotético-dedutivo foi o principal utilizado devido a construções de hipóteses para o desenvolvimento de simulações para o estudo da Bacia do Córrego do Monjolo e o canal. Dentre as hipóteses desenvolvidas foi proposta a utilização de cenários para responder a estas hipóteses.

Para a projeção dos cenários foi utilizado o código em Visual Basic alimentado por dados da Bacia do Córrego do Monjolo. Além disso, a comprovação dos problemas do canal é comprovada nos últimos anos períodos de chuva, devido a ocorrências de enchentes e à crescente urbanização na bacia. Portanto segue a metodologia do código utilizado para a aplicação dos modelos e os dados necessários para a sua alimentação.

4.1 FUNDAMENTOS DO CÓDIGO BASE

Este trabalho baseia-se na metodologia utilizada por Rezende (2012), que desenvolveu um simulador para propagação de cheias e delimitação de áreas inundáveis na vizinhança de um canal urbano. O referido simulador foi construído em Excel e possui código computacional escrito na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA). O presente trabalho também incluiu algumas adaptações a este código base, as quais permitiram sua aplicação na bacia do córrego do Monjolo. Além disto, as adaptações contribuíram para ampliar a quantidade de dados de saída, como, por exemplo, o cálculo das áreas inundadas em planta. Em linhas gerais, o procedimento fundamenta-se em três tipos de modelos: o de terreno, o hidrológico e o hidráulico. Os principais tópicos que embasaram o código são discutidos a seguir.

4.1.1 – MODELO NUMÉRICO DE TERRENO

O modelo numérico de terreno consiste em uma malha de elementos retangulares (células), que abrange a área potencialmente inundável no entorno do canal. Esta discretização é chamada, neste trabalho, de malha de vizinhança. Nos nós resultantes do cruzamento das linhas de grade, são armazenadas as coordenadas (X,Y) em sistema *Universa Transversal de Mercator* (UTM), além da cota altimétrica do terreno (Z) . A malha de vizinhança é obtida a partir de um modelo numérico de terreno mais abrangente, cuja malha é chamada de malha geral.

A malha geral é produzida por interpolação de dados de curvas de nível, obtidas normalmente por mapas em *Autocad*. Nesse caso, os dados de coordenadas e de cotas altimétricas são obtidos a partir das poli linhas que delineiam as diversas curvas de nível. Esses dados, referentes às coordenadas e cotas não estão regularmente espaçados, mas são transferidos para planilhas Excel passíveis de serem lidas pelo programa *Surfer 10*.

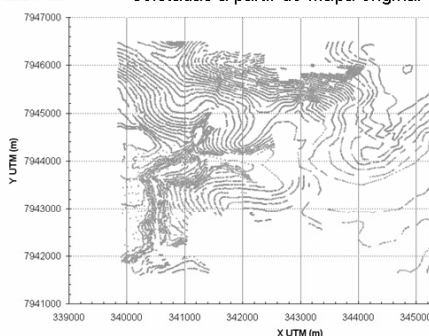
Desta forma, é realizada uma interpolação espacial que determina uma malha geral de células retangulares, com pontos regularmente espaçados. Tem-se aí o modelo numérico de terreno geral. A Figura 4.1 ilustra este procedimento. Salienta-se que, no presente trabalho, foram construídas malhas de 254 x 254 elementos, perfazendo um total de 64516 nós. Esta quantia foi fixada em função da limitação do número de linhas contidas em uma única planilha do Excel.

Figura 4.1 – Mapa geral com as curvas de nível originais, distribuição de pontos coletados e modelo numérico de terreno (malha geral), cujos pontos apresentam espaçamentos uniformes.

Mapa original (Autocad) georreferenciado e com curvas de nível



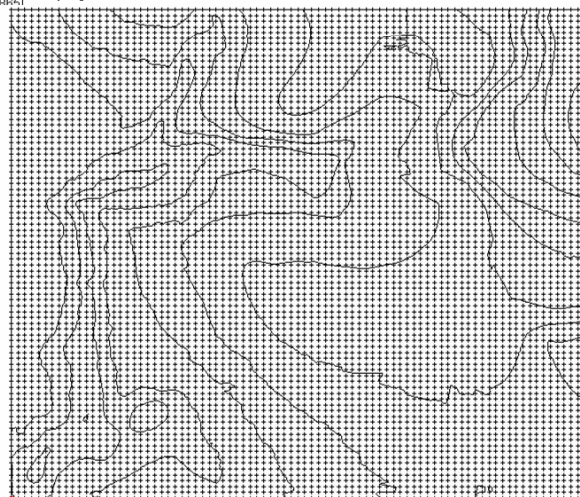
Distribuição de pontos (Excel) onde as coordenadas e as cotas altimétricas foram coletadas a partir do mapa original



Dados da malha de vizinhança geral, com valores armazenados em planilha Excel

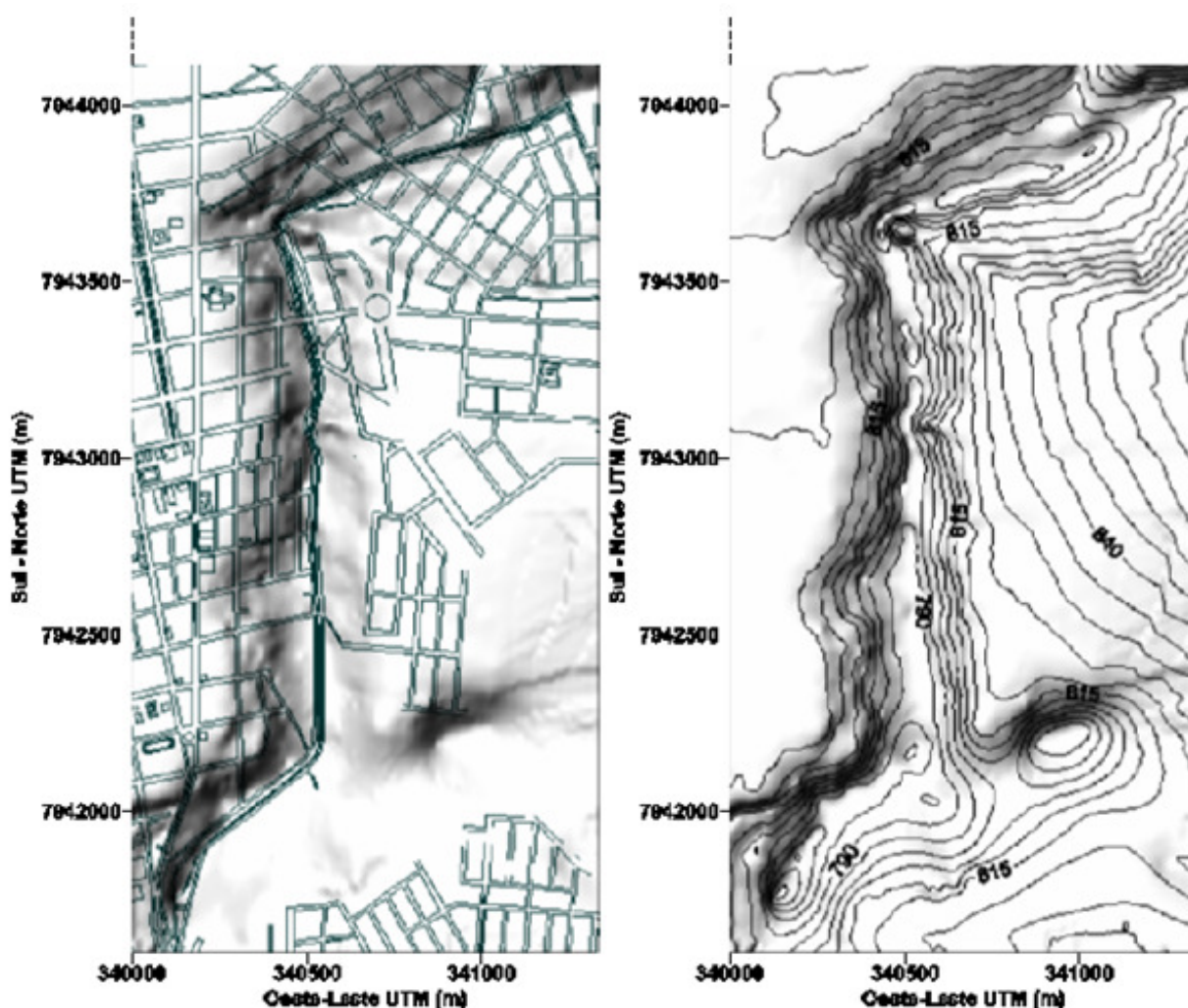
MALHA DE VIZINHANÇA		
X (m)	Y (m)	Z (m)
341389.7	7943014	865
341387.6	7943017	865
341383.7	7943024	865
341379.8	7943032	865
341378	7943035	865
341349.8	7943109	865
341346.2	7943119	865
341344.3	7943136	865
341328.9	7943154	865
341327.3	7943167	865
341323.1	7943188	865
341323.1	7943188	865
341320.8	7943195	865
341313.3	7943213	865
341305.1	7943238	865
341300.5	7943256	865
341298.9	7943263	865
341296.5	7943274	865
341296.5	7943274	865
341294.6	7943284	865
341291.7	7943303	865
341287.1	7943321	865
341287.5	7943342	865
341300.6	7943333	865

Modelo numérico de terreno com pontos regularmente espaçados



Com a malha geral construída, é delimitada uma área retangular na vizinhança do curso de água de interesse. Os limites desta área são fixados visualmente, de forma a abranger a área potencialmente inundável pelo transbordamento da água do canal. Assim, um segundo procedimento de interpolação é realizado pelo *Surfer 10* e, a partir da malha geral, é construída a malha de vizinhança com 254 x 254 nós. Esta última é aquela efetivamente utilizada pelo simulador computacional. Nesse sentido, o nível de água transbordante, calculado pelo aplicativo computacional, é comparado com o nível altimétrico deste modelo numérico de terreno. Assim, além da confirmação de alagamentos, podem ser estimadas as profundidades inundadas em cada posição do terreno. Destaca-se que todas as interpolações deste trabalho utilizaram o método de Kriging. Todavia, outros métodos podem ser utilizados dentro das possibilidades listadas pelo *Surfer 10*. A Figura 4.2 ilustra curvas de nível obtidas na malha de vizinhança originada pela malha geral.

Figura 4.2 – Curvas de nível da malha de vizinhança do canal.



A Figura 4.2 ilustra a ocupação nas adjacências da calha do Córrego do Monjolo. Isto permite observar que eventuais enchentes resultam em prejuízos para a população local.

4.1.2 – MODELO HIDROLÓGICO

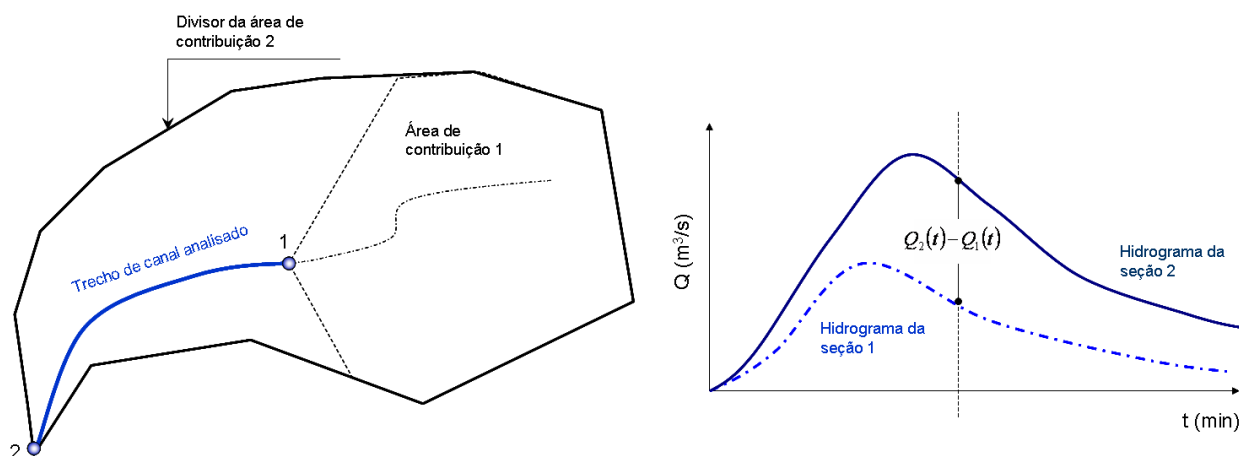
O modelo hidrológico do código base consiste na etapa que faz a correlação entre os cenários de precipitação, impostos pelo simulador, e a geração de vazões em uma determinada seção do curso de água. Em outras palavras, a partir de uma chuva com tempo de recorrência (T_r), duração (t_d) e distribuição temporal (hietograma) pré-fixada, são gerados hidrogramas que estabelecem a variação das vazões com o tempo, para um dado ponto do canal. Neste contexto, o código base utiliza o Método Santa Bárbara, o qual gera uma resposta da área de contribuição (hidrograma) em função de um escoamento superficial gerado pela transformação chuva-vazão do método SCS. A descrição desta transformação pode ser consultada, com detalhes, em trabalhos como Rezende (2012), ou Souza (2008). Além disto, o presente capítulo possui um item que trata especificamente sobre tais procedimentos e suas equações. Ademais, é importante citar que a geração do escoamento superficial sobre a bacia depende do tipo de solo, do seu uso e das condições de umidade antecedente. A influência destes fatores é resumida pelo número CN da área de contribuição.

Os hidrogramas gerados pelo modelo hidrológico fornecem dados de entrada para o modelo hidráulico, responsável por calcular a propagação da onda de cheia no canal. Assim, os hidrogramas fornecem vazões que alimentam o canal em pontos específicos, ou vazões que são distribuídas ao longo de comprimentos específicos do curso de água.

No código base, a entrada integral do hidrograma ocorre apenas no ponto inicial do canal. Nos pontos intermediários, as vazões entram de forma distribuída. Para isto, é utilizado um procedimento de discretização da bacia de contribuição, de forma que a diferença entre os hidrogramas de duas seções consecutivas do canal é distribuída ao longo do trecho entre as duas seções. Tais seções drenam áreas que são acumulativas, de forma que o hidrograma gerado para o ponto final do canal é o hidrograma para toda a bacia. Maiores detalhes sobre este procedimento são fornecidos no trabalho de Rezende (2012).

A Figura 4.3 apresenta um esquema em que uma bacia é discretizada em duas áreas de contribuição. Note-se que, na seção 1, que marca o início do trecho analisado, o hidrograma da área 1 entra integralmente na alimentação do canal. Entre as seções 1 e 2, o canal é alimentado por uma vazão distribuída, resultante da diferença entre os hidrogramas de drenagem das áreas de contribuição 2 e 1, dividida pelo comprimento do trecho entre as seções 1 e 2. Note-se que, a área 2 (bacia hidrográfica propriamente dita) abrange integralmente a área 1. Esta vazão distribuída, calculada em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, é utilizada para modelar as extremidades terminais das galerias da microdrenagem, as quais injetam água diretamente no canal.

Figura 4.3 – Esquema de hidrogramas gerados por duas áreas de contribuição de uma bacia genérica.



Um outro aspecto importante acerca do modelo hidrológico consiste na sua habilidade em abordar diferentes distribuições temporais de chuva. Nesse contexto, uma precipitação de intensidade total (i), calculada pela equação de chuva local, pode ser distribuída sob quatro hidrogramas baseados nas curvas de Huff com 50% de probabilidade de ocorrência.

4.1.3 – MODELO HIDRÁULICO

A propagação da onda de cheia na calha do canal, bem como nas extensões do talvegue sujeitas ao avanço das águas transbordantes, é simulada por um modelo hidráulico de escoamento em regime transiente. No caso, o código utiliza o modelo de onda cinemática apresentado em Vieira da Silva, Mascarenhas e Miguez (2007). As equações básicas deste modelo são:

$$\text{Equação da Continuidade: } B_a \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (4.1)$$

$$\text{Equação Dinâmica: } S_o = \frac{Q^2 \cdot n^2}{B_d^2 \cdot h^{10/3}} \quad (4.2)$$

Nas equações governantes, h representa a profundidade do escoamento, Q é a vazão e q_L é a contribuição lateral. O efeito da rugosidade das paredes de fundo e laterais da calha principal, bem como da planície de inundação, é levado em conta pelo coeficiente de Manning composto (n). Ainda nas equações, S_o representa a declividade do fundo do canal e B_d , a largura da calha principal. Quando há transbordamento da água em uma seção, surgem áreas alagadas adjacentes, nas quais as velocidades de escoamento longitudinal são menores do que aquelas que ocorrem na calha principal. Há assim, uma espécie de armazenamento lateral, de forma que a Equação da Continuidade (4.1) considera uma largura de armazenamento B_a , que é obtida dividindo-se a área molhada total da seção (incluindo calha e planície de inundação) pela profundidade do escoamento.

As equações de propagação devem ser resolvidas numericamente, o que exige a discretização do canal em seções não muito distantes entre si. Neste caso, o número de seções discretas é previamente fixado pelo usuário. Neste trabalho, por exemplo, o trecho do córrego do Monjolo analisado foi dividido em 1000 seções. A equação discretizada para calcular a propagação da onda de cheia é escrita como:

$$Q_{j+1}^{k+1} = Q_j^{k+1} + \frac{1}{\theta} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \cdot (B_a \cdot \alpha) \cdot \left[(Q_j^k)^\beta - (Q_j^{k+1})^\beta \right] + \frac{1-\theta}{\theta} \cdot (Q_j^k + Q_j^{k+1}) + \frac{q_L \cdot \Delta x}{\theta} \quad (4.3)$$

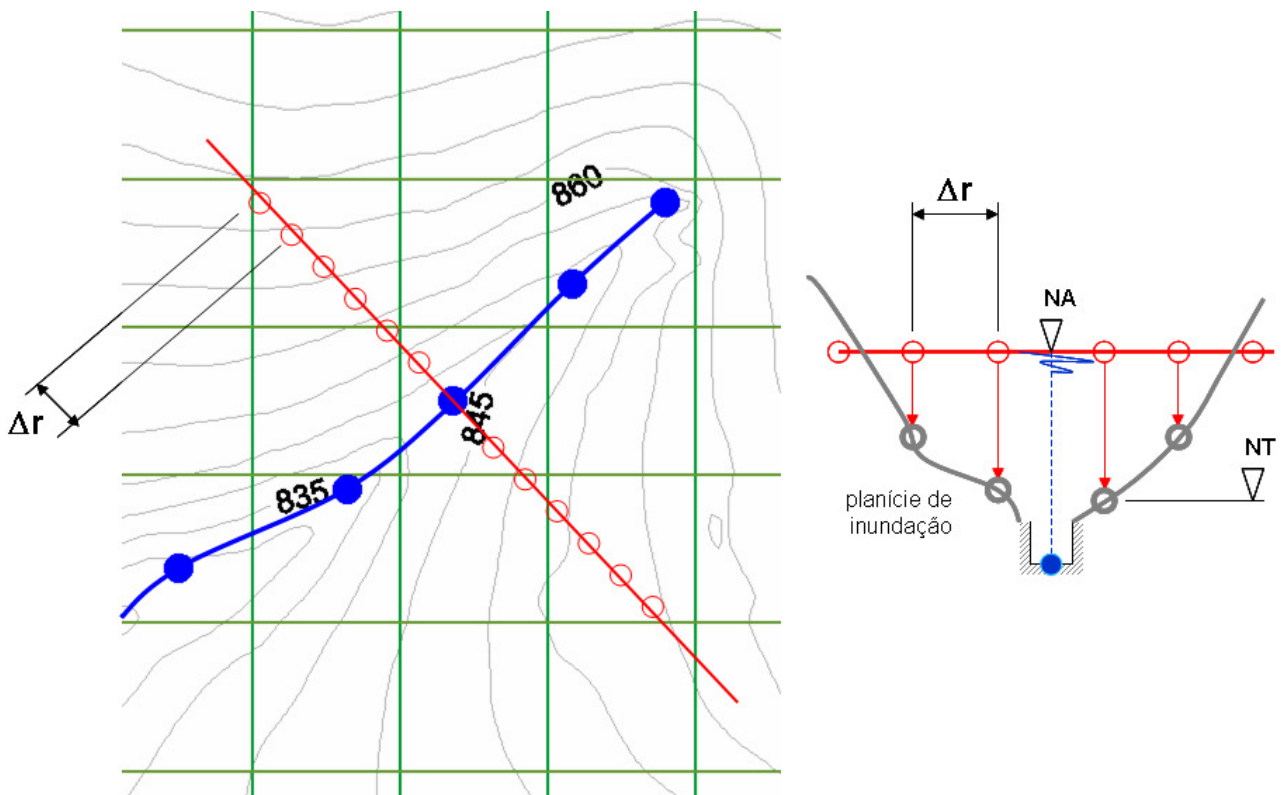
$$\text{Em que: } \alpha = \frac{n^{0,6}}{B_d^{0,6} \cdot S_o^{0,3}}$$

Na equação (4.3), o índice k indica variáveis no instante atual e $k+1$, no instante subsequente. Δx e Δt indicam, respectivamente, o espaçamento entre cada seção discreta do canal e o passo de tempo dos cálculos. O expoente β é igual a 0,60 e o fator θ é um

parâmetro de ponderação que varia entre 0,5 e 1. O sub índice $j+1$ indica a seção transversal de jusante, na qual a vazão deve ser calculada.

Nas seções em que há transbordamento, o código avalia o avanço lateral da inundação, sempre comparando a cota altimétrica atingida pelo nível de água (calculada pelo modelo de propagação) com a cota altimétrica do terreno (calculada por interpolação a partir do modelo numérico de terreno). Neste procedimento, é construída uma reta imaginária perpendicular ao eixo do canal e, a partir das paredes da esquerda e da direita da calha principal, são dados incrementos espaciais (Δr) de 10 cm e calculadas as novas coordenadas X,Y destes pontos. A partir daí, verifica-se se o nível de água está acima do nível do terreno. Este procedimento é repetido até que se atinjam pontos X,Y , cujas cotas estejam acima do nível de água (ver esquema na Figura 4.4).

Figura 4.4 – Traçado de um corte transversal à seção do canal e comparação entre as cotas da superfície livre (NA) e do terreno (NT), com intuito de identificar coordenadas dentro de zonas de inundação. As linhas de grade verdes definem a malha de vizinhança, contendo pontos onde as coordenadas e cotas são conhecidas.



Fonte: Rezende (2012).

Para um entendimento mais detalhado dos procedimentos de interpolação que permitem estas comparações, sugere-se a leitura da dissertação de Rezende (2012). Este procedimento de varredura lateral permite ao código acumular áreas e perímetros dentro da planície de inundação, cujos valores são utilizados para o cálculo da profundidade e da vazão no instante seguinte. Isto também permite armazenar as lâminas de água dentro da zona inundada.

Para que as simulações de propagação de cheias sejam realizadas, é necessário inicializar o sistema (canal), com os valores de profundidade e de vazão em cada seção discreta. Estes valores iniciais correspondem à situação do escoamento sem influência de eventos de precipitação. Para isto, parte-se do princípio de que a vazão é conhecida e assume o mesmo valor em todas as seções, desde o início até o final do trecho analisado. Esta vazão pode ser levantada por dados fluviométricos existentes ou, na ausência destes, por levantamento de campo com técnicas como molinantes, flutuadores, entre outras.

O cálculo das profundidades é realizado a partir do *Standard Step Method*, aplicado para regime permanente e variado. Nota-se que, para estimar as condições iniciais, o código base não leva em conta a presença de afluentes intermediários no trecho. Apesar disso, esta limitação foi corrigida no presente trabalho, como será visto adiante.

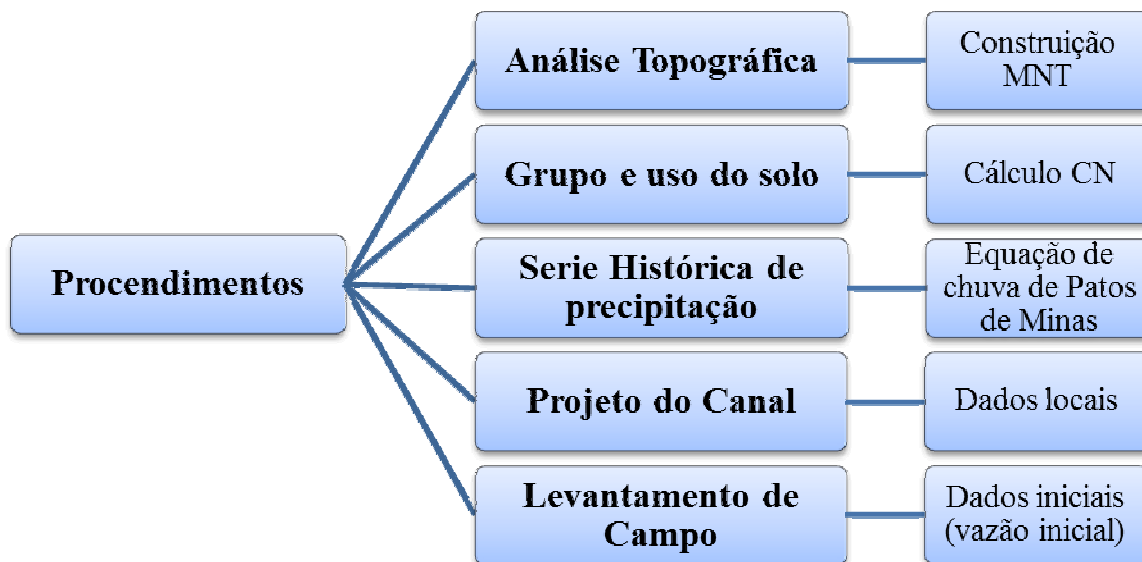
4.2 AQUISIÇÃO DE INFORMAÇÕES

No levantamento de dados, foi tomada como base a planta da zona urbana, fornecida pela Prefeitura Municipal de Patos de Minas, feita pela COPASA. A utilização desta planta possibilitou o georreferenciamento de imagens de satélites para a classificação do uso do solo e as interações com as curvas de nível *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Além disso, foram utilizadas também as imagens do Google Earth para sanar dúvidas de uso do solo e características em uma grande escala. As imagens de satélites utilizadas foram pancromáticas (preto e branco). Devido à sua resolução de 2,7 metros, foi possível fazer a diferenciação das quadras na área urbana.

Na organização dos dados básicos para a alimentação dos modelos hidrológico e hidráulico, segue o fluxograma Figura 4.5, com principais dados preliminares, sendo dividido nos procedimentos, dado bruto e dado preliminar.

Figura 4.5 – Fluxograma de dados preliminares



De acordo com o fluxograma da Figura 4.5, cada procedimento realizado segue um subitem para descrever a sua metodologia.

4.2.1 *Análise Topográfica*

Este subitem refere-se à caracterização da topografia local, com a delimitação da bacia, com as curvas de nível, a declividade e a orientação das vertentes. Para a realização deste estudo, foram utilizadas as curvas de nível da Prefeitura Municipal de Patos de Minas (PMPM), realizadas pela COPASA. Mas essas curvas contemplavam somente a área urbana. Para que a bacia tivesse toda a sua área com as curvas de nível, utilizaram-se também as curvas de nível do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), de 50 metros, com uma escala compatível com a escala 1:250.000 para abranger toda a área da bacia. Essas duas fontes de mapas planialtimétricos foram complementares.

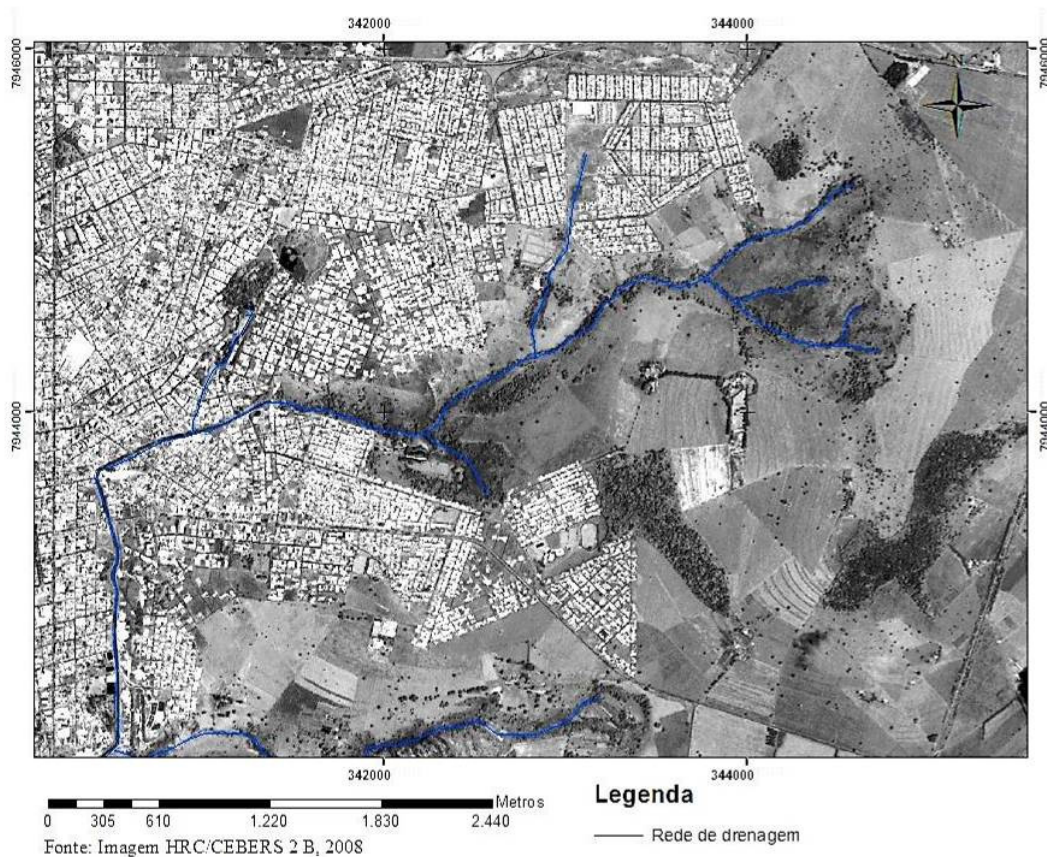
Porém, ao unificar as duas fontes de curva de nível, estas tiveram uma incompatibilidade em alguns pontos. A despeito disto, a interpolação em alguns setores foi possibilitada. Isto ocorre devido a diferença de projeção de cada fonte sendo o da base da prefeitura sistema

de datum SAD69 e a SRTM com o datum WGS-84. Nos setores adjacentes ao trecho analisado do córrego do Monjolo, as curvas de nível fornecidas pela PMPM estavam bem delineadas, fator que possibilitou a construção de uma malha de vizinhança confiável.

Com base nessas curvas de nível, gerou-se um Modelo Numérico do Terreno (MNT), um mapa de declividade com base no grau de declividade e o mapa de orientações das vertentes. Com isto, tem-se uma visualização do comportamento topográfico com terreno, além dos dados numéricos de coordenadas e cotas altimétricas que são utilizados pelo programa de simulação.

Diante do comportamento topográfico foi delimitada a Bacia do Córrego do Monjolo, porém na área a montante, onde é área rural, os dados não estavam claros, sendo necessária a delimitação em trabalho de campo, utilizando a carta imagem para a delimitação da área de estudo. A Figura 4.6 apresenta a Carta Imagem da Bacia do Córrego do Monjolo.

Figura 4.6 – Carta Imagem de Patos de Minas, na região da bacia do Córrego do Monjolo - 2012



Assim, foram obtidos os elementos de topografia, possibilitando determinar áreas íngremes que ampliam consideravelmente a velocidade do escoamento superficial com reduzida infiltração. Também nos pontos críticos relacionados ao histórico de enchentes, foi possível determinar pontos relevantes, como a foz do Córrego do Mocambo no Córrego do Monjolo. A contribuição deste afluente será levada em conta nas simulações.

4.2.2 Grupo e uso do solo para o Cálculo do CN

Devido ao elevado custo para aquisição de imagens de satélites, foi utilizada uma imagem do satélite CBERS-2B, disponibilizada gratuitamente pelo INPE, pancromática e com uma resolução espacial de 2,7 metros para a diferenciação da área urbana e rural.

Para esta classificação também foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto na distinção dos alvos. Além disto, utilizaram-se como referência, as imagens do Google Earth para a visualização das feições em grandes escalas. Apesar disto, não se utilizaram imagens do Google Earth como base, visto que a sua disponibilidade pode variar no ano, dependendo do tamanho da área, não permitindo um estudo espaço-temporal de um mesmo momento.

Na quantificação do uso do solo, teve-se como base uma Chave de Interpretação, que pode ser compreendida conforme Novo (2008). “Estas chaves visam a tornar menos subjetivo o processo de extração de informações. Os elementos utilizados para construir as chaves de interpretação são dependentes da resolução espacial, espectral e temporal das imagens disponíveis” (NOVO, 2008, p. 306).

Assim, no Quadro: 4.1 apresentam-se os critérios analisados na chave de fotointerpretação sendo a cor, a textura, a forma e o tamanho. Com isso, é possível obter o mapa de uso do solo que é a base na determinação de áreas permeáveis e impermeáveis para a alimentação do modelo hidrológico. Além disso, para cada uso do solo foi atribuído um valor do número de curvas (CN) possibilitando a integração de informações sobre uso do solo e a potencialidade de geração de escoamento superficial.

Quadro 4.1 – Chave de interpretação para a Bacia do Córrego do Monjolo (2012)

Características da Imagem	Definição
Cor	Representa as feições dos alvos de vista superior. Com as classificações de cobertura vegetal e porte arbóreo, com tons claros de topos de prédios e edificações. Tons escuros de arruamentos.
Textura	Representa as feições para cobertura vegetal e porte arbóreo texturas mais rugosas e heterogêneas, nas feições prediais e arruamento feições mais lisas e homogêneas.
Forma	Representa as feições irregulares como a cobertura vegetal e feições regulares (geométricas) como edificações, quadras e a infra-estrutura urbana. Na definição do arruamento tem-se um formato linear.
Tamanho	Representa o tamanho do objeto na escala para facilitar a sua identificação.

Fonte: NOVO, 2008. ROSA 2007 Organização: CAIXETA, 2012

O cálculo da curva número ou número de curva (CN), que atua como uma espécie de coeficiente de deflúvio de cada seção da bacia, não leva em consideração a duração e a intensidade da chuva. O seu entendimento consiste na caracterização do solo, do tipo de uso e de condições de umidade do mesmo, dentro da bacia em questão. Nas áreas urbanas, tem-se a combinação de áreas impermeáveis com áreas permeáveis que podem implicar em um significativo aumento ou diminuição do escoamento superficial direto.

Para a estimativa do número de curva (CN) de uma bacia é necessário, primeiramente, classificar o tipo de solo. Este grupo de solo é classificado conforme as suas características e sua permeabilidade. “Segundo (McCuen,1998), o SCS classificou nos Estados Unidos mais de 4.000 solos para verificar o potencial de escoamento superficial. Em suma, os grupos de solo foram divididos em quatro, identificando-os com as letras A, B, C e D.”. (TOMAZ, 2002, p. 7-151). No Brasil, há poucas pesquisas que fornecem o CN. (Quadro: 4.2)

Quadro 4.2 – Grupo de solos e características do solo

Grupo de Solo	Características do Solo
A	<p>Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%. (Porto, 1979 e 1995)</p> <p>Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila. (Tucci et al, 1993)</p> <p>Baixo potencial de escoamento superficial. Solos de elevadas intensidades de infiltração, mesmo moderadas quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, areias profundas com drenagem de boa a excessiva. Estes solos possuem elevada transmissividade. (Campos, 2009)</p>
B	<p>Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial (Porto, 1979 e 1995)</p> <p>Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média (Tucci et al, 1993).</p> <p>Potencial de escoamento superficial abaixo da média. Solos com intensidade de infiltração moderadas quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, solos medianamente profundos, com texturas variando de moderadamente fina a moderadamente grosseira. São medianamente drenados e possuem transmissividade média. (Campos, 2009)</p>
C	<p>Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo (Tucci et al, 1993).</p> <p>Potencial de escoamento superficial acima da média. Solos com baixas intensidades de infiltração quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com texturas</p>

Grupo de Solo	Características do Solo
	moderadamente finas. Solo de baixa transmissividade. (Campos, 2009)
D	<p>solos argilosos (30% a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (Porto, 1979 e 1995).</p> <p>Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (Tucci et al, 1993).</p> <p>Elevado potencial de escoamento superficial. Solos com intensidade de infiltração muito baixas quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, solos argilosos expansíveis, e solos com estratos impermeáveis e pouca profundidade. Possuem transmissividade muito baixa. (Campos, 2009)</p>

Fonte: Tomaz (2002), Campos (2009)

De acordo com a classificação, o tipo de solo característico da bacia estudada é o tipo “C”. Com o grupo de solo determinado, somado à chave de fotointerpretação, iniciou-se a classificação do uso do solo juntamente com os valores de CN para a condição de solo de umidade normal (II).

Com base nas características analisadas na bacia de estudo, tem-se o grupo de solo específico. Após isto, são utilizadas as classificações do uso do solo com base na chave de fotointerpretação e nos valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (Quadro: 4.2).

Quadro 4.3 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78

Utilização ou cobertura do solo	Grupo de solo			
	A	B	C	D
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Florestas: cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m2) % média impermeável				
<500 65	77	85	90	92
1000 38	61	75	83	87
1300 30	57	72	81	86
2000 25	54	70	80	85
4000 20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: Tomaz (2002)

Este processo do cálculo do CN foi realizado para a Bacia do Córrego do Monjolo com a divisão de duas áreas de contribuição. Estas áreas de contribuição foram divididas conforme o revestimento do canal. A primeira área de contribuição, com o exutório no início do trecho canalizado do córrego, é a área da bacia drenada pelo trecho de canal que possui revestimento natural. Na segunda área de contribuição, abordou-se a bacia total, incluindo também os trechos de jusante do canal, nos quais o revestimento de concreto cobre o

perímetro das paredes laterais e de fundo. O motivo de se considerar estas áreas será mais detalhadamente explicado no item que trata do modelo hidrológico.

Também foi necessário calcular um CN para a sub-bacia do Córrego das nascentes do Parque do Mocambo, importante afluente do Córrego do Monjolo dentro da zona urbana. A consideração das características desta sub-bacia é importante para simulações na área de estudo, devido ao fato de haver recorrência de enchentes na confluência desse córrego com o do Monjolo. Isto é necessário para gerar um hidrograma referente ao exutório deste afluente, o qual traz vazões adicionais para o Córrego do Monjolo.

Para cada área de contribuição, foi preciso calcular o CN composto para os usos do solo da bacia do Córrego do Monjolo. Este é realizado pela soma de cada CN_i vezes a área de cada uso A_i dividindo sobre a área total A_{total} .

$$\text{CN composto: } CN = \sum_{i=1}^N \left[CN_i \cdot \frac{A_i}{A_{total}} \right] \quad (4.4)$$

Na equação 1:

CN : número CN composto da bacia em estudo;

CN_i : número CN para um determinado utilização ou cobertura do solo da bacia;

A_{total} : área total da bacia

A_i : área de contribuição da bacia correspondente ao número CN_i ;

N : número de usos e ocupações diferentes na bacia.

Outro fator fundamental na quantificação do CN é a umidade do solo, que afeta a capacidade de infiltração e consequentemente o escoamento superficial. Diante disto, o número CN é calculado pela equação (1). O Quadro 4.4 apresenta a diferenciação das condições de solo de acordo com a umidade. Já o Quadro 4.5 apresenta os valores para correção do CN de acordo com as condições de umidade do solo. Com isto, quanto maior for o valor de CN maior será o potencial da bacia em gerar escoamento superficial. As simulações conduzidas no presente trabalho utilizaram a condição padrão II.

Quadro 4.4 – Condições de umidade antecedente do solo

Condições do Solo	Situação do Solo
I	Solo seco
II	Condições médias do solo. É a condição normal das tabelas do número CN.
III	Solo úmido. Ocorreram precipitações nos últimos cinco dias. O solo está saturado.

Fonte: Tomaz (2002)

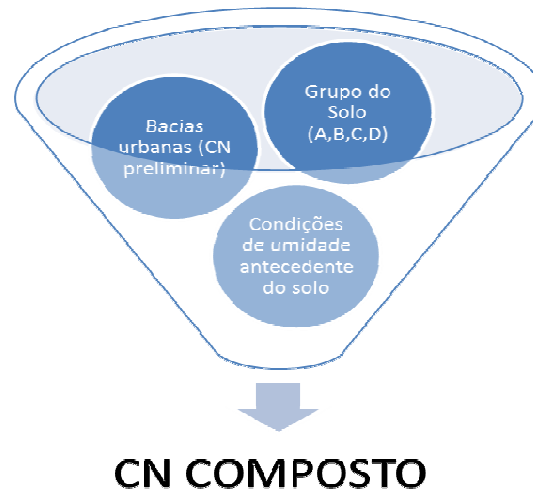
Quadro 4.5 – Ajuste do número CN em função das condições de umidade do solo

Condição normal II do número CN	Número CN correspondente para a devida Condição	
	Condição I	Condição III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Fonte: Tomaz (2002)

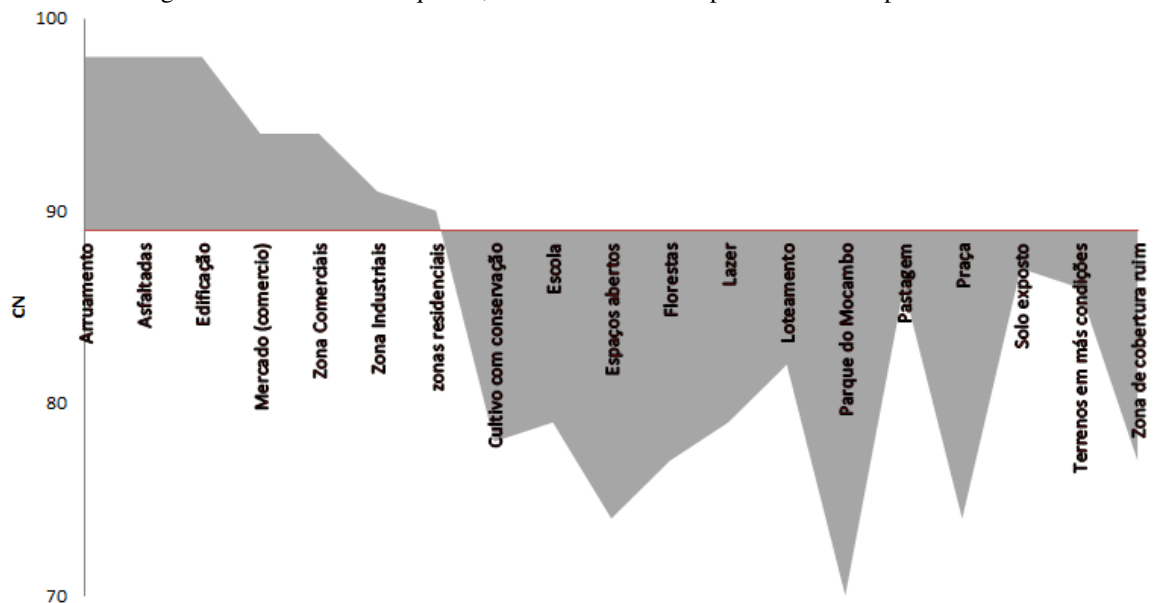
Com a quantificação do número CN, tem-se um importante parâmetro de alimentação do modelo hidrológico, o qual permitirá o cálculo dos hidrogramas (método Santa Bárbara). A Figura 4.7 apresenta um resumo dos principais elementos para o cálculo do cálculo do CN.

Figura 4.7 – Informações necessárias para obtenção do número CN composto de uma bacia de contribuição



A classificação e diferenciação das áreas permeáveis e impermeáveis foram realizadas com base nos usos do solo. Os valores de CN maiores que 90 foram considerados pertencentes a áreas impermeáveis, contemplando zonas residenciais, comerciais e industriais. Por outro lado, números de curva menores que 90 foram relacionados com zonas permeáveis, contemplando principalmente áreas rurais e solos expostos. Assim, a Figura 4.8 apresenta os usos identificados e a classificação de acordo com o CN.

Figura 4.8 – CN maiores que 90, diferenciando áreas permeáveis e impermeáveis.



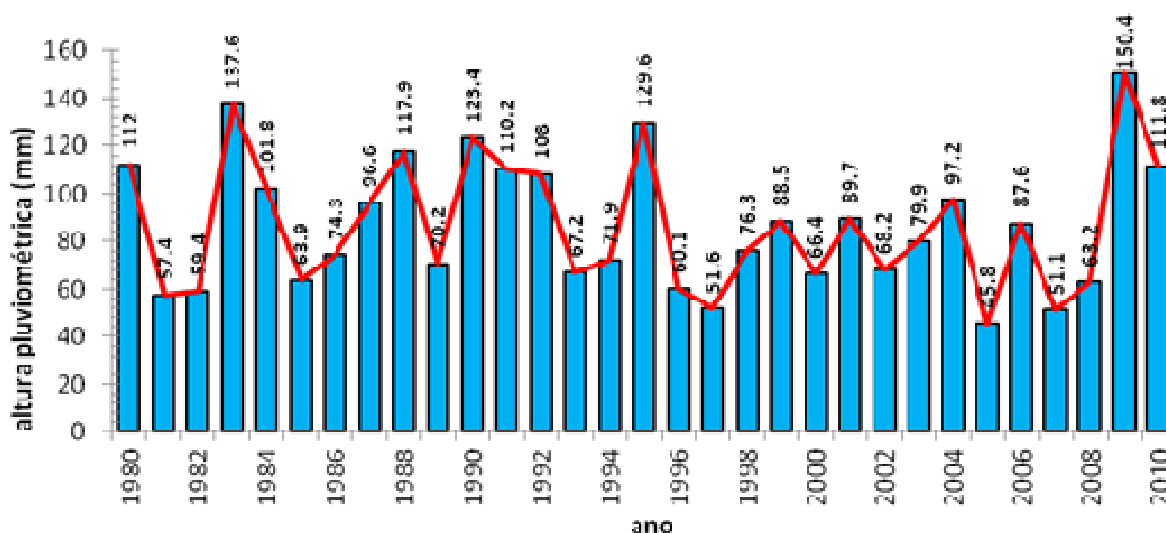
A Figura 4.8 identifica que os usos de solo situados acima do eixo (CN 90) foram considerados como áreas impermeáveis. Os outros tipos de uso do solo com o CN inferior a 90 são as áreas permeáveis.

4.2.3 Equação de Chuva de Patos de Minas

Na formulação da equação de chuva de Patos de Minas, foram utilizados dados pluviométricos de base, que foram obtidos da Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia, situado na Fazenda Experimental Sertãozinho da EPAMIG, com a coordenada 18°31'S e 46°26' W, no município de Patos de Minas. Estes dados baseiam-se em um período de observação de 30 anos (1980 até 2010), com alturas pluviométricas obtidas diariamente.

A Figura 4.9 representa as alturas pluviométricas máximas de cada ano, cujos valores foram utilizados para a construção da equação local de chuvas intensas. Vale lembrar que esta equação fornece dados importantes de entrada no modelo hidrológico, permitindo a simulação de vários cenários de intensidade, tempo de recorrência e duração das chuvas.

Figura 4.9 – Alturas pluviométricas máximas anuais do Município de Patos de Minas (1980 – 2010)



Fonte: INMET. Org: CAIXETA, 2012

As precipitações máximas diárias foram extraídas para cada ano e tratadas estatisticamente com o método de Gumbel. Neste contexto, os valores da série de valores máximos foram organizados de forma decrescente, estabelecendo-se um número de ordem “m”, do maior para o menor valor. Com isto, a probabilidade de uma certa precipitação não ser excedida pode ser calculada de acordo com a equação (4.5). O tempo de recorrência para esta precipitação pode ser estimado pela equação (4.6).

$$p(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{m}{n+1} \right) \quad \text{Em que: } n \text{ é o número de dados da série analisada} \quad (4.5)$$

Na equação 4.5:

$p(\%)$: porcentagem de precipitação;

m : ordenamento dos valores por ordem decrescente;

n : é o número de dados da série analisada;

$$Tr(anos) = 100 / [100 - p(\%)] \quad (4.6)$$

Na equação 4.6:

$Tr(anos)$: Tempo de retorno;

O método de Gumbel realiza a estimativa da precipitação máxima para um tempo de recorrência previsto. Este valor estimado pode ser calculado como:

$$P = \bar{P} + k \cdot \sigma \quad (4.7)$$

Na equação 4.7:

\bar{P} : precipitação média obtida na serie observada;

k : constante (fator de frequência);

σ : desvio padrão da serie;

Na equação (4.7), \bar{P} é o valor médio da série de máximos e σ é o desvio padrão da mesma série. O parâmetro k (4.8) é um fator de frequência que depende do número de dados amostrais e do tempo de recorrência. Assim, o parâmetro k é calculado como:

$$k = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (4.8)$$

Na equação 4.8:

y : variável reduzida de Gumbel;

\bar{y} : valor médio da variável reduzida

σ_y : desvio padrão dessa variável

Na equação (4.9), \bar{y} é o valor médio da variável reduzida, ao passo que σ_y é o desvio padrão dessa variável dentro da série utilizada.

Para isto, são obtidas variáveis reduzidas do tipo:

$$y = -\ln[\ln(Tr) - \ln(Tr - 1)] \quad (4.9)$$

Os resultados obtidos por este tratamento estatístico oferecem uma curva $P \times Tr$ que interpola de maneira satisfatória os valores medidos no pluviômetro. O comportamento dessa curva segue aproximadamente leis logarítmicas de forma que linhas de tendência logarítmicas também funcionam como uma boa relação para a interpolação e extrapolação dos dados originais. No presente trabalho, utilizou-se uma dessas linhas de tendência como forma de interpolar e extrapolar os dados originais de precipitação. Com a linha de tendência logarítmica geram-se valores de precipitações máximas prováveis conforme o tempo de retorno.

O uso de pluviógrafos permite a construção de equações de chuva mais confiáveis porque eventos de durações inferiores a 24 h podem ser isolados para análise. Todavia, muitas estações climatológicas dispõem apenas de pluviômetros, cujas leituras correspondem a precipitações de um dia, haja vista que as medições ocorrem com frequência de 24 h. Por isso, as alturas medidas nos pluviômetros não correspondem a precipitações de 24 h de duração pois as chuvas sofrem descontinuidades ao longo do período de um dia.

Quando são utilizados dados de pluviômetros para obtenção de equações de chuva, os mesmos devem ser desmembrados para que a precipitação de 1 dia possa gerar valores

estimados para precipitações com durações menores. Com o desmembramento, as intensidades de precipitação (i) podem ser estimadas para diversas durações (t) e para diversos períodos de retorno (Tr). Assim, ao aproximar a família de curvas por uma função única, com características das curvas de intensidade-duração-frequência, gera-se a equação de chuva para Patos de Minas.

Esta função é descrita pela equação (4.10):

$$i = \frac{A \cdot T_r^B}{(t + C)^D} \quad \text{Em que: A, B, C, D são parâmetros a serem obtidos por calibração} \quad (4.10)$$

O cálculo dos parâmetros da equação (4.10) é realizado a partir da minimização de uma função objetivo. O procedimento utilizado neste trabalho visou à minimização da soma do quadrado dos resíduos, de forma que a função objetivo foi escrita como:

$$f.o. = \min \left\{ \sum (i - i_e)^2 \right\} \quad (4.11)$$

Na equação (4.11), i é a intensidade de precipitação calculada a partir das funções de interpolação/extrapolação e i_e é a intensidade calculada a partir da equação de chuva (4.10). A ferramenta Solver do programa Excel possibilita uma eficiente minimização que fornece os parâmetros da equação de chuva. Estes procedimentos e aplicativo foram utilizados para a construção da equação de chuva local.

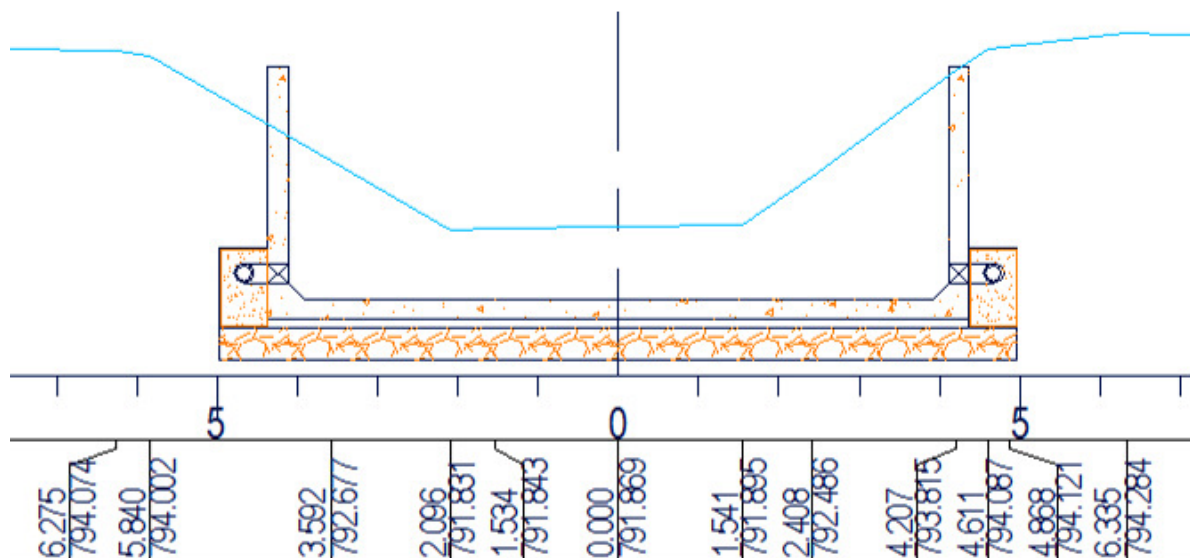
4.2.4. Projeto do Canal

A partir do ano 2010 iniciaram-se as obras de modificação do canal do córrego do Monjolo. De acordo com o projeto, está sendo realizada a modificação do canal de trapezoidal para retangular, do revestimento de gabião para estrutura de concreto armado. As obras não prevêm modificação no traçado longitudinal do canal.

Além disso, a obra será executada em duas etapas, sendo a primeira na área mais crítica de enchentes, iniciando no cruzamento da Avenida Fátima Porto com a Rua Olyntho da Rocha Filgueira até a estaca 72, situada 110 metros a jusante do cruzamento da ponte da

Avenida Brasil, reconstruindo 1.440 metros (Estacas 1 a 72). A Figura 4.10 apresenta uma seção transversal da estaca 1, na parte inferior têm-se as cotas do terreno com as distâncias, no sentido direita e esquerda, que serão organizadas em tabelas separadas de cada seção.

Figura 4.10 – Seção Transversal da Estaca 1.



Fonte: PMPM

Salienta-se aqui, que o trecho canalizado por esta obra corresponde ao trecho de canal simulado pelo programa. Isto ocorre porque os dados das seções transversais são bem definidos pelo projeto, o que reduz possíveis incertezas decorrentes do conhecimento incompleto das formas e revestimentos das seções. Além disto, as simulações podem trazer prognósticos sobre a eficiência do novo projeto, estimando possíveis focos inundáveis nas adjacências do novo canal, para diferentes cenários de precipitação sobre a bacia do Córrego do Monjolo. Diante disto, optou-se por não realizar a propagação de cheias no trecho em que o canal escoar em seção natural.

Para alimentar o modelo hidráulico de propagação de cheia, foram extraídos do projeto as informações de cotas altimétricas, largura de cada seção, altura da calha e distância entre as diferentes estacas. Essas informações têm o intuito de alimentar o modelo hidráulico de propagação de cheia. Este modelo necessita de informações detalhadas das seções transversais porque uma generalização pode trazer uma modificação considerável na área de enchente estimada pelos cálculos. Desta forma, os dados com as distâncias laterais do eixo do canal (direita e esquerda) foram coletados para melhor caracterizar o canal.

As paredes laterais e de fundo do canal são de concreto, sendo que o conhecimento destas características é importante para impor o coeficiente de rugosidade de Manning deste material, nas equações que regem o modelo hidráulico. Na eventualidade de transbordamento da água, foi imposto para a planície de inundação o coeficiente de rugosidade do asfalto. Nessas circunstâncias, o código base realiza uma composição entre os dois coeficientes para obter um parâmetro de rugosidade de Manning equivalente.

4.2.5 Levantamentos de Campo

O levantamento de campo foi realizado para averiguação da infraestrutura urbana na Bacia do Córrego do Monjolo. Esta verificação foi realizada mediante coletas de dados, como entradas de água pluvial e cálculo de vazão inicial (sem precipitação) em uma seção próxima do início do trecho analisado. Estes trabalhos de campo propiciaram o aumento no número de informações sobre a Bacia do Córrego do Monjolo para alimentação dos modelos hidrológicos e hidráulicos.

O reconhecimento da área e a sua formação já foram comentados no capítulo que tratou da caracterização da área. Porém, também foram necessárias localizações dos pontos de chegada das galerias de água pluvial e o levantamento do revestimento do canal, que na área artificial é concreto. Assim, para a realização deste levantamento, buscou-se a coleta de coordenadas e cotas por *Global Positioning System* (GPS) de navegação ao longo da canalização do Córrego do Monjolo, que contempla a Avenida Fátima Porto.

Assim, constatou-se que as galerias de água pluvial deságuam em 112 pontos ao longo dos 2330 m do trecho canalizado. Esta grande quantidade de pontos de deságue foi modelada como contribuições distribuídas ao longo do comprimento do trecho, conforme uma das características do código base. É conveniente lembrar que o presente estudo também leva em consideração uma vazão concentrada, injetada na interseção do Córrego do Monjolo com o Córrego das nascentes do Parque do Mocambo.

Também é necessária, para inicializar o modelo, uma vazão inicial de estiagem. Esta foi levantada utilizando o método do flutuador com uma garrafa plástica abandonada em uma

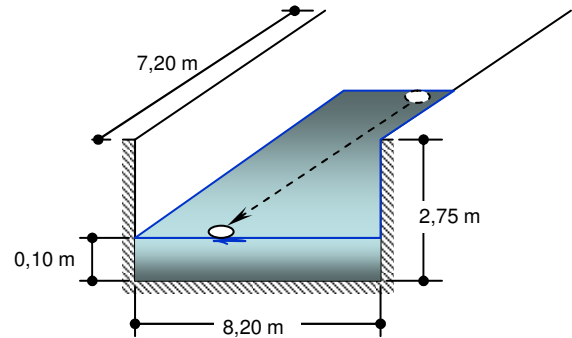
determinada seção (Figura 4.11), próxima do trecho inicial do canal. As medidas apresentadas na Figura 4.12 foram considerados com o intuito de obter a vazão inicial (Q_o).

Figura 4.11 – Seção utilizada para levantamento da vazão inicial.



Fonte: CAIXETA, 2012

Figura 4.12 – Medidas do canal para cálculo da vazão inicial, no trecho de percurso do flutuador.



Para calcular esta vazão, utilizou-se a equação 4.12.

$$Q_o = A.V = A.0,9\left(\frac{\Delta S}{\Delta t}\right) \quad (4.12)$$

Na Equação 4.12:

A: área molhada da seção [m^2];

V: velocidade média na seção transversal [m/s];

ΔS : deslocamento do flutuador [m], medido entre duas seções;

Δt : variação do tempo [s] para ocorrência do deslocamento ΔS .

Através do levantamento de campo, das características do projeto, do cálculo do CN e áreas permeáveis e impermeáveis, da equação de chuva e das características do terreno, possibilita-se a aplicação dos modelos hidrológicos e hidráulicos.

4.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Neste item, abordam-se os principais aspectos na formulação específica do modelo hidrológico aplicado nas simulações que são o tempo de concentração (t_c), a especificação de áreas contribuintes e o Método Santa Bárbara. Com isto, após o levantamento dos dados obtidos na aquisição de informações mais os aspectos seguintes levantados propicia a aplicação dos modelos.

4.3.1 Tempo de Concentração (t_c)

O tempo de concentração como já definido no capítulo 2 é fundamental na alimentação do modelo hidrológico. Para o cálculo do t_c podem-se aplicar diferentes fórmulas (empíricas ou representação de ajuste de curvas) de acordo com as características da área, como rural ou urbana.

Rezende (2012) ao estudar a drenagem urbana utilizou equações considerando o uso e ocupação do solo e o grau de impermeabilização da bacia. Além disto, é mais adequado para áreas urbanas o Método de Germano e o Método do SCS lag fórmula. Tais métodos consideram o efeito das áreas impermeáveis e do número CN na redução do tempo de concentração das bacias. Porém, ao verificar os elementos que alimentam o método SCS lag fórmula, percebeu-se uma imprecisão nos valores de declividade da bacia, não viabilizando a utilização deste método. Esta imprecisão deriva do fato das curvas de nível, na cabeceira da bacia, apresentarem grande espaçamento no arquivo fonte, contendo a base de dados planialtimétricos. Assim, aplicou-se o Método Germano, apresentado equação 10.

$$t_c = 18,628 \cdot \frac{L^{0,882}}{i_{mp}^{0,272}} \quad (4.13)$$

Equação 4.13:

T_c : tempo de concentração da bacia (min);

L: comprimento do talvegue principal (km);

i_{mp} : porcentagem impermeável na bacia (%).

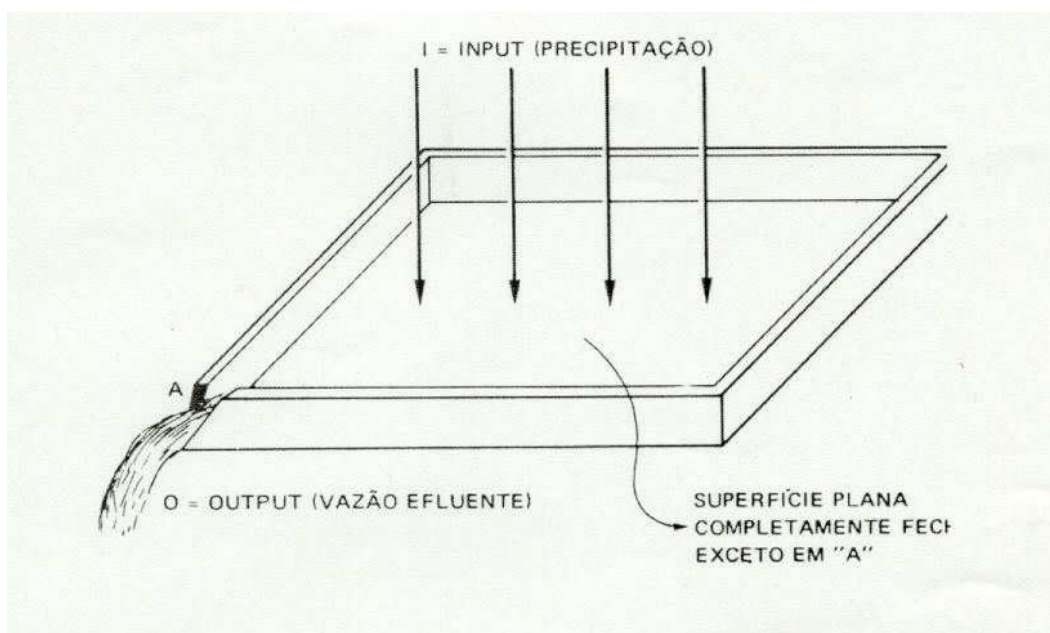
Destaca-se que, conforme o crescimento da urbanização e o aumento da impermeabilização, impostos nos diferentes cenários de simulação, os tempos de concentração foram sempre recalculados.

4.3.2 Método Santa Bárbara e áreas de contribuição

O método Santa Bárbara foi desenvolvido pelo engenheiro James. M. Stubchaer do Flood Control and Water Conservation District, do município de Santa Bárbara, na Califórnia, EUA. Ele apresentou o método à comunidade científica no Simpósio Nacional (EUA) de hidrologia urbana e controle de sedimentos, realizado em Lexington, Kentucky em julho de 1975. (ZUFFO, LEME, 2010)

De acordo com Tomaz (2002), este método é indicado para áreas de até 50 km². O método calcula o hidrograma através das áreas de contribuição. Uma das grandes vantagens deste método consiste no fato de ser possível gerar vários hidrogramas variando o intervalo de tempo e também a vazão de pico. Com a vazão de pico é possível calcular situações extremas de enchentes. A Figura 4.13 apresenta o reservatório imaginário utilizado para ilustrar o Método Santa Bárbara.

Figura 4.13 – Seção Modelo de sistema hidrológico simples.



Fonte: Tomaz, 2002, p.11-211

Se adotar-se um dado ponto no exutório da bacia, antes do início da chuva, a vazão de água gerada exclusivamente pelo escoamento superficial e que passa por esse ponto é nula. Com o aumento do escoamento superficial, a vazão nesse ponto aumenta até atingir um valor máximo para, então, começar a decrescer até que se anule novamente. (TOMAZ, 2002).

O método Santa Bárbara aborda a Bacia Hidrográfica como um reservatório imaginário como está ilustrado na Figura 4.13. É necessário calcular a precipitação excedente para cada intervalo de tempo, o que, no presente estudo, foi feito pelo método apresentado pelo Soil Conservation Service (SCS). Diante disso, foi necessário calcular o número CN resultante como base no uso do solo.

Para a aplicação do Método Santa Bárbara, utilizaram-se as seguintes equações para o cálculo do hidrograma.

$$I = [i \cdot d + i_e (1.0 - d)] A \quad (4.14)$$

Equação 4.14:

I= entrada do reservatório imaginário (m³/s);

i= precipitação total da chuva no intervalo Δt (m/s);

i_e = escoamento da chuva excedente;(m/s)

d= fração da área impermeável em relação a área total;

A= área total de drenagem (m²)

Porém é necessário realizar alguns cálculos anteriores para fornecer os dados de entrada:

$$\text{Coeficiente de retardo} \quad k_r = \frac{\Delta t}{2 \cdot t_c + \Delta t} \quad (4.15)$$

$$\text{Potencial máximo de retenção após começar o runoff (mm)} \quad S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.16)$$

$$\text{Fração de área impermeável:} \quad d = \frac{A_i}{A_{total}} \quad (4.17)$$

Estimativa do runoff:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4.18)$$

Sendo:

Q = *runoff* ou chuva excedente (mm);

P = precipitação (mm);

I_a = abstração inicial (mm);

S = potencial máximo de retenção após começar o runoff (mm).

Vazão de saída do reservatório imaginário

$$Q_j = Q_{(j-1)} + k_r (I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}) \quad (4.19)$$

Equação 4.19:

Q_j : vazão saída do reservatório;

$Q_{(j-1)}$: vazão no instante de tempo anterior;

K_r : coeficiente de retardo;

$I_{(j-1)}$: instantânea do reservatório imaginário;

$I_{(j)}$: instantânea do reservatório imaginário.

Na equação (4.19), a vazão de saída do reservatório imaginário corresponde à vazão que é representada no hidrograma.

Diante das equações, o cálculo pelo método Santa Bárbara é obtido por passo de tempo, propiciando uma interação com a discretização da área da Bacia do Córrego do Monjolo. No modelo computacional aplicado, os hidrogramas são calculados para exutórios de áreas de contribuição pré-fixadas pelo usuário do programa. Conforme já foi comentado na apresentação dos fundamentos do código base, essas áreas de contribuição são acumulativas de forma que a última delas equivale à área total da bacia. No presente estudo, foram consideradas as seguintes áreas de contribuição:

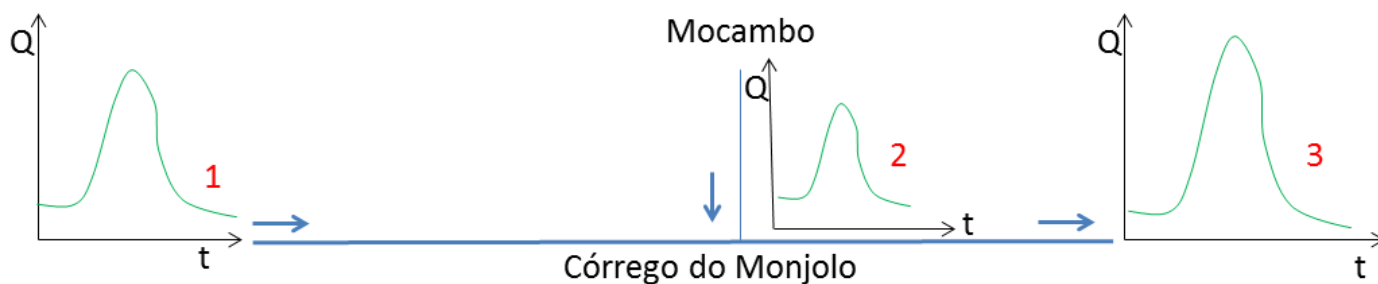
- Área drenada pela seção inicial do trecho canalizado: compreende setores de montante, onde a bacia apresenta áreas remanescentes com baixo índice atual de ocupação urbana;
- Área drenada pela seção final do trecho canalizado: compreende, além das áreas remanescentes supracitadas, as zonas mais ocupadas da bacia;

- Área drenada pelo exutório do Córrego do Mocambo: compreende a sub-bacia deste curso de água, que é o afluente principal no trecho analisado.

As áreas de contribuição foram divididas em três, em função do setor de montante ainda apresentar baixo índice de ocupação, fornecendo números CN menores do que os setores centrais e de jusante, onde o grau de ocupação é mais acentuado. Além disso, tem-se a caracterização da sub bacia do Córrego das nascentes do Parque do Mocambo, por causa do histórico de enchentes do local.

Com estas três áreas de contribuição, o Método Santa Bárbara gera três hidrogramas que alimentam o modelo hidráulico de propagação. Estes hidrogramas são ilustrados pelo diagrama unifilar da Figura 4.14. Neste diagrama, o hidrograma 1 corresponde às vazões decorrentes do escoamento superficial que passam pela seção inicial do canal. Vale lembrar que esta seção não corresponde à nascente do Córrego do Monjolo, mas apenas ao início do trecho canalizado com seção retangular de concreto. O hidrograma 2 fornece a contribuição pontual injetada pelo Córrego do Mocambo. O hidrograma 3 representa as vazões geradas pelo escoamento superficial na seção final do trecho sob análise.

Figura 4.14 – Hidrogramas calculados em três seções específicas do trecho analisado



De acordo com os fundamentos do código base, os hidrogramas 3 e 1 são subtraídos, fornecendo uma vazão que, a cada instante, é distribuída lateralmente ao longo de todo o trecho analisado. Esta distribuição difusa de vazão simula as contribuições das diversas galerias que deságuam no trecho.

4.4 MODELO HIDRÁULICO

O modelo hidráulico, conforme já foi citado, baseia-se nas equações de onda cinemática, permitindo estimar a propagação de cheias ao longo do canal, prevendo eventuais transbordamentos com inundações de áreas adjacentes. O modelo hidráulico trabalha com um número de seções discretas que deve ser fixada pelo usuário do programa. Neste trabalho, o trecho de canal, com 2330 m, foi discretizado em 1000 seções, perfazendo um espaçamento de 2,33 m entre elas. Salienta-se que o uso de uma quantidade reduzida de seções torna mais impreciso o levantamento de áreas inundáveis, além de contribuir para uma instabilização do modelo numérico de propagação. Neste caso extremo, a solução é destruída em função da obtenção de valores de vazão absurdos (muito elevados ou muito pequenos) e o programa interrompe a execução antes do tempo desejado.

4.4.1 – Busca das condições de regime permanente

Uma etapa preliminar à simulação que relaciona precipitação/enchente propriamente dita consiste na busca das condições do canal em regime permanente. Com isto, são obtidas as profundidades em cada uma das seções discretas do canal, para um valor fixo de vazão. Conforme já foi comentado no início deste capítulo, o código base utiliza o *Standard Step Method* para calcular a relação entre a profundidade e a vazão em uma determinada seção transversal. Apesar disso, este aplicativo do código base permite apenas a fixação de um único valor de vazão, o qual deve ser mantido constante em todo o trecho analisado. Além disso, as simulações tendem a ser instáveis quando o escoamento tende ao regime supercrítico.

Assim, nas primeiras simulações realizadas para a vazão de $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$, levantada em campo, verificou-se que a solução numérica do *Standard Step Method* era destruída pela perda de estabilidade. De fato, pela pequena rugosidade do revestimento de concreto da calha principal, o escoamento tende a ser supercrítico em alguns trechos, atingindo pequenas profundidades. Para evitar os problemas de instabilidade e a consequente supressão de uma solução inicial, o coeficiente de rugosidade de Manning foi aumentado seis vezes, fator que produziu lâminas líquidas mais profundas e garantiu o escoamento em regime subcrítico. Evidentemente que esta solução não fornece as condições iniciais reais,

o que ainda é agravado pelo fato de não ser considerada a contribuição do afluente das nascentes do Parque do Mocambo. Como este afluente escoava por canalizações fechadas, o que dificulta a medição *in loco* de vazão, fixou-se arbitrariamente o valor de 0,5 m³/s, os quais são descarregados no ponto de afluência ao Córrego do Monjolo.

Diante disto, optou-se por utilizar as profundidades do escoamento, obtidas com esta simulação inicial fraca, e simular a passagem de diferentes ondas de cheia, geradas por diferentes tipos de precipitação, verificando a propagação no canal, até que as vazões não mais variassem com tempo. Assim, atingia-se a solução de regime permanente a partir da simulação de regime transiente. Neste caso, utilizou-se o coeficiente de rugosidade de Manning para revestimentos de concreto, sem qualquer tipo de majoração deste parâmetro. A solução de regime permanente era obtida quando o somatório dos resíduos atingia o valor de 1 L/s, fator que estabelecia o final do processamento. A referida condição de parada foi calculada como:

$$\sum_{j=1}^N |Q_j^{n-1} - Q_j^n| < 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.20)$$

Em que: $n-1$ é o nível de tempo anterior e n é o nível de tempo atual, j indica a seção e N , a quantidade de seções na qual o canal foi discretizado.

Com este procedimento, verificou-se que as profundidades finais eram sempre as mesmas, independentemente da perturbação inicial (chuva) estipulada.

4.4.2 – Características da solução em regime transiente

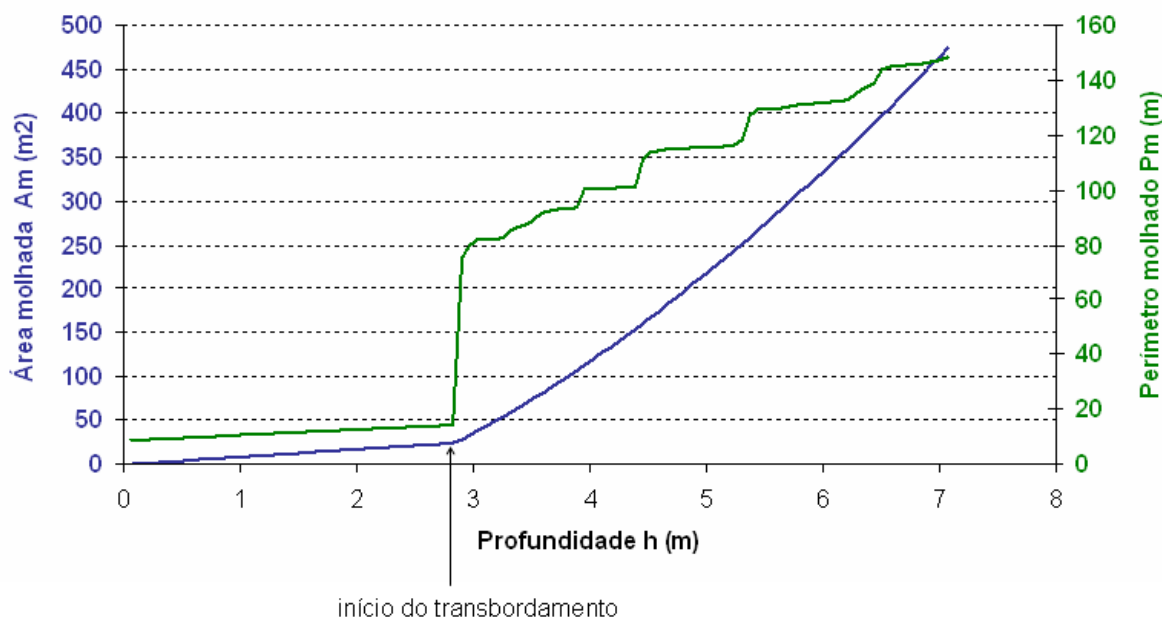
O código atual trouxe algumas alterações, que foram inseridas no código base, com intuito de aperfeiçoá-lo. Neste item, são comentados os principais aspectos destas modificações.

A utilização de curvas-chave de área molhada (A_m) e perímetro molhado (P_m) permite visualizar o comportamento destes parâmetros hidráulicos, em função do aumento da profundidade (h) do escoamento. Assim, no início do processamento do código, antes dos procedimentos iterativos, as relações $A_m \times h$ e $P_m \times h$ são obtidas para todas as seções

discretas. Este procedimento, embora inicialmente moroso, permite um cálculo de áreas e perímetros molhados mais ágil durante o laço iterativo do código, uma vez que estes valores passam a ser obtidos por simples interpolação nas curvas. Neste trabalho, as curvas-chave foram construídas para profundidades de escoamento de até sete metros, valor limite que produz transbordamentos excessivos em todas as seções discretas do canal.

Dessa forma, cobrem-se todas as faixas de profundidade viáveis, desde as mais frequentes (dentro da calha principal do canal) até as esporádicas (com o escoamento avançando pela planície de inundação). A Figura 4.15 ilustra as curvas-chave de área molhada e perímetro molhado, obtidas para uma seção específica do canal. Note-se que as relações deixam de ser lineares quando a água transborda a calha principal e avança pela planície de inundação.

Figura 4.15 – Curvas-chave de área molhada e perímetro molhado para a seção situada a 1 km do início do trecho analisado.



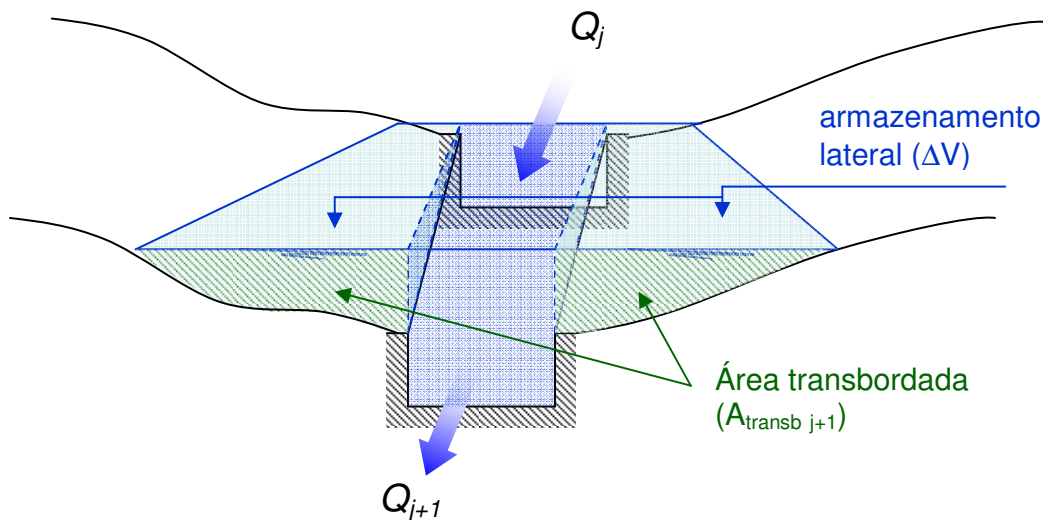
Quando ocorre o transbordamento, a água atinge a planície de inundação, formando um volume de armazenamento lateral transitório que tem velocidade longitudinal muitas ordens de grandeza menor do que a velocidade do escoamento no setor projetado sobre a calha principal. Esta característica pode ser modelada instituindo-se uma condição de

contorno interna de armazenamento lateral, conforme o trabalho de Pires e Barbassa (1997). Com isto, a vazão que passa para a seção seguinte pode ser calculada como:

$$Q_{j+1} = Q_j - \frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_j - \frac{A_{transb\ j+1} - A_{transb\ j}}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta L}{2} \quad (4.21)$$

Na equação (4.21), os sub índices j e $j+1$ indicam, respectivamente, uma seção de montante e uma seção de jusante, Δt é o passo de tempo das simulações e ΔV é o volume armazenado lateralmente entre as duas seções. As áreas transbordadas são calculadas pela diferença entre a área molhada total e a área molhada projetada sobre a calha principal. Ainda na referida equação, ΔL é o espaçamento entre cada seção discreta. A Figura 4.16 ilustra o esquema de armazenamento lateral adotado no presente modelo hidráulico.

Figura 4.16 – Esquema de armazenamento lateral de água na planície de inundação

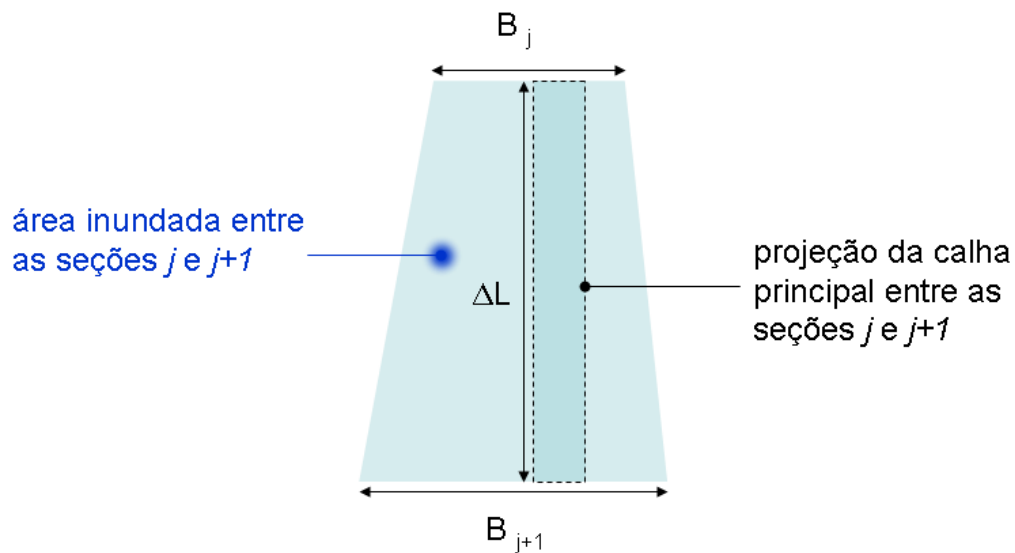


Um outro atributo do modelo hidráulico consiste no cálculo das áreas inundadas em planta. Isto permite delinear zonas que são atingidas pela enchente em cada instante, bem como delinear envoltórias de inundação, registrando zonas que, em pelo menos um instante do evento simulado, foram atingidas pela enchente. Nesse sentido, a área inundada entre duas seções j e $j+1$ pode ser calculada como:

$$A_{IN} = (B_j + B_{j+1}) \cdot \frac{\Delta L}{2} \quad (4.22)$$

Na equação (4.22), B corresponde à largura superficial da seção molhada ou, simplesmente, ao alcance lateral da enchente. Nas seções em que o transbordamento não é verificado, o valor de B é anulado, haja vista que o escoamento ocorre apenas dentro da calha principal. A Figura 4.17 ilustra um esquema que facilita a visualização dos parâmetros do modelo expresso pela equação 4.22.

Figura 4.17 – Esquema de área inundada entre duas seções consecutivas



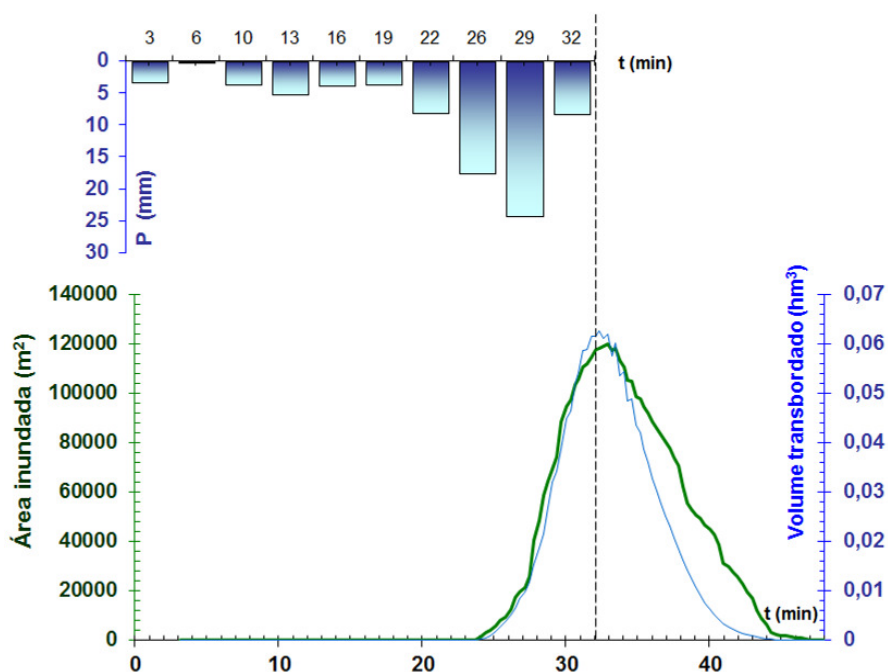
As envoltórias de enchente delimitam todas as áreas que foram atingidas pela inundação em pelo menos um instante desde o início da precipitação. Estas envoltórias são determinadas em função dos alcances máximos das enchentes nas margens direita e esquerda do canal. Como tais alcances são estimados para cada seção discreta, a ligação destes pontos extremos delineia a envoltória de inundação para um determinado cenário de chuva e de ocupação da bacia. O traçado das envoltórias de enchente é um dos atributos do programa computacional utilizado nas simulações.

Quando o somatório das áreas inundadas (ΣA_{IN}) é plotado em função do instante (t) decorrido após o início da precipitação, tem-se um diagrama que, neste trabalho, é chamado de inundograma. A possibilidade de construção de inundogramas constitui um

outro atributo do programa, permitindo identificar a duração da enchente, além dos instantes de crescimento e recessão da inundação.

Com os inundogramas, também é possível localizar o instante crítico em termos de enchente, o qual corresponde ao tempo no qual foi verificado o maior somatório de áreas alagadas, não necessariamente interligadas. A Figura 4.18 ilustra, esquematicamente, um inundograma construído pelo programa. Note-se que o inundograma depende da distribuição temporal da chuva, plotada em um diagrama inverso chamado de hietograma.

Figura 4.18 – Exemplo de inundograma, relacionando a distribuição temporal da chuva ($P \times t$), a área total inundada e o volume total transbordado para diversos instantes.



Portanto, com a metodologia abordada foi possível constituir uma ferramenta importante na quantificação do espaço urbano. Os resultados da aplicação desta metodologia serão apresentados no capítulo seguinte, juntamente com a análise do crescimento urbano no interior da Bacia do Córrego do Monjolo.

CAPÍTULO 5

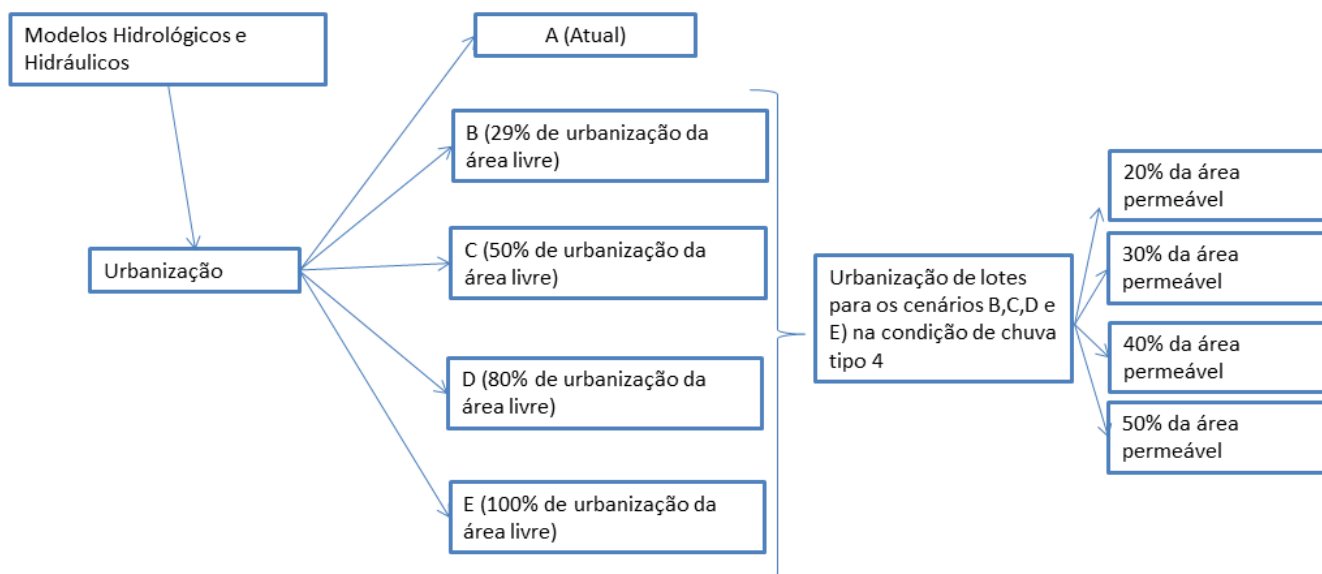
RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos conforme a metodologia apresentada no Capítulo 4. Os resultados estão divididos em três tópicos, sendo que:

- o primeiro tópico é a análise das informações adquiridas para um diagnóstico dos possíveis pontos críticos de enchentes e a alimentação dos modelos hidrológicos e hidráulicos;
- o segundo tópico trata dos resultados das simulações, partindo da condição de urbanização atual para uma condição de ocupação crescente da bacia. Nesses cenários, simulou-se o avanço da urbanização da área remanescente (livre), rumo à cabeceira da bacia;
- o terceiro tópico trata dos resultados de cenários que alteram as taxas de impermeabilização dos lotes.

A Figura 5.1 apresenta um organograma dos cenários simulados. Primeiramente, apresentam-se os cenários do processo de ocupação do solo ao longo da bacia estudada para cada tipo de distribuição temporal de chuva (segundo as curvas de Huff).

Figura 5.1 – Cenários Simulados na Bacia do Córrego do Monjolo

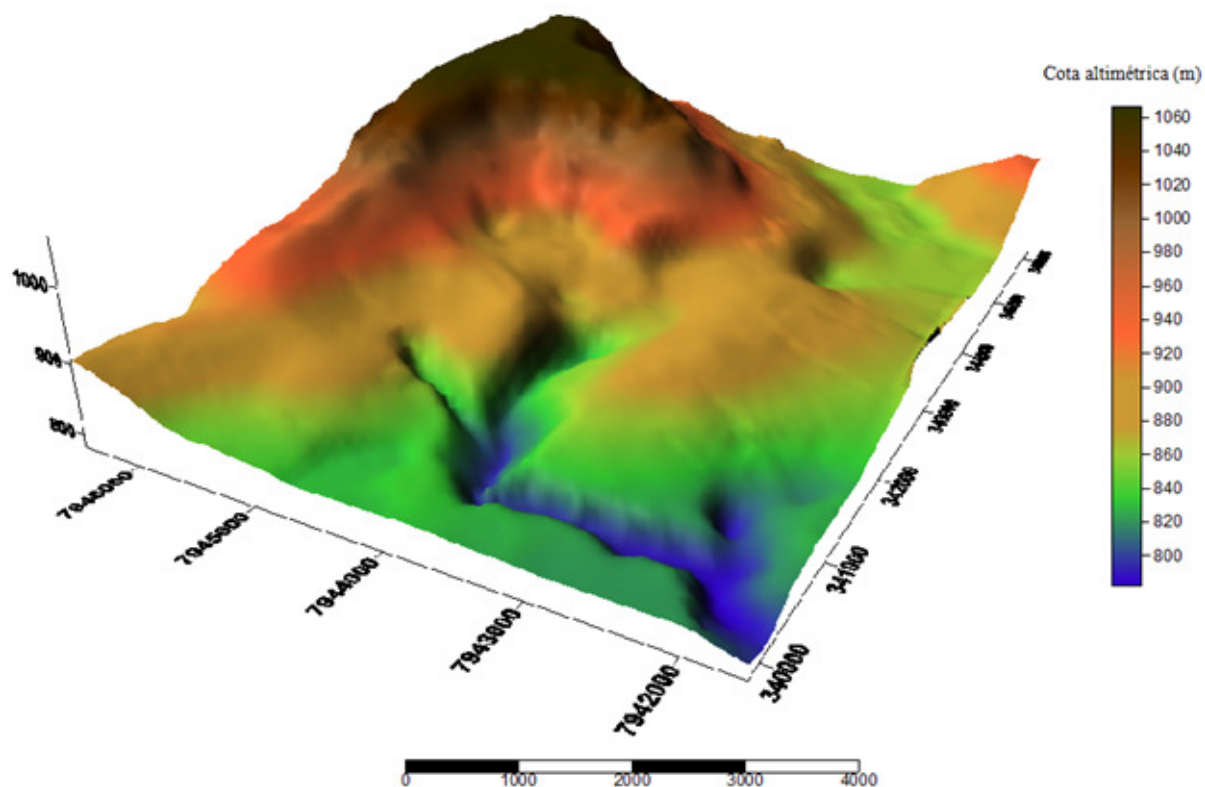


A Figura 5.1 também apresenta os cenários de lotes com uma porcentagem definida para área permeável. A diminuição da área impermeável (aumento da área permeável) de cada lote reflete no aumento do tempo de concentração da bacia, fator que é favorável para a redução de enchentes. Com a modificação das taxas de impermeabilização dos lotes, foram simulados os novos parâmetros para os cenários B, C, D e E para futura urbanização. Os cenários de lotes foram simulados para o tipo de chuva 4, o qual obteve os valores mais críticos. Assim, foi possível realizar uma análise sobre o crescimento urbano na bacia e suas relações com as enchentes.

5.1 ANÁLISE DA BACIA DO CÓRREGO DO MONJOLO UTILIZANDO INFORMAÇÕES ADQUIRIDAS

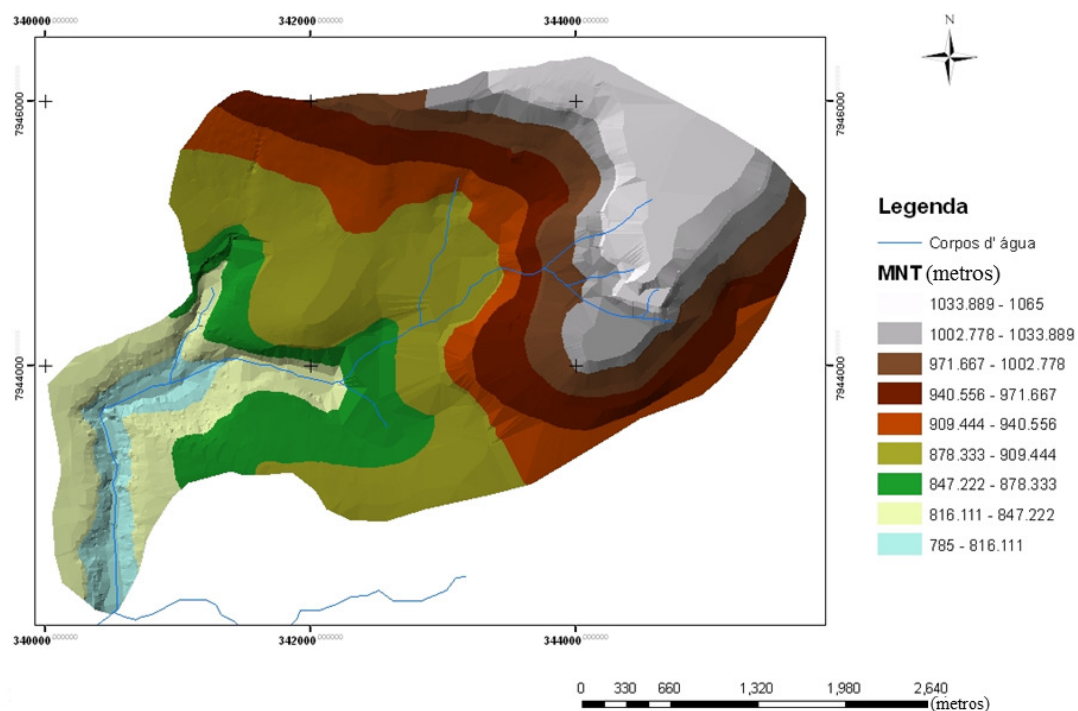
Ao utilizar as informações de curva de nível (utilizou-se a base da COPASA para os setores adjacentes ao Córrego do Monjolo e, para as áreas da bacia mais distantes da calha do canal, utilizou-se a base do SRTM). Com estas bases, foi possível formular o modelo numérico do terreno, o mapa de declividade e o mapa de orientações de vertentes. O modelo numérico de terreno (MNT) pode ser visualizado em 3D (Figura 5.2), permitindo verificar diferenciações abruptas do terreno.

Figura 5.2 – Modelo Numérico do Terreno MNT- 3D



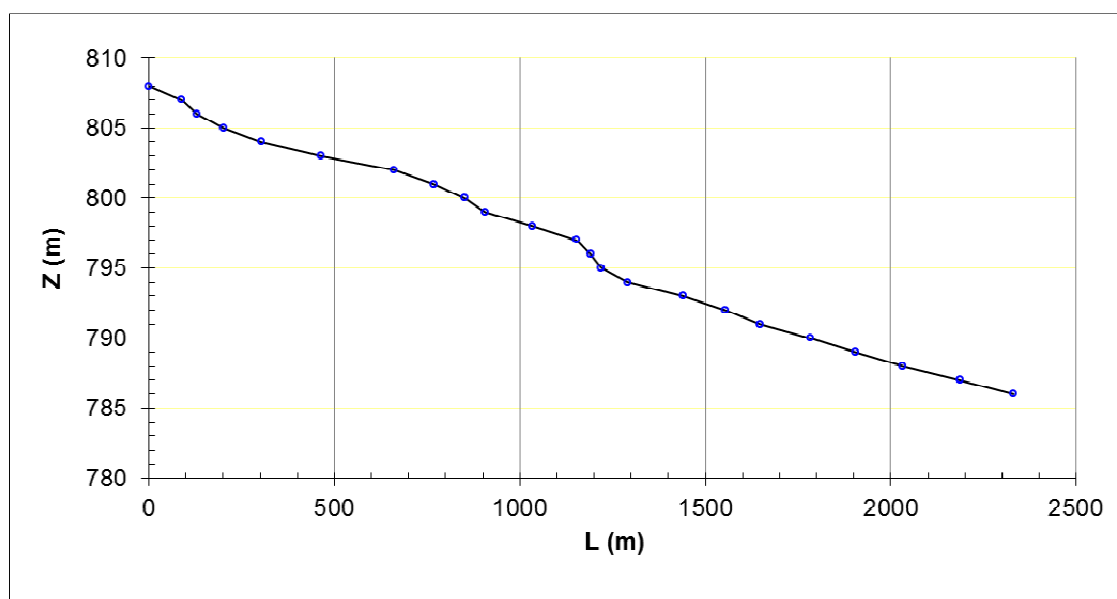
A Figura 5.2 apresenta o modelo MNT, formando uma malha geral retangular, com as cotas altimétricas. Observa-se, próximo ao canal, uma diferença de 50 metros apresentado do azul ao final do verde caracterizando um vale bem definido. Neste sentido, é possível deduzir que, em função do relevo encaixado do vale, a planície de inundação não deve apresentar grande largura, fator que reduz o avanço lateral das eventuais enchentes. A Figura 5.3 ilustra a bacia do Córrego do Monjolo, já delimitada.

Figura 5.3 – Modelo Numérico do Terreno MNT com delimitação da bacia do Córrego do Monjolo



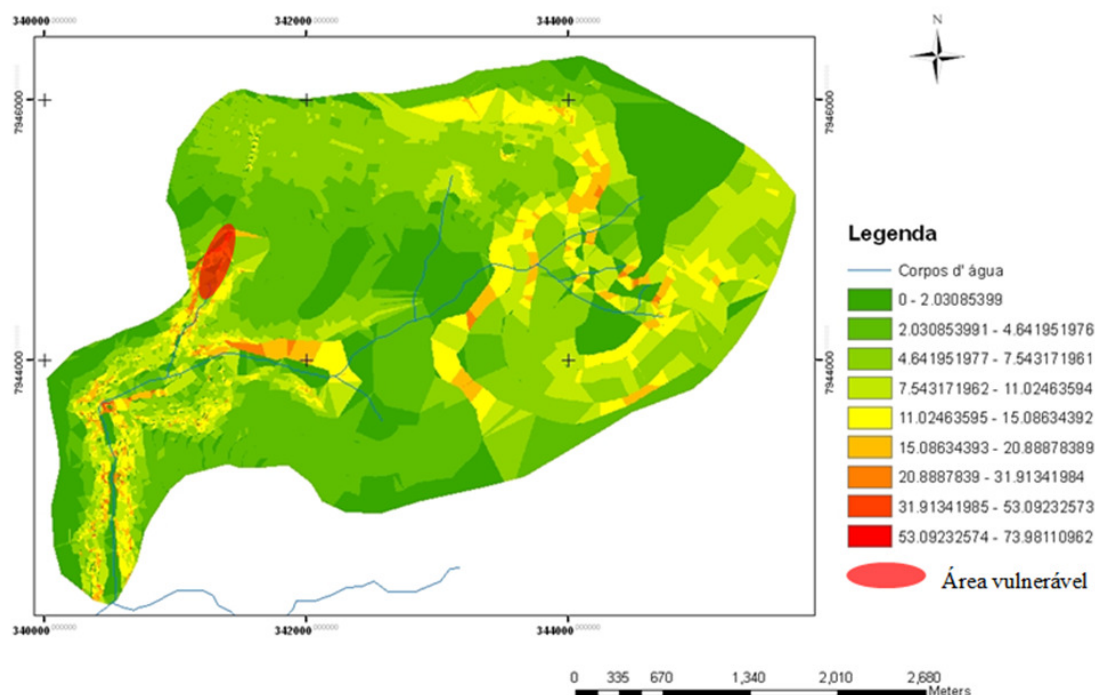
Ainda, foi caracterizado o perfil do canal no trecho artificial de acordo com as cotas altimétricas. A Figura 5.4 apresenta o perfil do canal ao longo do seu comprimento, com um desnível vertical de aproximadamente 15 m no trecho canalizado.

Figura 5.4 – Perfil do canal no trecho canalizado



Já a partir da verificação das inclinações entre as curvas de nível da bacia, gerou-se o mapa de declividade (Figura 5.5). A declividade influencia no balanço hídrico da bacia diretamente, devido ao fato de declividades baixas contribuírem para aumentar a taxa de infiltração, reduzindo a tendência de escoamento superficial. A despeito disto, a umidade antecedente do solo também é outro fator determinante nesse balanço hídrico local.

Figura 5.5 – Mapa de Declividade (%)

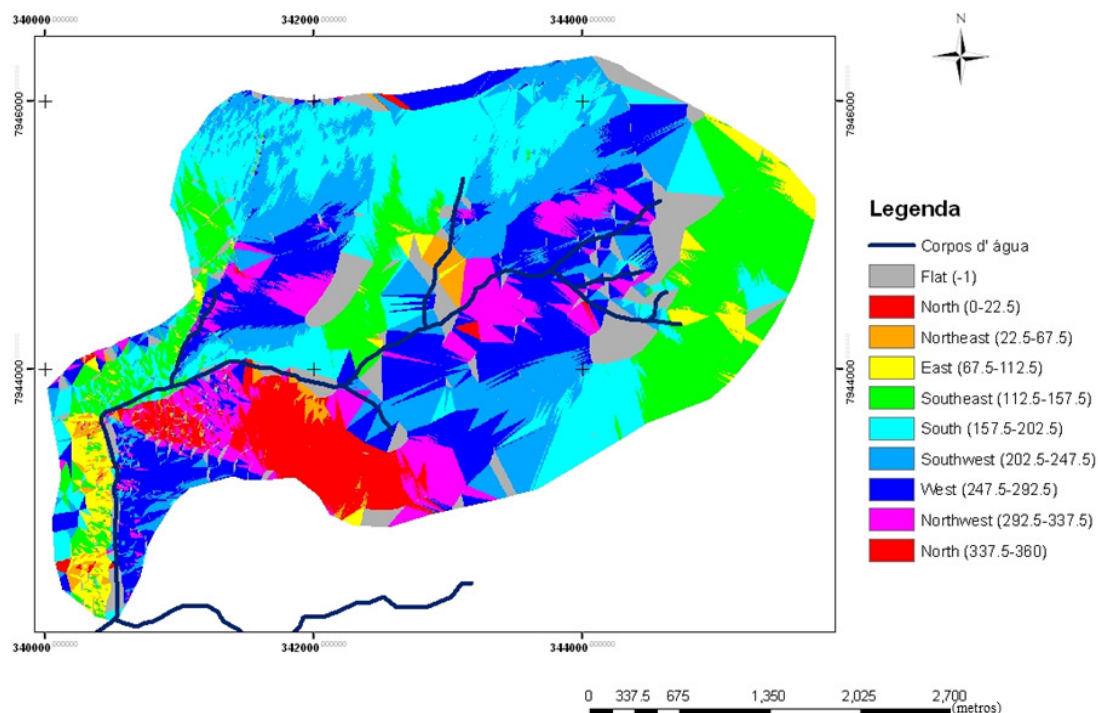


A Figura 5.5 também apresenta a área vulnerável da nascente do Córrego do Mocambo, com grau de declividade abrupta, favorecendo o aumento da velocidade do escoamento superficial.

Outro fator importante para a análise topográfica é a orientação de vertentes. Devido ao comprimento e à forma das vertentes, estas condicionam o volume de água que conseguem permanecer no solo. As vertentes muito curtas possuem pouca capacidade de armazenamento de água e vertentes mais compridas acumulam maior quantidade de água enriquecendo o solo (GUERRA, 2011).

A Figura 5.6 reapresenta o mapa de orientação de vertentes e mostra que, próximo ao canal, elas são curtas e com variações nas orientações do sentido das mesmas. As vertentes são maiores próximas às bordas da bacia e possuem direcionamento suave.

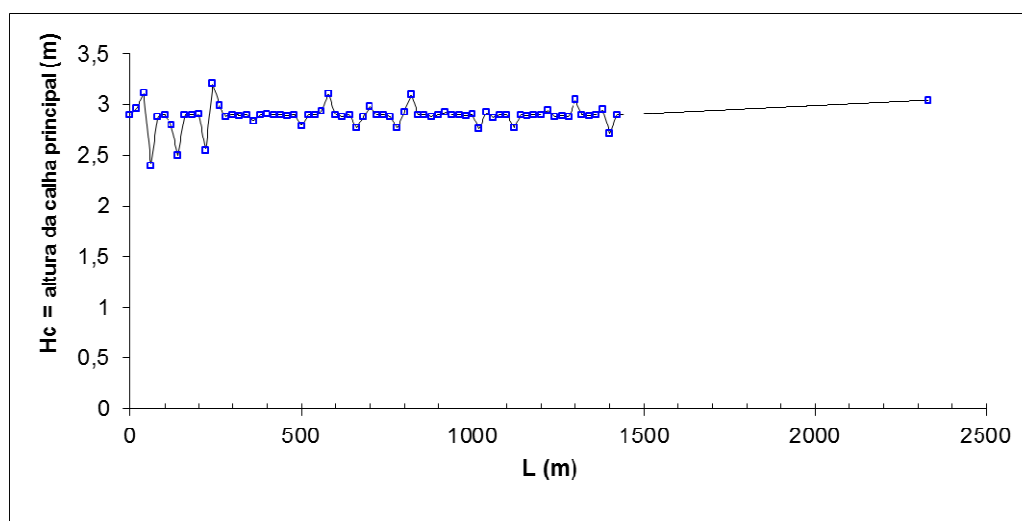
Figura 5.6 – Mapa de Orientação de Vertente



Diante dessa análise topográfica, facilita-se a compreensão do comportamento hídrico da Bacia, em relação aos fluxos do escoamento superficial. Também são importantes as características da geometria do canal, como a largura (constante) e altura da calha, fatores que não sofrem grandes variações, devido ao canal no trecho estudado ser artificial.

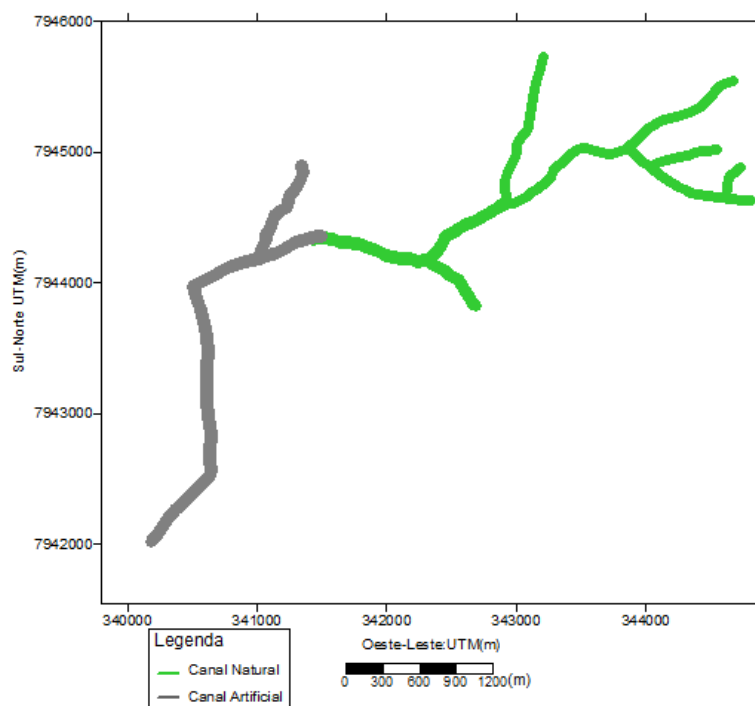
Com isto, a Figura 5.7 apresenta as variações na altura da calha principal ao longo do comprimento analisado. O conhecimento deste parâmetro é importante, haja vista que as inundações ocorrem quando as profundidades do escoamento, calculadas durante a passagem da onda de cheia, superam a altura da calha principal.

Figura 5.7 – Altura da calha principal do canal



Outro parâmetro que não sofreu variação foi o coeficiente de Manning com o valor de 0,014 por causa do revestimento de concreto. O valor deste coeficiente, para a planície de inundação, foi de 0,016, valor padrão utilizado para asfalto. Note-se, pela Figura 5.8, que a montante, o canal possui um revestimento natural. Todavia, a hidráulica do escoamento somente foi analisada no trecho artificial, marcado na cor cinza, na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Revestimento do Canal do Córrego do Monjolo.



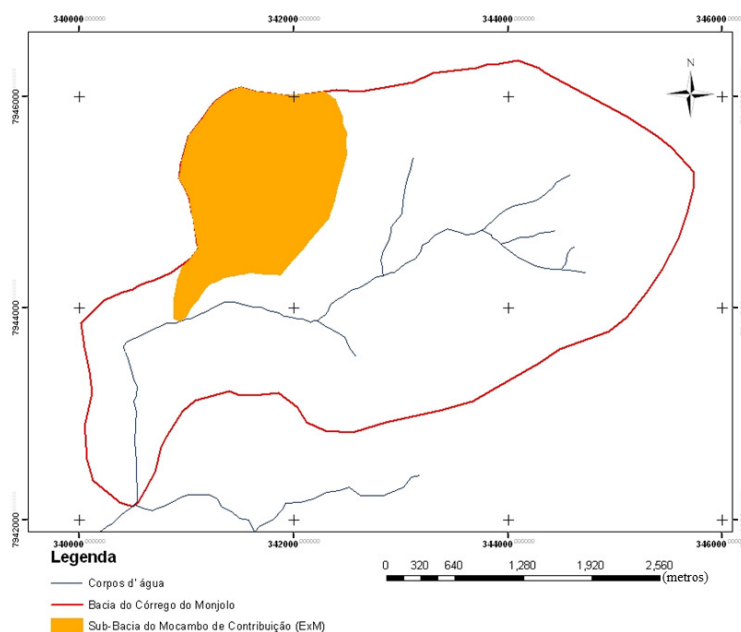
Os parâmetros da geometria do canal são fundamentais para o modelo de propagação de cheias. Assim, o levantamento das características da bacia (MNT geral e malha de

vizinhança, declividade e perfil do canal) e da geometria do canal (altura, largura e coeficiente de rugosidade de Manning) alimentam a simulação da propagação de cheias.

Além disto, também foi necessário realizar o mapeamento do uso do solo que, neste trabalho utilizou a classificação baseada no número CN para bacias urbanas e suburbanas. Além disso, antes de iniciar o mapeamento determinou-se a divisão da bacia em áreas de contribuição e a sub-bacia das nascentes do Parque do Mocambo.

A divisão da área de contribuição da bacia foi determinada conforme a seção natural e artificial, para melhor alimentar os modelos. Além disso, também foi estimado o valor do número CN para a sub-bacia das nascentes do Parque do Mocambo, devido o histórico de problemas de enchentes na área da Avenida Ivan Borges com a Avenida Fátima Porto. Ainda foi realizado um hidrograma para duas áreas de contribuição e a sub-bacia das nascentes do Parque do Mocambo. (Figura 5.9)

Figura 5.9 – Sub-Bacia do Mocambo, correspondente a uma área de contribuição ao Córrego do Monjolo



A Figura 5.10 apresenta a área de contribuição da seção natural para a geração do primeiro hidrograma (E_{x1}). Esta área abrange a periferia da cidade e área rural, o que influencia a transição do comportamento hídrico de área natural para área antropizada.

E por fim, a Figura 5.11 apresenta a área de toda a bacia que é a área de contribuição E_{x2} .

Figura 5.10 – Área de Contribuição da seção natural

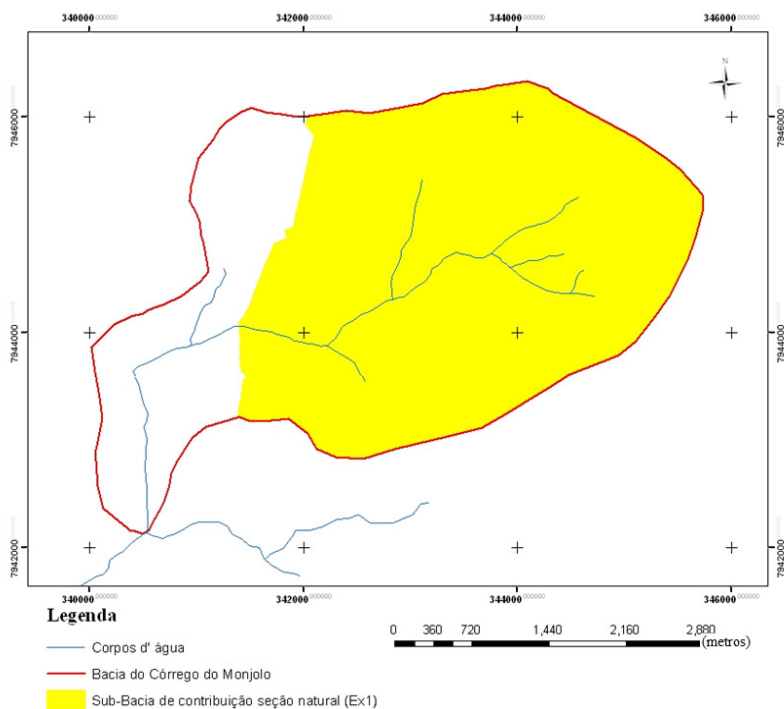
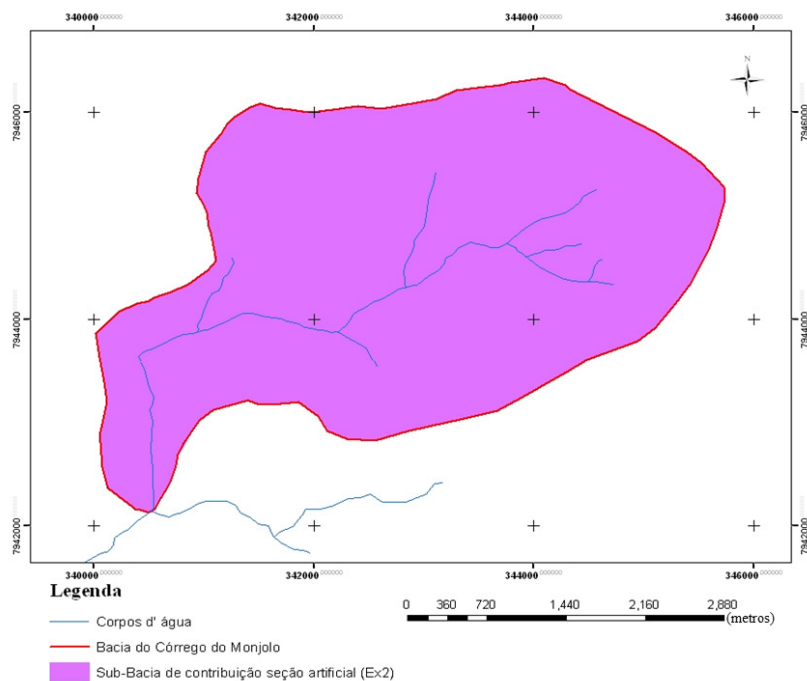


Figura 5.11 – Área de Contribuição da bacia do Córrego do Monjolo



Para cada área de contribuição foram obtidos valores de CN, tempo de concentração (t_c), área total e área impermeável. Os valores da condição atual da área de estudo estão

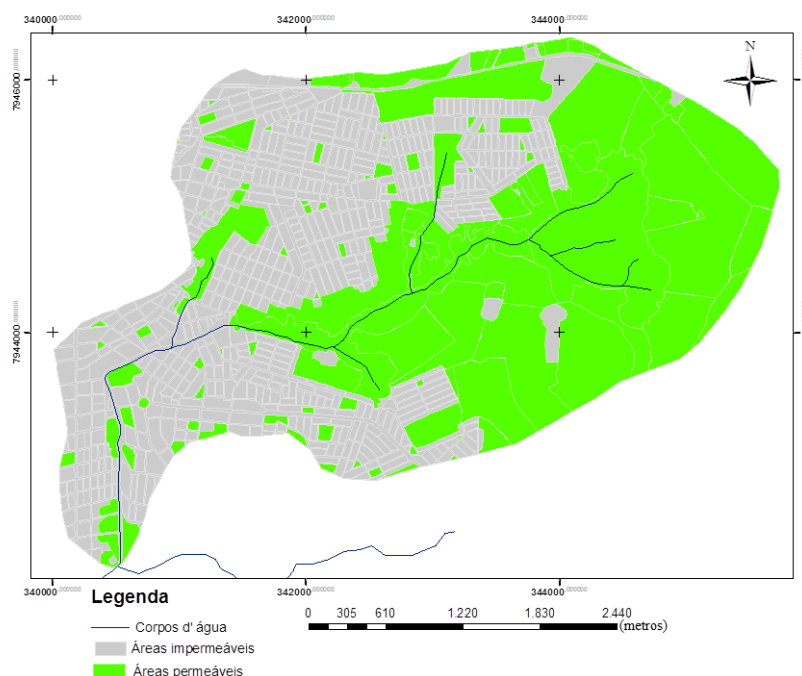
apresentados na Tabela 5.1. Além disso, também são apresentados os mesmo valores para sub-bacia do Parque do Mocambo.

Tabela 5.1 – Valores iniciais para aplicação dos modelos

Sub-Bacia	CN	tc (min)	Área Total (m ²)	Área Impermeável (m ²)
Área de contribuição seção natural (Ex1)	84,9	28,66	10679251,4	3527350,55
Área de contribuição seção artificial (Ex2)	86,2	50,38	14217489,5	6732397,49
Sub-Bacia do Mocambo de Contribuição (ExM)	89,3	4,69	2293830,94	1963978,053

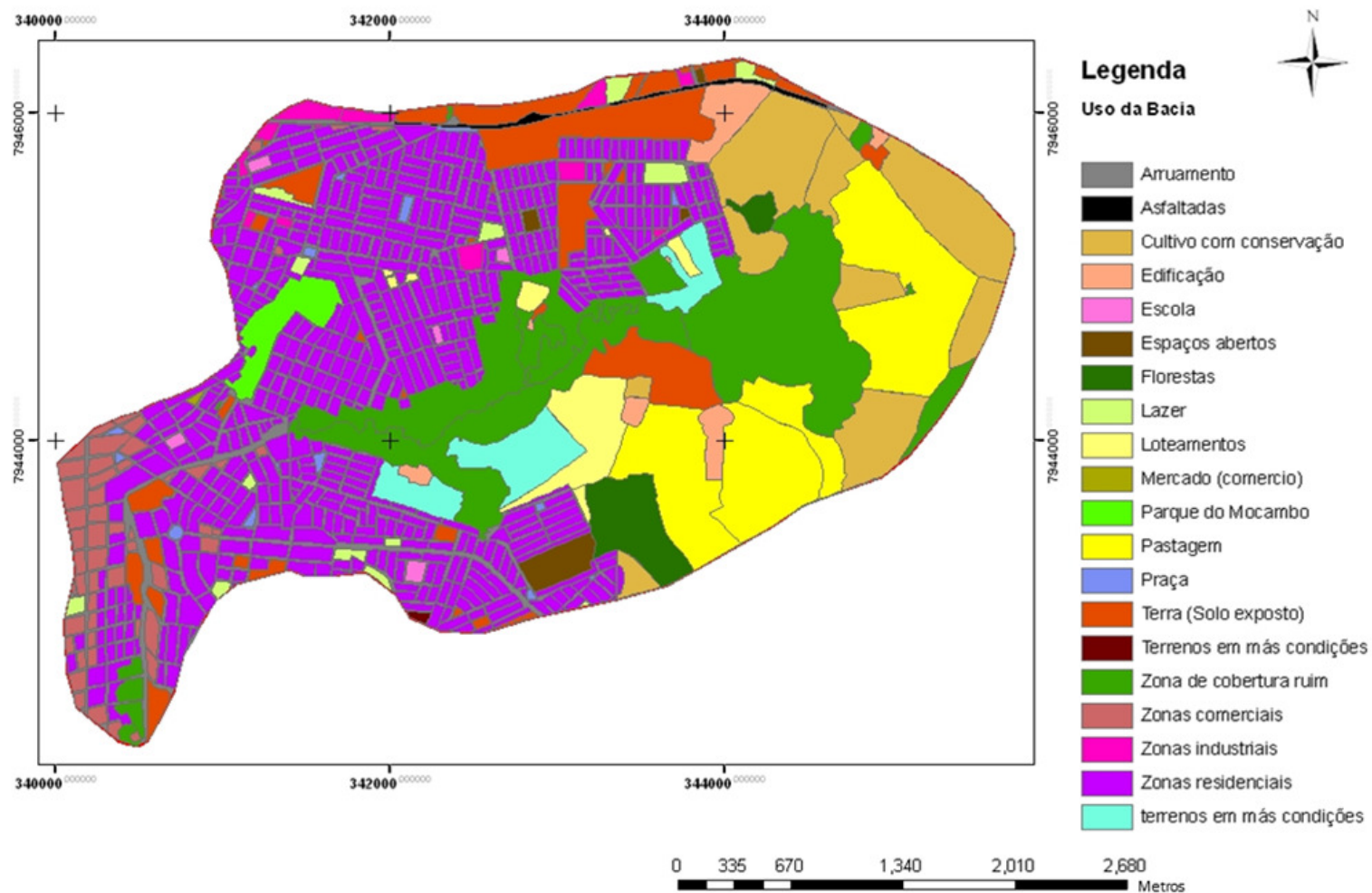
Com base na metodologia proposta para a classificação do uso do solo no capítulo anterior, foi realizado o mapeamento das formas de ocupação da bacia. Também as áreas permeáveis e impermeáveis são apresentadas na Figura 5.12, podendo verificar que, a jusante do trecho artificial canal, ainda há muitas áreas permeáveis remanescentes, porém propícias à urbanização. Na cabeceira da bacia, há áreas permeáveis, situadas fora do limite da zona urbana.

Figura 5.12 – Áreas permeáveis e impermeáveis



Na Figura 5.13 são apresentados os diversos usos do solo, identificados neste trabalho e utilizados para o cálculo do número CN das áreas de contribuição obtidas pela discretização da Bacia.

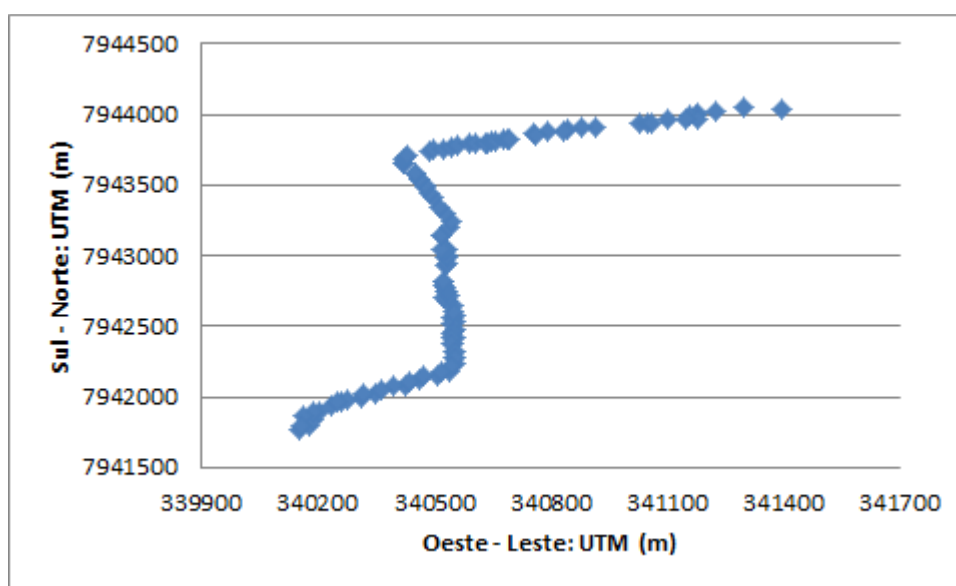
Figura 5.13 – Mapa de uso do solo na Bacia do Córrego do Monjolo



5.2.1 Levantamentos de campo ao longo do comprimento do canal

No levantamento de campo, também foram identificados os pontos onde as galerias adicionam ao canal, a água pluvial coletada pelo sistema de microdrenagem. Note-se que esses pontos encontram-se bem distribuídos ao longo do canal, fator que corroborou para a adoção de uma vazão distribuída, obtida pela diferença entre os hidrogramas da bacia total e da área de contribuição de montante (no trecho de seção natural). Assim, na Figura 5.14 têm-se as entradas no canal das galerias de água pluvial.

Figura 5.14 – Afluência de galerias de água pluvial ao longo do Córrego do Monjolo.



Ao longo do canal foram percebidas algumas particularidades relevantes para o estudo, que estão listadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Contas de pontos relevantes para o estudo

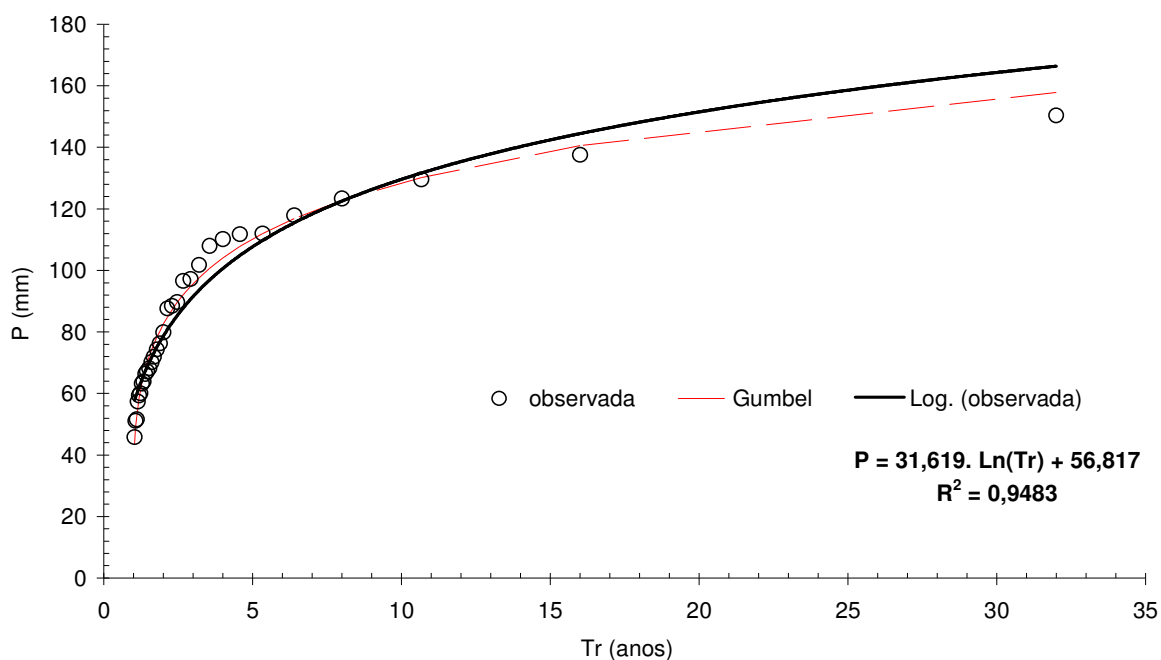
Observação/ Característica	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Cota (m)
Ponto o qual inicia a canalização (início do trecho analisado)	341415.000	7944093.000	807
Ponto do exutório do Córrego do Mocambo (principal contribuição pontual)	340944.000	7943922.000	800
Ponto da Ponte da Avenida Brasil (final do trecho analisado)	340507.000	7943391.000	793

Estas particularidades podem ser constatadas por causa do histórico de enchentes e do fluxo de pessoas na via, devido à Avenida Fátima Porto ser edificada como uma avenida de trânsito rápido.

5.2.2 Equação de Chuva de Patos de Minas

A aplicação do Método de Gumbel e de uma linha de tendência logarítmica permitiu a obtenção de duas curvas que podem representar os dados da série de precipitações máximas utilizadas. Estas curvas são ilustradas pela Figura 5.15.

Figura 5.15 – Curvas P x Tr, com dados observados, com as aproximações pelo método de Gumbel e pela linha de tendência logarítmica.



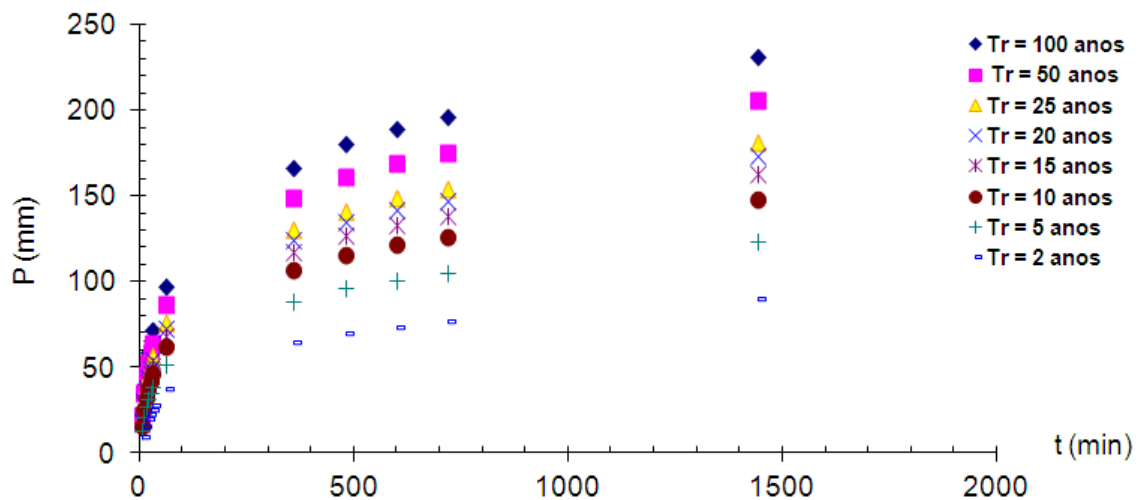
A linha de tendência representada pela função $P = 31,619 \cdot \ln(Tr) + 56,817$ apresentou coeficiente de determinação de 0,9483. Este valor, próximo da unidade, indicou uma aderência adequada aos dados originais. A função da linha de tendência propicia a determinação da precipitação conforme os tempos de retorno (Tr) arbitrados. Neste caso, há a análise temporal do Tr de 100, 50, 25, 20, 15, 10, 5 e 2 anos. Após a arbitragem do Tr, tem-se a conversão das alturas pluviométricas para dados de pluviógrafos, com os desmembramentos no período de 24 em 24 horas (Figura 5.16).

Figura 5.16: Alturas pluviométricas (mm) nos determinados Tr

transformação	fator	t(h)	t(min)	alturas pluviométricas (mm)							
				Tr (anos)							
				100	50	25	20	15	10	5	2
1 dia				186,3019	166,7184	147,1349	140,8304	132,7025	121,2469	101,6634	75,77549
1 dia - 24 h	1,14	24	1440	212,3841	190,059	167,7338	160,5467	151,2809	138,2215	115,8963	86,38406
24 h - 12 h	0,85	12	720	180,5265	161,5501	142,5737	136,4647	128,5888	117,4883	98,51188	73,42645
24 h - 10 h	0,82	10	600	174,155	155,8483	137,5417	131,6483	124,0503	113,3416	95,03499	70,83493
24 h - 8 h	0,78	8	480	165,6596	148,246	130,8324	125,2264	117,9991	107,8128	90,39914	67,37956
24 h - 6 h	0,72	6	360	152,9166	136,8425	120,7683	115,5936	108,9222	99,51949	83,44536	62,19652
24 h - 1 h	0,42	1	60	89,20134	79,82476	70,44819	67,42961	63,53798	58,05303	48,67646	36,2813
1 h - 30 min	0,74	0,5	30	66,00899	59,07032	52,13166	49,89791	47,0181	42,95924	36,02058	26,84816
30 min - 25 min	0,91		25	60,06818	53,754	47,43981	45,4071	42,78647	39,09291	32,77873	24,43183
30 min - 20 min	0,81		20	53,46728	47,84696	42,22664	40,41731	38,08466	34,79699	29,17667	21,74701
30 min - 15 min	0,7		15	46,20629	41,34923	36,49216	34,92854	32,91267	30,07147	25,21441	18,79372
30 min - 10 min	0,54		10	35,64485	31,89798	28,1511	26,94487	25,38978	23,19799	19,45111	14,49801
30 min - 5 min	0,34		5	22,44306	20,08391	17,72476	16,96529	15,98616	14,60614	12,247	9,128376

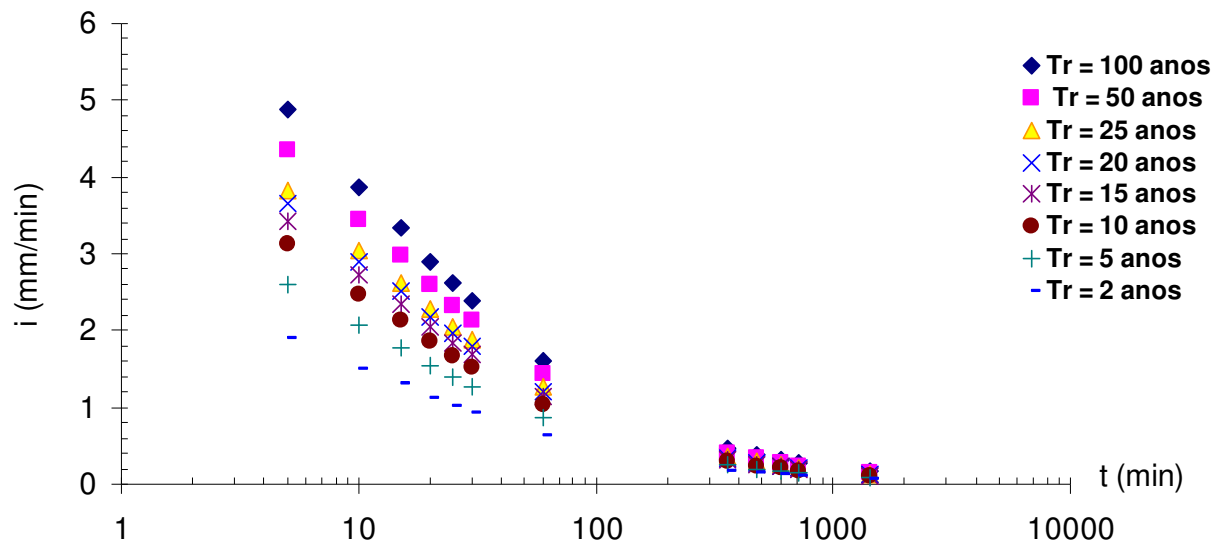
As alturas pluviométricas relacionadas ao Tr são representadas pela família de pontos da Figura 5.17.

Figura 5.17 – Curvas alturas pluviométricas (mm), obtidas como função da sua duração e período de retorno.



A família de pontos geradas a partir da função logarítmica interpoladora/extrapoladora é ilustrada pela Figura 5.18.

Figura 5.18 – Curvas de intensidade de precipitação, obtidas como função da sua duração e período de retorno.

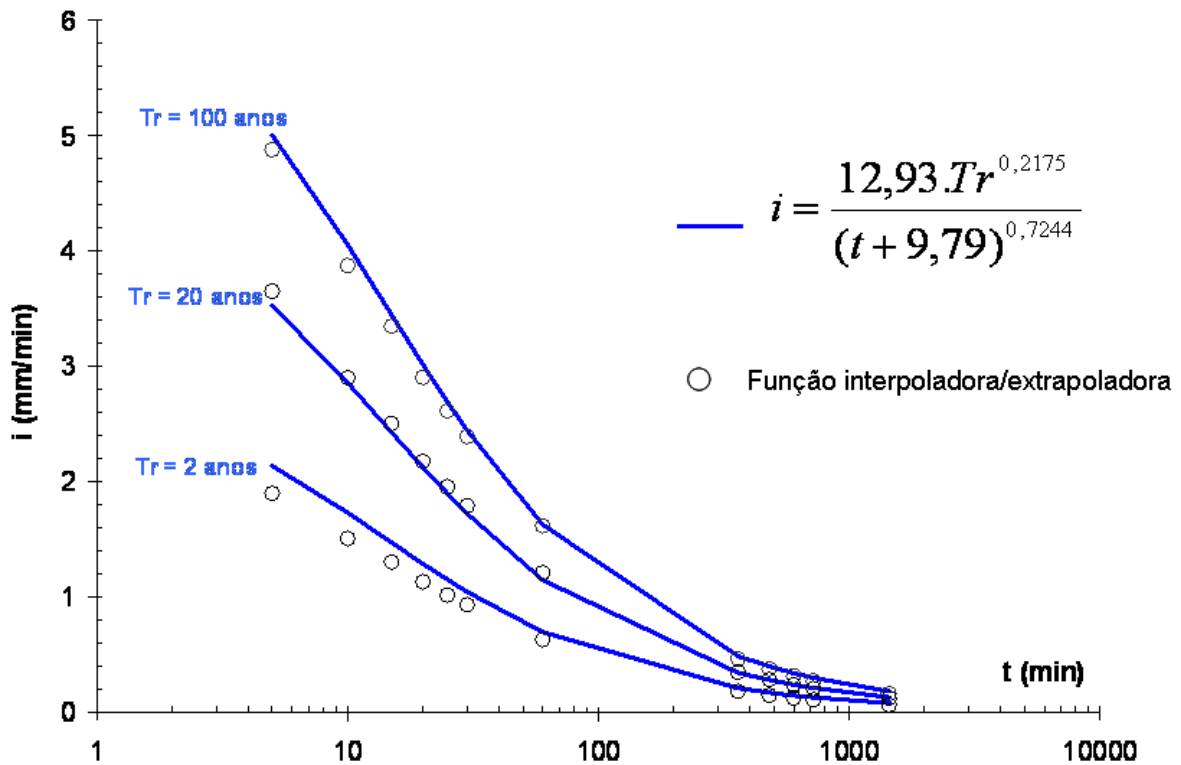


Com base nas alturas pluviométricas divididas pelo tempo, calculou-se a intensidade da chuva e foi gerada a função de intensidade, duração e frequência (IDF) que é a equação de chuvas intensas para o município de Patos de Minas. Esta equação finalmente é escrita como:

$$i = \frac{12,93.Tr^{0,2175}}{(t+9,79)^{0,7244}} \quad (17)$$

Na equação (17), a intensidade (i) é obtida em mm/min, para entradas de duração (t) em minutos e período de retorno (Tr) em anos (Figura 5.19)

Figura 5.19 – Curvas de intensidade de precipitação: comparações entre a equação de chuva proposta e os dados obtidos pela função logarítmica.



Pela figura 5.19, percebe-se que os resultados obtidos com a aplicação da equação proposta, apresentam aderência apropriada com os dados trabalhados estatisticamente.

5.2.3 Condições iniciais (regime permanente)

No caso de estudo, o canal sofre a perturbação somente do escoamento superficial gerado pela precipitação. Isto é, o escoamento do canal é de regime estacionário até o início da chuva, o que gera o escoamento superficial modificando a dinâmica do regime do canal.

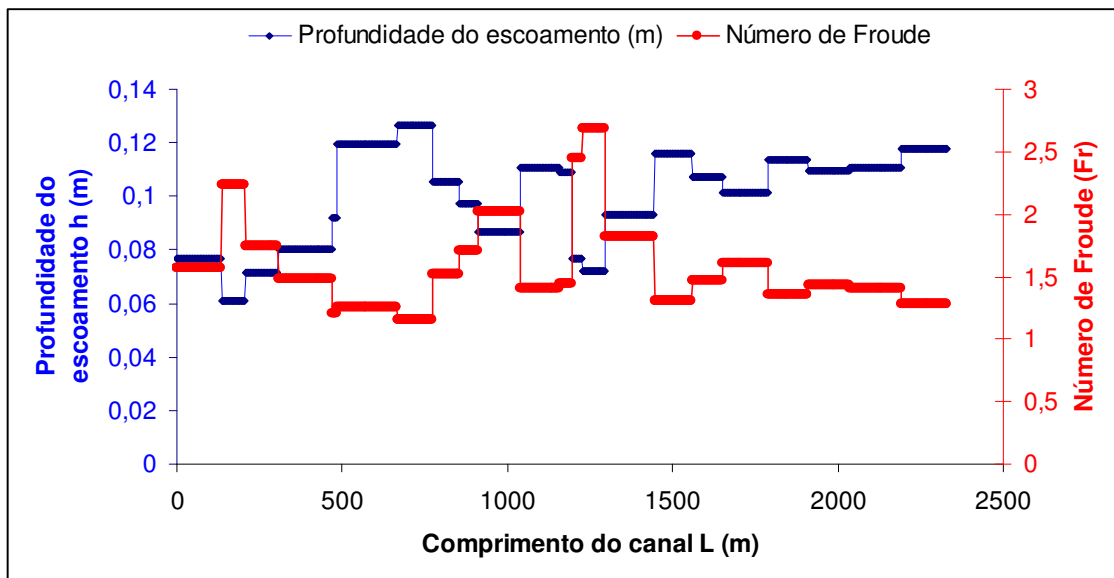
De acordo com levantamento de campo, utilizando flutuadores no período de estiagem, a vazão no trecho inicial do canal foi de $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$. A partir da foz do Córrego do Mocambo (afluente único no trecho estudado), adicionou-se uma vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizada para levar em conta a contribuição deste tributário. Esta vazão adicional foi arbitrada, em função das dificuldades de se medirem as descargas no Córrego do Mocambo, o qual escoava em seção fechada.

Conforme descrito no capítulo de Metodologia, a simulação das condições de regime permanente partiu do *Standard Step Method*, para uma vazão única de $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$, majorando o coeficiente de rugosidade para ocasionar um escoamento em regime subcrítico. As condições reais de regime permanente foram obtidas a partir da simulação de transientes gerados pela passagem de ondas de cheia geradas por duas chuvas bastante distintas, utilizando os coeficientes de Manning reais para a calha principal e para a planície de inundação. Quando as vazões se estabilizavam, o regime permanente era alcançado. As duas condições, aplicadas para gerar o efeito transiente foram:

- tempo de retorno de 1 ano, com uma duração de 30 minutos e o tipo de chuva 1;
- tempo de retorno de 100 anos, com uma duração de 10 minutos e o tipo de chuva 4.

Com isto, após a passagem das ondas de cheia, verificou-se que as profundidades atingidas eram as mesmas, independente das duas condições de chuva aplicadas (Figura 5.20).

Figura 5.20 – Condições iniciais que caracterizam o regime permanente no canal

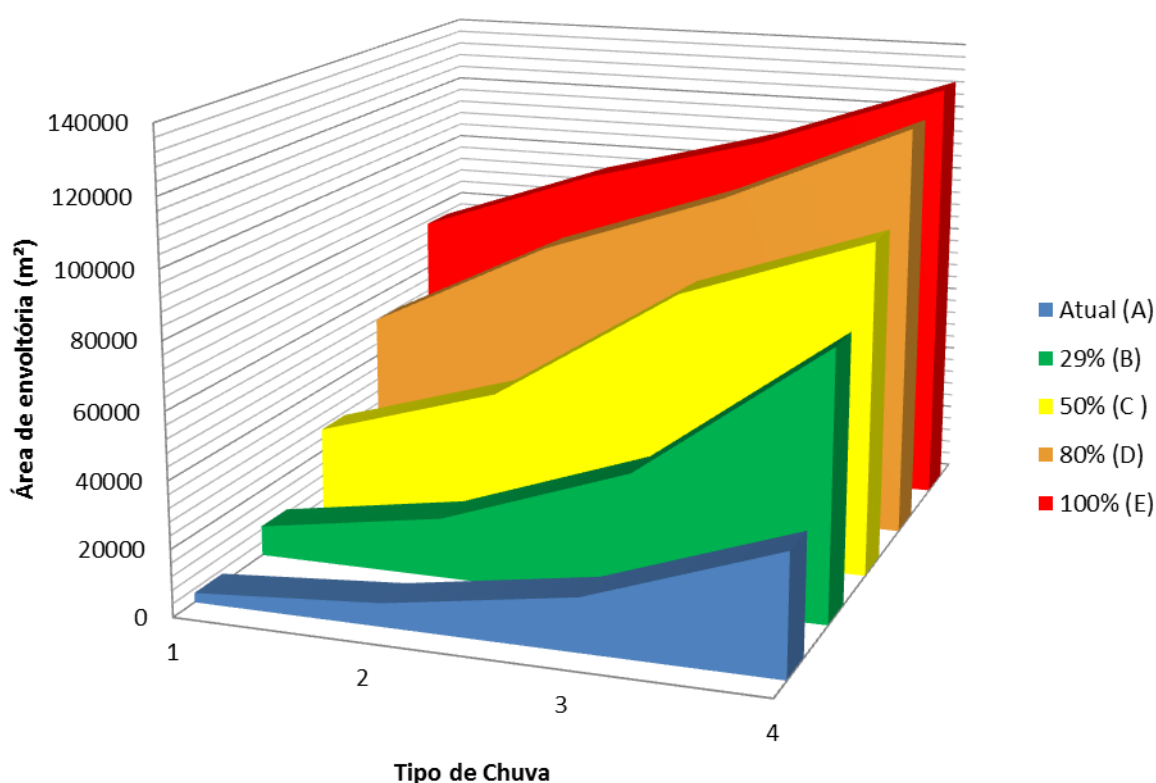


Assim, a figura 5.20 apresenta os resultados obtidos para regime permanente. Ao longo de todo o trecho, o número de Froude foi superior a 1, o que caracteriza o escoamento como supercrítico. Note-se que as pequenas profundidades contribuíram para isto.

5.2 CONDIÇÕES DE URBANIZAÇÃO

Neste item, foram sugeridos cenários de urbanização crescente ao longo da Bacia do Córrego do Monjolo. Assim, as condições de urbanização impostas foram nomeadas como A, B, C, D e E. A urbanização A refere-se à condição atual. A urbanização B refere-se a 29% de ocupação residencial para a área livre, atualmente não ocupada da bacia. A urbanização C refere-se a 50% de ocupação residencial para a área livre, não ocupada da bacia. A urbanização D refere-se a 80% de ocupação residencial para a área livre, não ocupada da bacia. Finalmente, a urbanização E refere-se a 100% de ocupação residencial para a área livre, não ocupada da bacia. Portanto, as condições de urbanização apresentam um crescimento do uso do solo pela edificação urbana. A Figura 5.21 apresenta as máximas áreas de envoltória. Percebe-se que na urbanização de 100% de ocupação da área livre, são atingidas situações mais agudas.

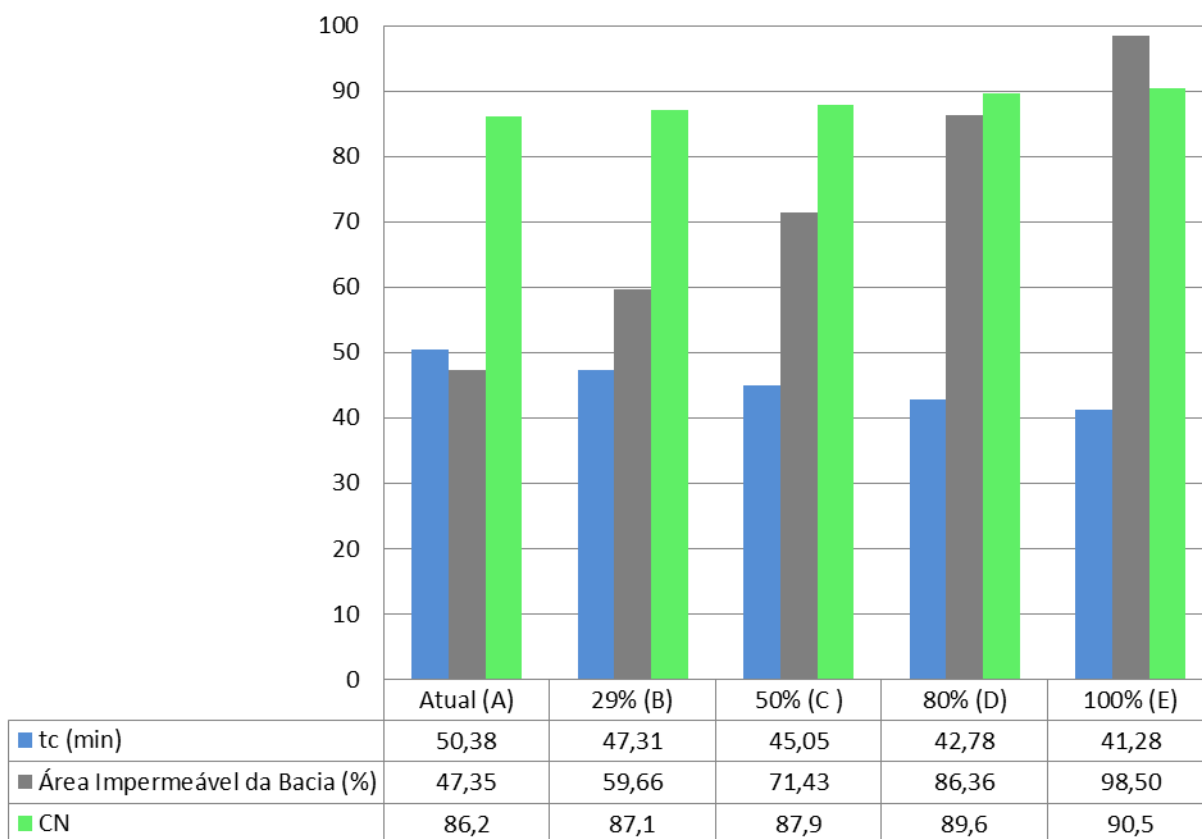
Figura 5.21: Máximas áreas de envoltória de enchentes



Imposta uma determinada condição de urbanização, foram simulados diferentes cenários de chuva, variando a duração da tormenta, o período de retorno e a distribuição temporal. Para cada cenário, foram calculadas as áreas das envoltórias de enchente correspondentes. Essas envoltórias de enchentes verifica-se também na Figura 5.22;

A Figura 5.22 apresenta o CN com uma pequena variação (aproximadamente de 5 unidades) do cenário atual para 100% de ocupação da área livre. A área impermeável também apresenta um crescimento significativo superior a 50% da área ocupada atualmente, e o tempo de concentração da bacia total apresenta uma queda de menos de 10 minutos.

Figura 5.22: Variação dos parâmetros de simulação



Desta forma, a Figura 5.22 apresenta as principais variações do CN, do t_c e da área impermeável nas simulações para as condições de urbanização já determinadas.

A) Condição Atual

Este item apresenta a situação atual de urbanização, com a finalização de modificação do canal de trapezoidal para retangular, de acordo com o novo projeto, que já está em fase de execução. As simulações foram baseadas na aplicação de diferentes cenários de chuva, para um único cenário de urbanização. Desse modo, foram impostas chuvas com diversos períodos de retorno, durações e distribuições temporais. Especificamente, para cada condição de urbanização, foram realizadas simulações abrangendo combinações entre:

- 4 tipos de distribuições temporais, de acordo com as curvas de Huff: chuvas tipo 1, 2, 3 e 4;
- durações de: 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 e 180 minutos.
- períodos de retorno de: 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 75 e 100 anos

As Figuras 5.23 a 5.24 apresentam a distribuição da área da envoltória de enchentes, em função do tempo de recorrência e da duração da chuva. Para uma análise específica desta distribuição, foi fixada uma área de envoltória de 2000 m², arbitrada como a área mínima de relevância de enchente.

Assim, considerando, por exemplo, chuvas de distribuição temporal tipo 1, essa área de relevância somente é atingida a partir de uma chuva com período de retorno próximo de 60 anos e com cerca de 40 minutos de duração (ver figura 5.23). Seguindo esta idéia, é possível estimar os pares, período de retorno e duração, responsáveis pelo princípio de enchentes mais significativas, fixadas aqui como aquelas cuja envoltória atinge áreas superiores a 2000 m².

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam as áreas de envoltória dos tipos de chuva 3 e 4. Nota-se que as chuvas tipo 4 condicionam enchentes relevantes para chuvas de menor período de retorno. Isto permite considerar que aquelas chuvas que são mais intensas no quartil final da sua duração, tendem a causar enchentes relevantes com maior probabilidade de ocorrência. Além disto, o tipo de chuva 4 apresenta a maior área de envoltória para os maiores períodos de retorno simulados.

Figura 5.23 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e chuva tipo 1

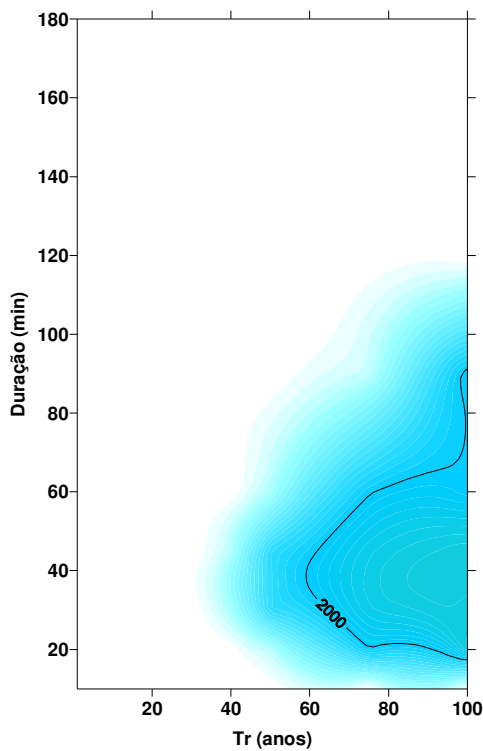


Figura 5.24 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual chuva e tipo 2

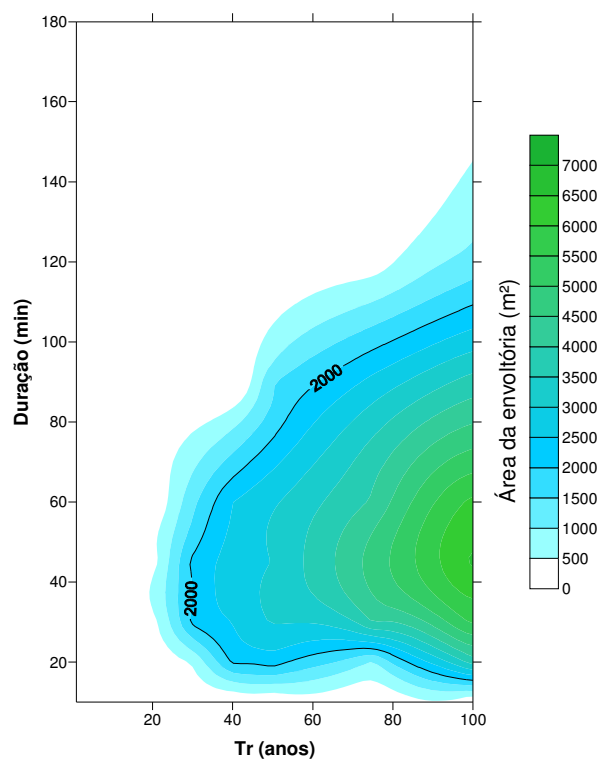


Figura 5.25 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e chuva tipo 3

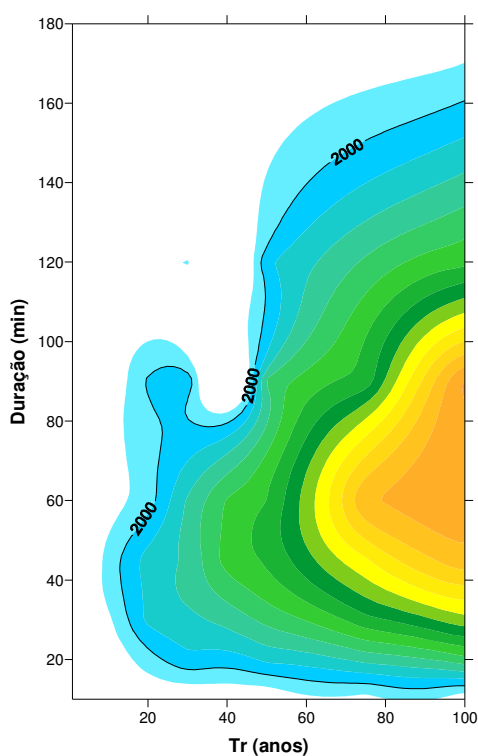
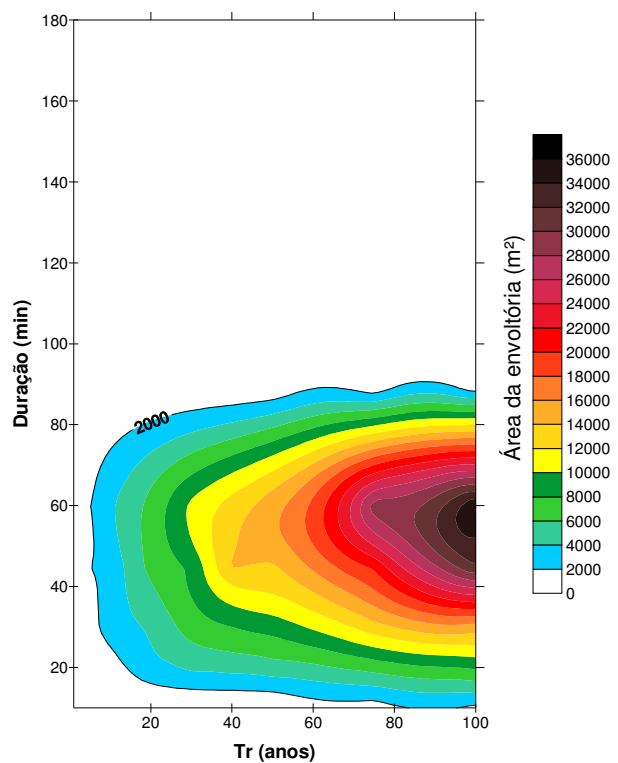


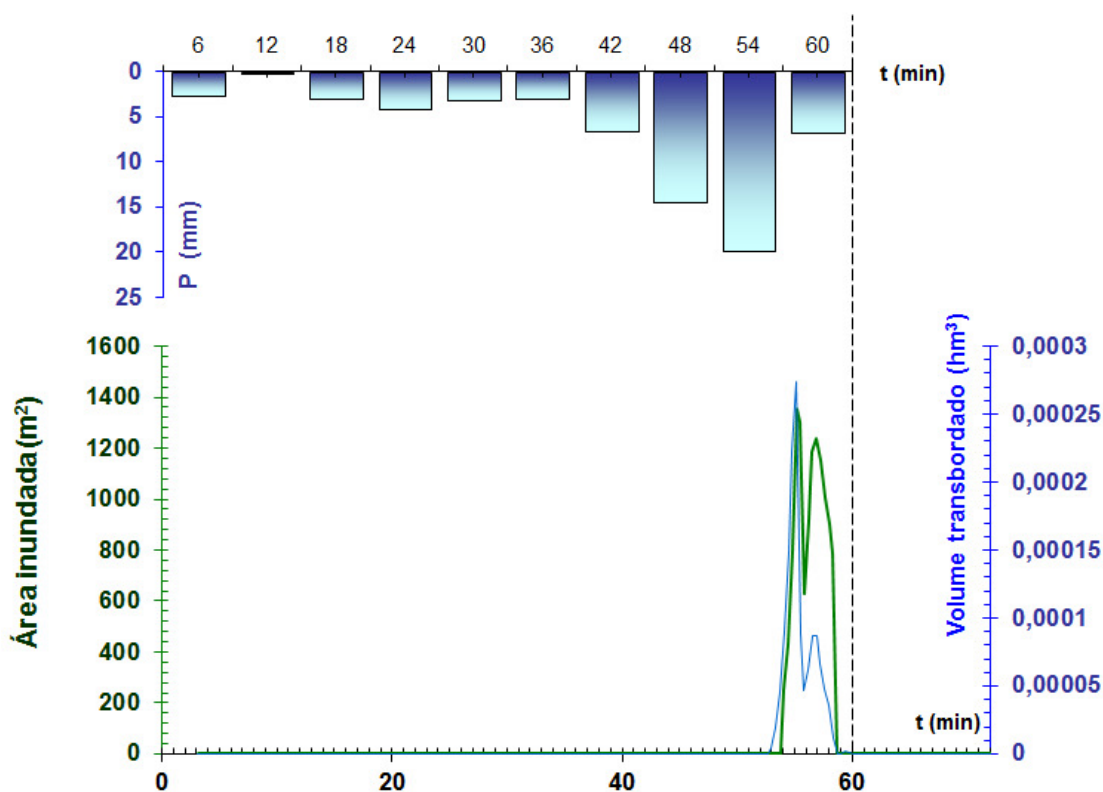
Figura 5.26 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de Urbanização Atual e chuva tipo 4



Na condição de ocupação atual da bacia, verifica-se que as chuvas tipo 4 são aquelas em que são observados dois tipos de casos extremos, aqui chamados de enchente mínima e máxima. No caso mínimo, tem-se o surgimento de uma envoltória relevante (área de aproximadamente 2000 m²) para o menor tempo de recorrência. No caso máximo, tem-se a envoltória de maior dimensão, entre os diferentes cenários de chuva simulados.

A Figura 5.27 ilustra o inundograma de uma enchente mínima gerada pela precipitação de tempo de retorno de 5 anos, com uma duração de 60 minutos e com o tipo de chuva de 4. Um destaque é o pico de cheia da área inundada ocorrendo após o instante de precipitação máxima. Nota-se que, neste caso, o inundograma ficou totalmente contido no intervalo de duração da chuva e que a duração da enchente foi restrita.

Figura 5.27 – Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $T_r = 5$ anos, duração = 60 minutos e chuva tipo 4.



De acordo com o inundograma, foram selecionados três instantes (T1, T2 e T3) para a demarcação das áreas inundáveis. O primeiro instante corresponde à fase de crescimento da enchente (Figura 5.28). O segundo instante é o pico máximo da enchente, no qual

verifica-se uma concentração das inundações em um trecho do canal (Figura 5.29). Neste caso, conclui-se que transbordamentos são mais críticos em uma região específica, mesmo que sua distribuição ao longo do comprimento do canal seja reduzida. O terceiro instante (Figura 5.30) corresponde à fase de recessão da enchente, com uma diminuição sensível dos alagamentos em planta.

A apresentação de zonas inundáveis para instantes de crescimento (T1), de enchente máxima (T2) e de recessão (T3) das inundações é um padrão que será utilizado ao longo deste trabalho.

Figura 5.28 – Pontos atingidos para o instante de 55 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.

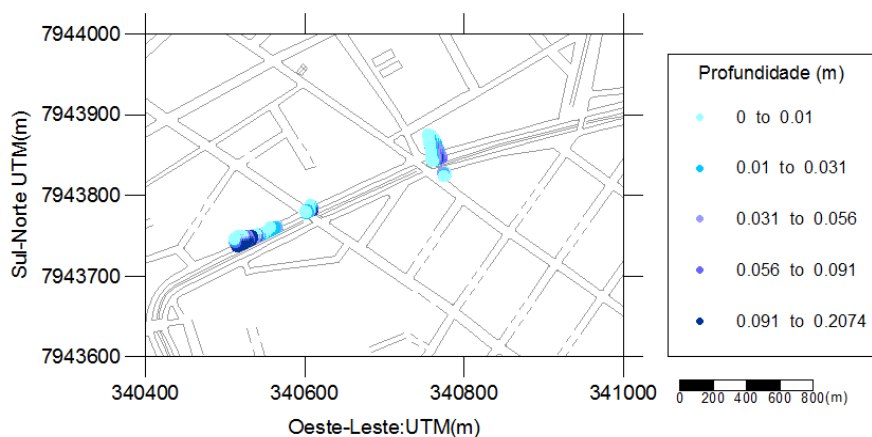


Figura 5.29 – Pontos atingidos para o instante de 57 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.

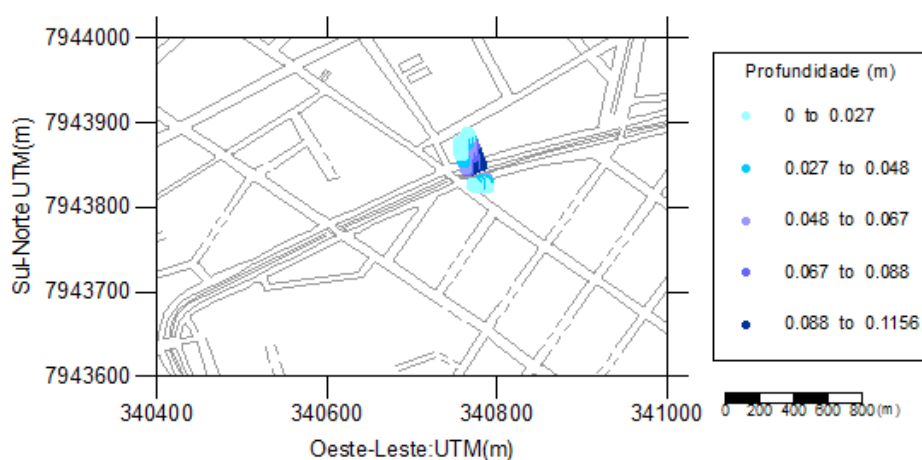
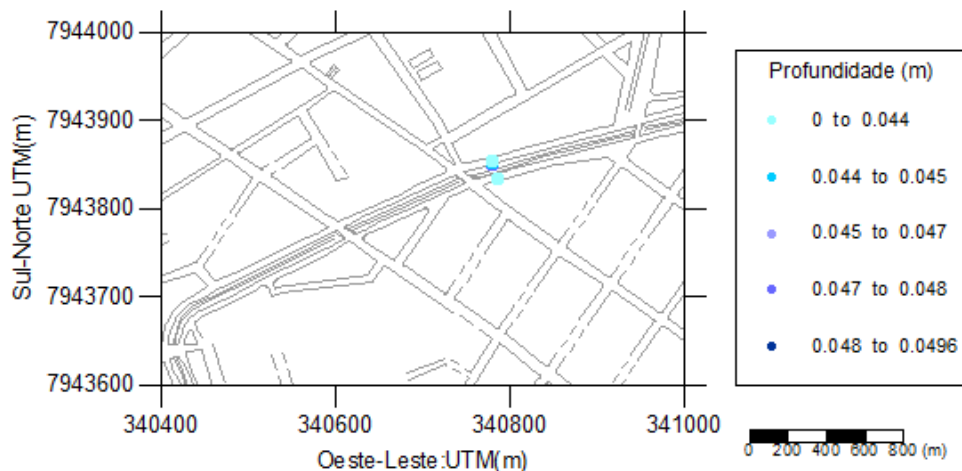
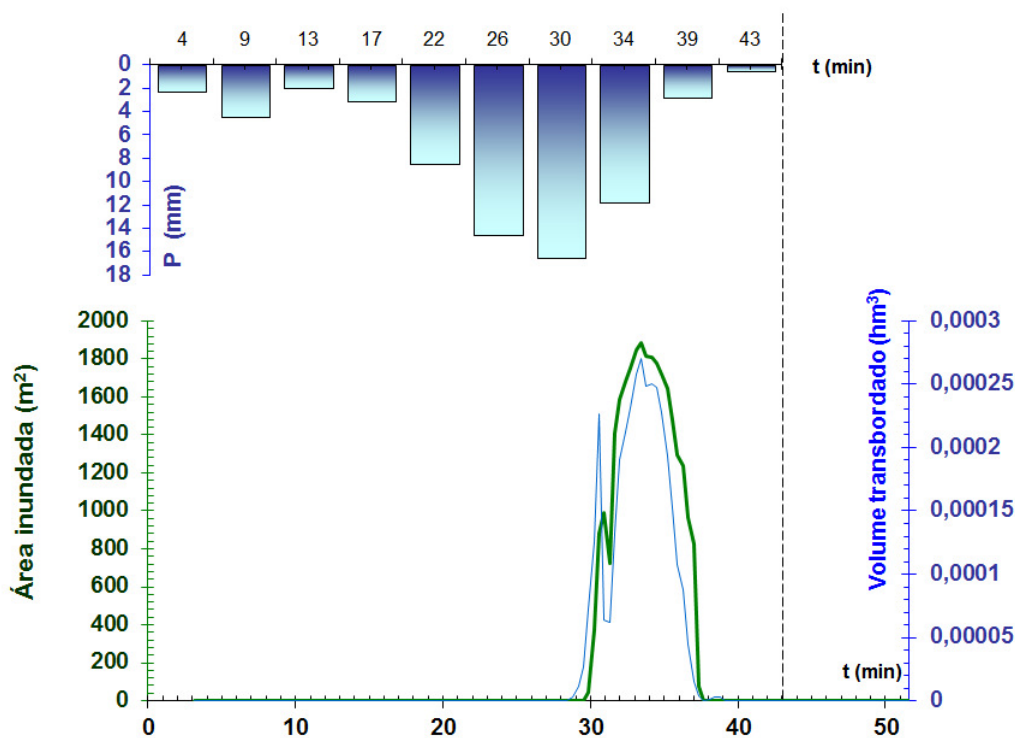


Figura 5.30 – Pontos atingidos para o instante de 58,5 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 5 anos, duração de 60 minutos, chuva tipo 4.



Para comparar com o tipo de chuva 3, foi simulada uma situação de enchente mínima, a qual ocorreu com o tempo de retorno de 15 anos e com uma duração de 43 minutos. A figura 5.31 apresenta o inundograma para este cenário. Percebe-se, na Figura 5.32, que as inundações desaparecem antes mesmo do final da chuva.

Figura 5.31 – Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $Tr = 15$ anos, duração = 43 minutos e chuva tipo 3.



As simulações evidenciam que, para cerca de 31 minutos transcorridos após o início da chuva, na fase de crescimento da enchente (T1), há inundações que atingem profundidades irrelevantes, da ordem de, no máximo, 10 cm (Figura 5.32). Essas profundidades todavia tendem a aumentar para a ordem de 25 e 20 cm respectivamente, nos instantes crítico (T2) e de recessão (T3).

Figura 5.32 – Pontos atingidos para o instante de 31 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.

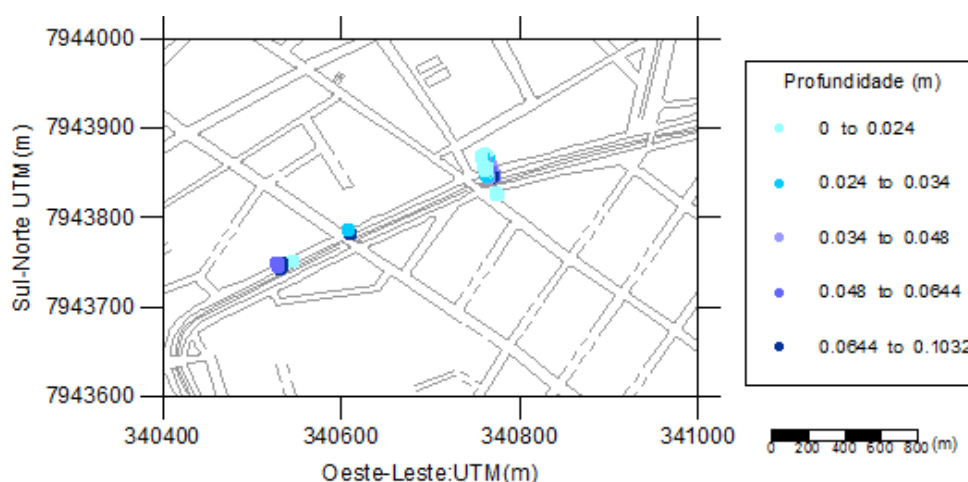


Figura 5.33 – Pontos atingidos para o instante de 33,5 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.

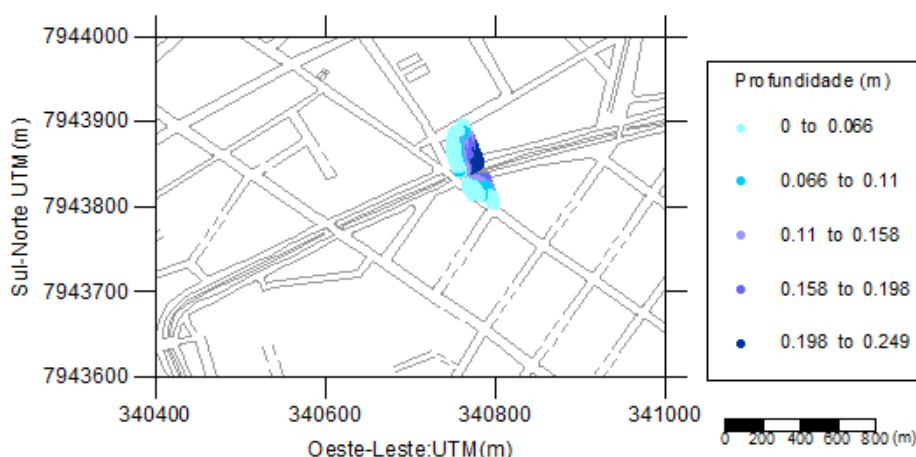
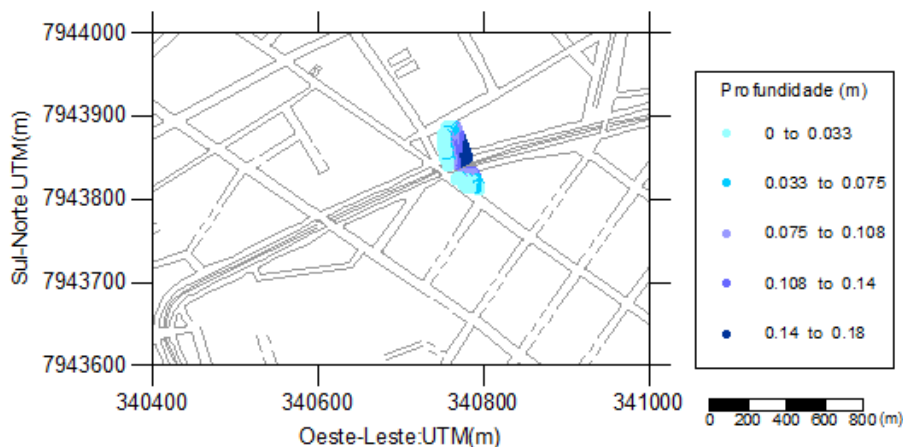


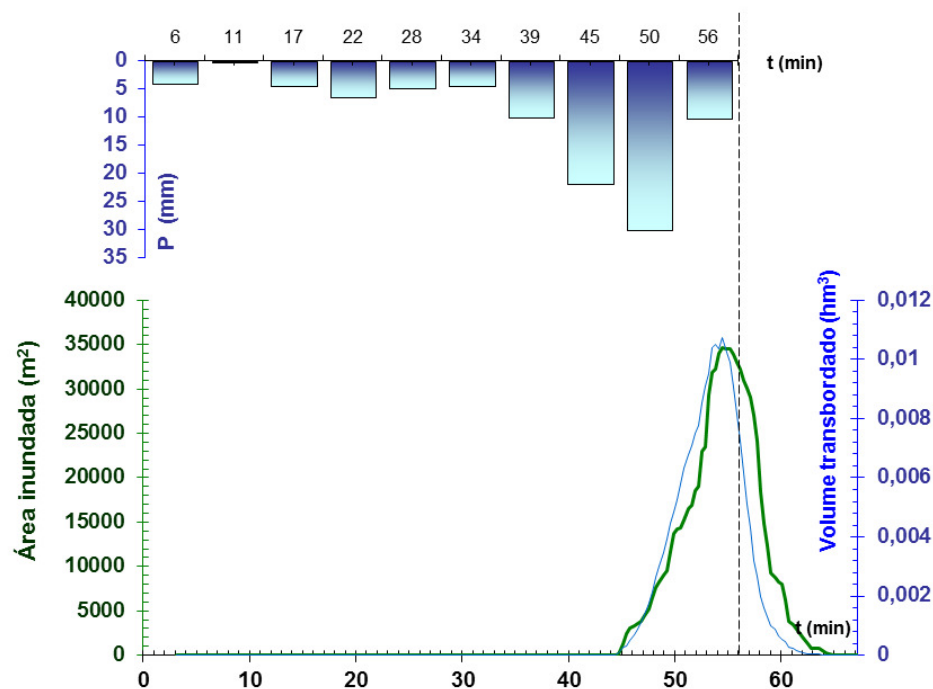
Figura 5.34 – Pontos atingidos para o instante de 35 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente.

Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 15 anos, duração de 43 minutos, chuva tipo 3.



As simulações também capturaram situações de enchente máxima, considerando chuvas de caráter mais catastrófico, verificadas com período de retorno de 100 anos, com uma duração de 56 minutos e com o tipo de chuva 4. Nas condições simuladas, foi este cenário de chuva que gerou as maiores áreas da envoltória de inundação. No inundograma da Figura 5.35, verifica-se que a enchente crítica ocorreu próxima ao término da precipitação.

Figura 5.35 – Inundograma de enchente máxima, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4.



De acordo com o inundograma foram selecionados três instantes (T1, T2 e T3) para a demarcação das áreas inundáveis no mapa (Figuras 5.36 a 5.38). De uma maneira geral, percebe-se que as inundações distribuem-se em vários pontos ao longo do comprimento do canal. As profundidades dos alagamentos superam 1 m na planície de inundação.

Figura 5.36 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.

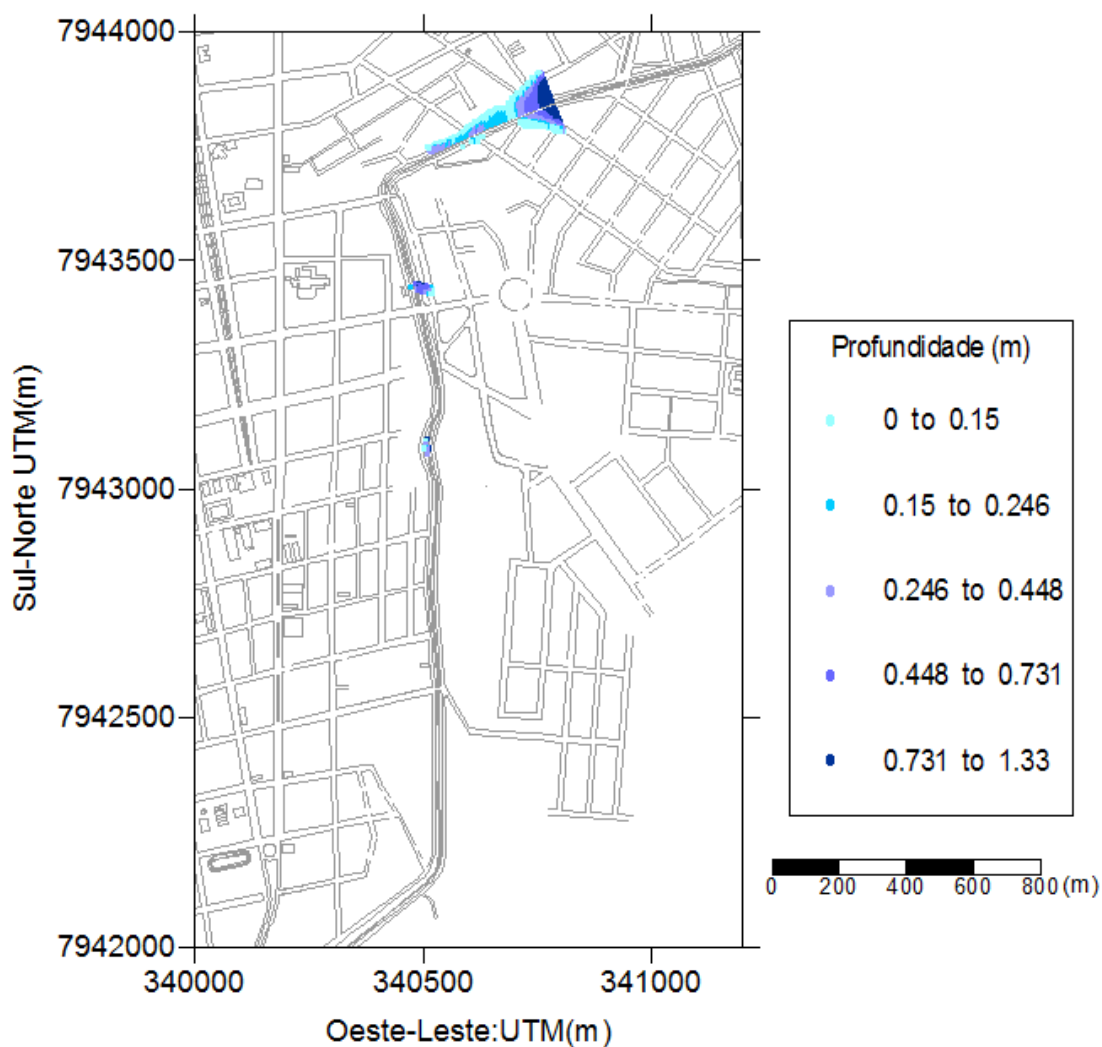


Figura 5.37 – Pontos atingidos para o instante de 54,5 minutos, correspondente à fase crítica da enchente.

Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.

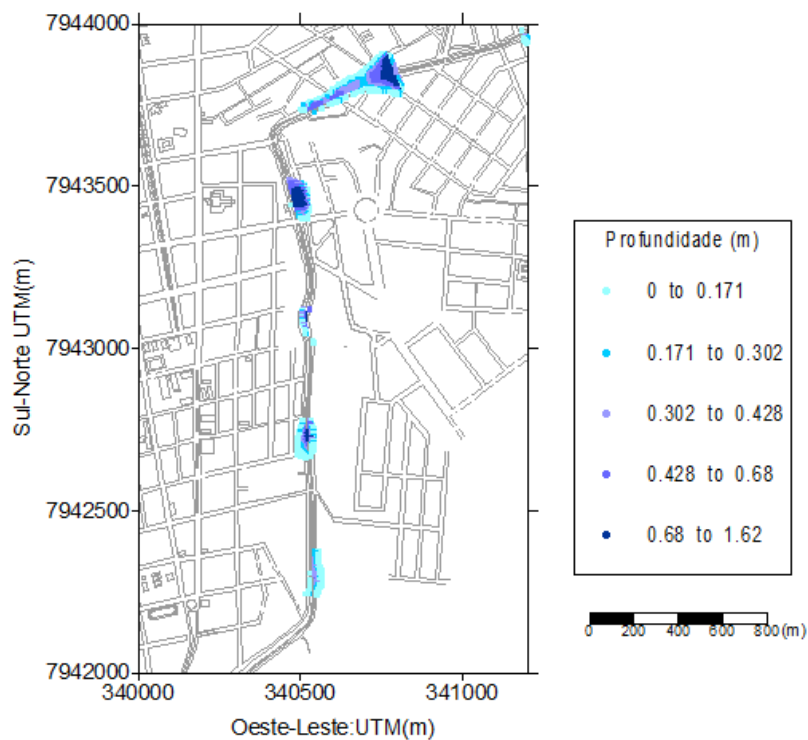
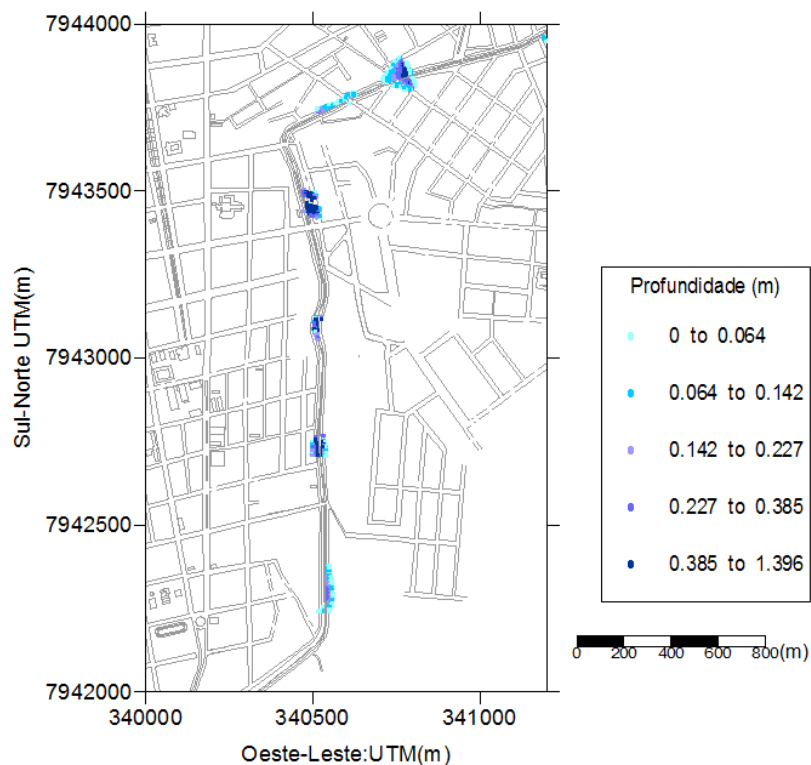


Figura 5.38 – Pontos atingidos para o instante de 58 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente.

Cenário de urbanização atual, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4.



Nota-se, neste caso, que há um deslocamento das áreas inundáveis, de montante para jusante, entre as fases de crescimento e recessão da enchente.

Assim, o cenário atual contempla alguns cenários de enchentes ressaltando o fato de que para o tempo de retorno maior têm-se mais áreas de enchentes. Já para menores tempos de retorno, as envoltórias localizam-se em uma área à jusante da junção do Córrego do Mocambo com o Córrego do Monjolo.

B) Condição atual mais 29% de ocupação da área livre

Na condição atual mais 29% de ocupação da área livre, percebe-se um crescimento significativo nas áreas de envoltória, principalmente para os tipo de chuva 1 e 2 que eram poucos representativos para a condição atual, podendo ser verificados nas Figuras 5.39 e 5.40. As Figuras 5.41 e 5.42 também mostram este aumento. No hietograma tipo 4 foram verificadas as condições de enchente mínima e máxima.

Figura 5.39 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e chuva tipo 1

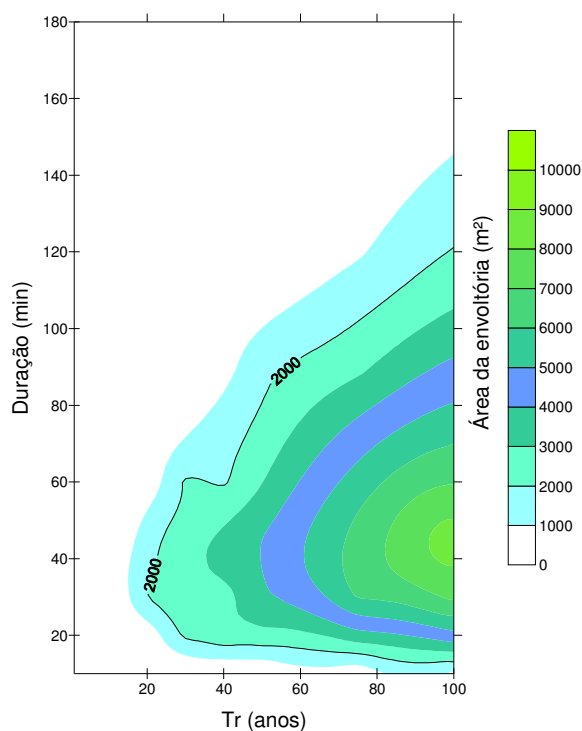


Figura 5.40 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e chuva tipo 2

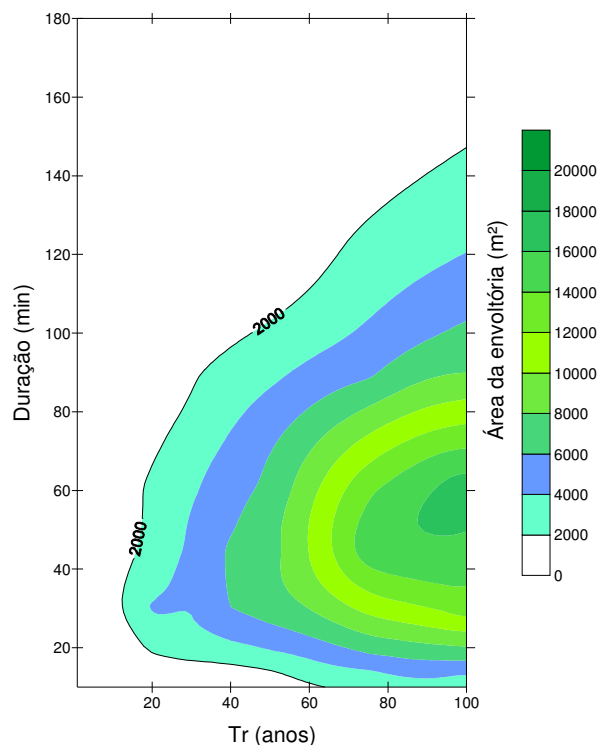


Figura 5.41 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 3

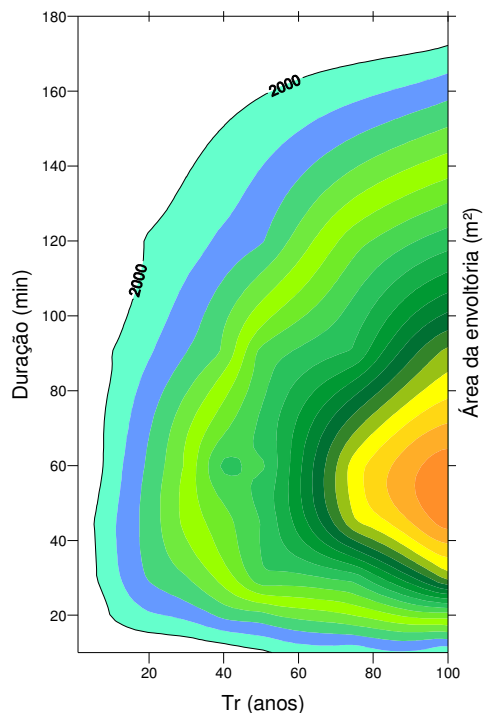
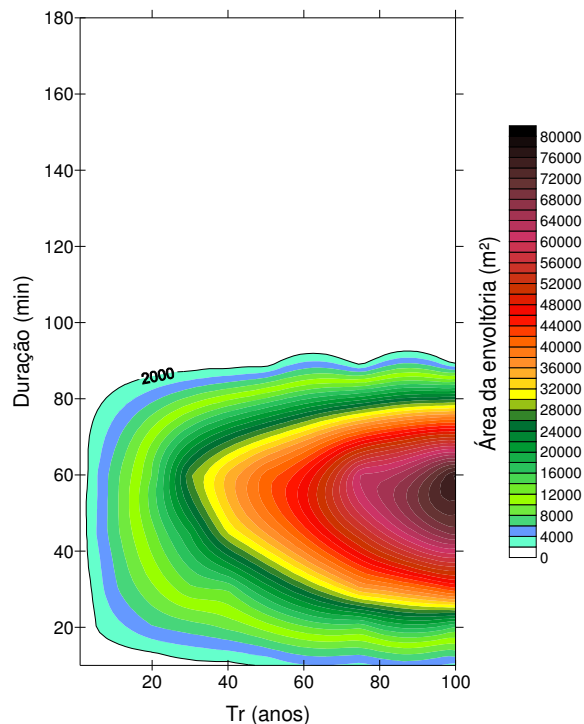


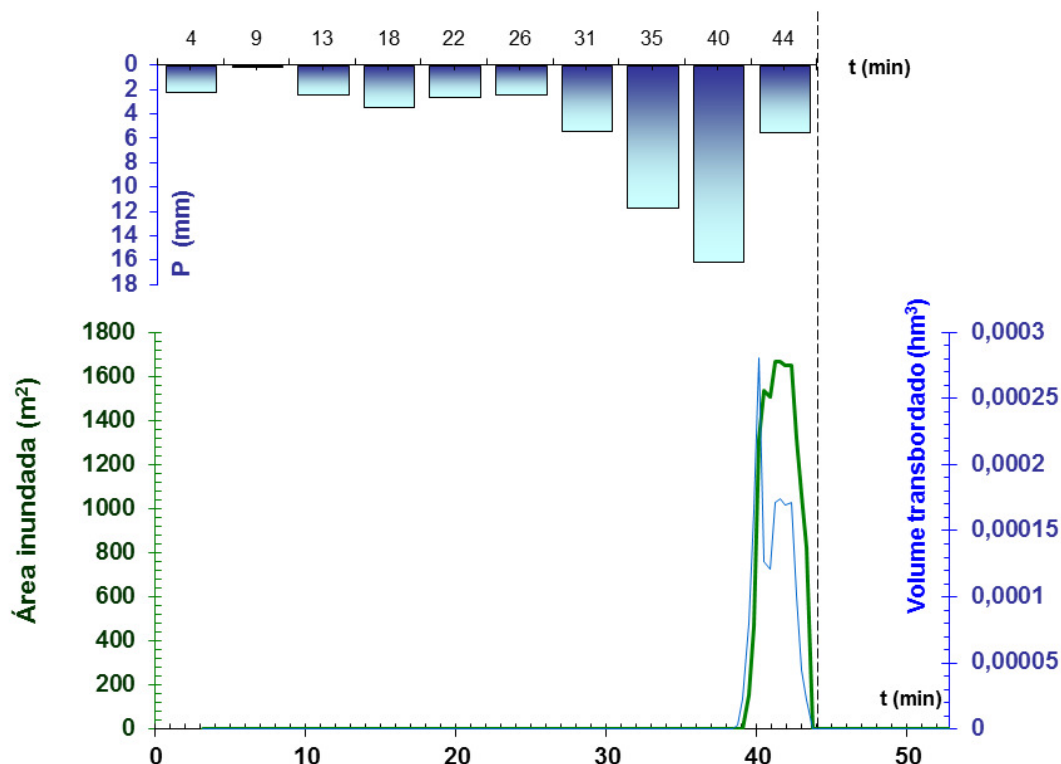
Figura 5.42 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 29% da área livre e Chuva tipo 4



Na condição de 29% de ocupação da área livre com o tipo de chuva 4 são observados dois tipos de casos extremos: o mínimo e o máximo. No caso mínimo tem-se a envoltória próxima de 2000 m^2 , para o menor período de retorno da precipitação. No caso máximo, tem-se uma envoltória de maior dimensão.

Com isto, a Figura 5.43 mostra o inundograma da enchente mínima, com tempo de recorrência de 2,5 anos, com uma duração de 44 minutos e com o tipo de chuva de 4.

Figura 5.43 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 2,5$ anos, duração = 44 minutos e chuva tipo 4.



As Figuras 5.44 a 5.46 ilustram as áreas inundáveis para a condição de ocupação adicional de 29% da área remanescente, a partir de lotes residenciais. Em geral, as áreas de ocorrência são similares àsquelas relativas à ocupação atual da bacia. Todavia, as profundidades das inundações assumem valores ligeiramente superiores, com extremos de quase 20 cm.

Figura 5.44 – Pontos atingidos para o instante de 40,5 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4 .

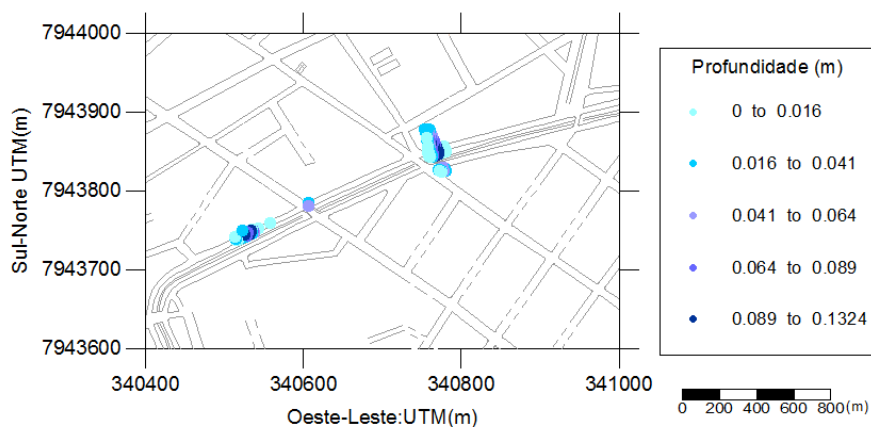


Figura 5.45 – Pontos atingidos para o instante de 41 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4 .

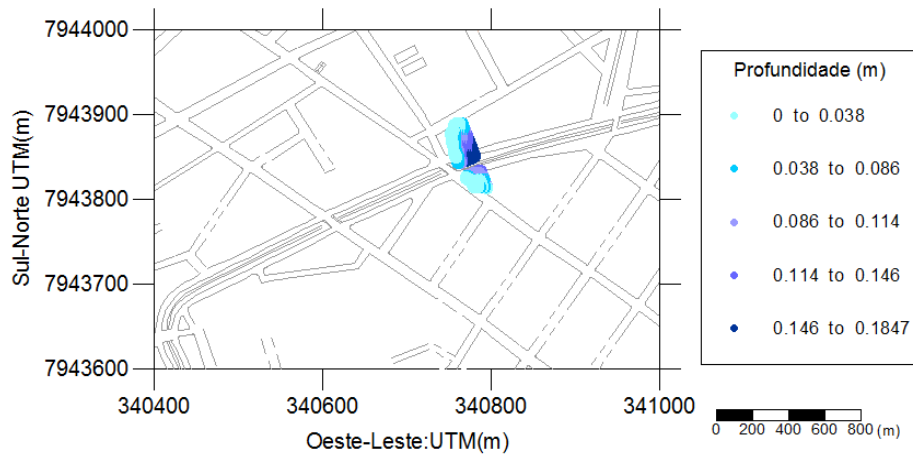
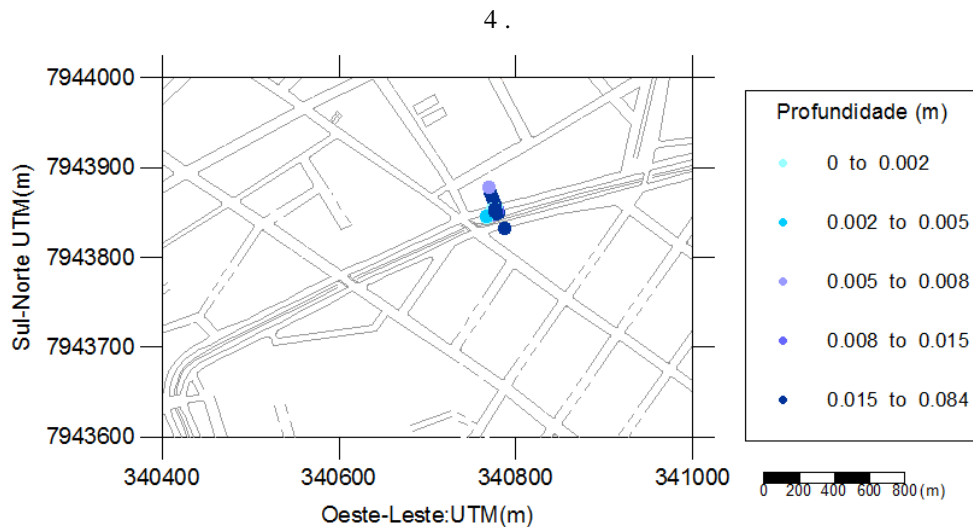
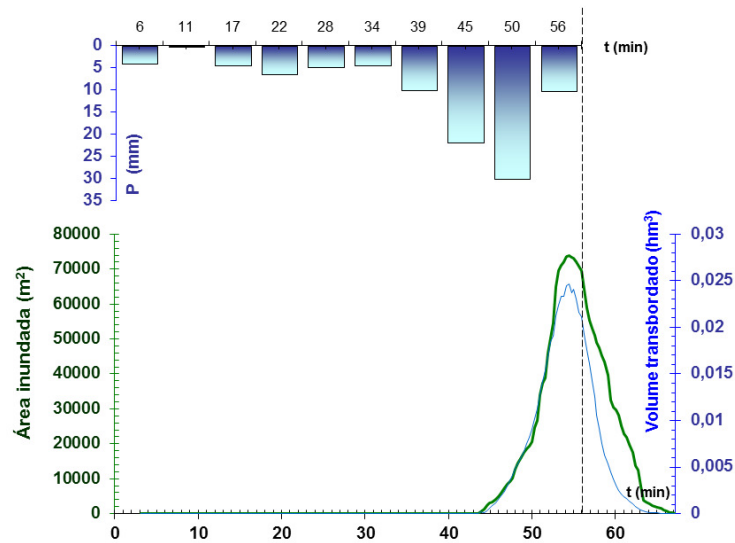


Figura 5.46 – Pontos atingidos para o instante de 43 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 2,5 anos, duração de 44 minutos, chuva tipo 4 .



A condição de máximas envoltórias para as “chuvas catastróficas” com baixa probabilidade de ocorrência, foi determinada com o período de retorno de 100 anos, com uma duração de 56 minutos e com o tipo de chuva de 4. Estes valores foram retirados a partir da distribuição da área das envoltórias na Figura 5.42, observando o máximo valor encontrado nesse diagrama. No inundograma da Figura 5.47 verifica-se que o pico da enchente tende a ocorrer nos últimos minutos de precipitação.

Figura 5.47 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4.



A partir do inundograma, foram selecionados três instantes (T1, T2 e T3) para a demarcação das áreas inundáveis em planta.

Figura 5.48 – Pontos atingidos para o instante de 49 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4

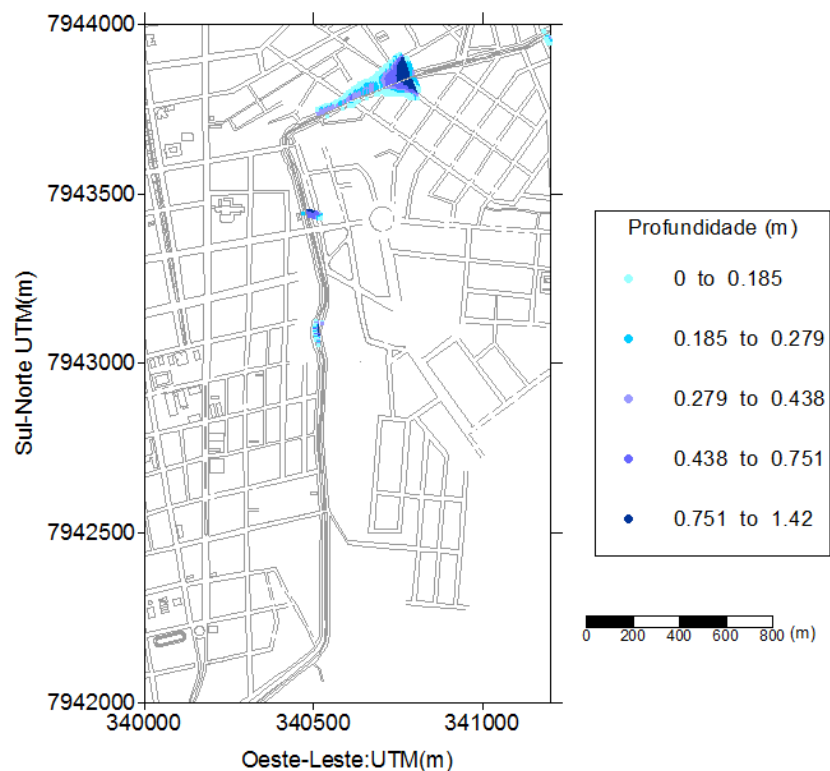


Figura 5.49 – Pontos atingidos para o instante de 54 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4

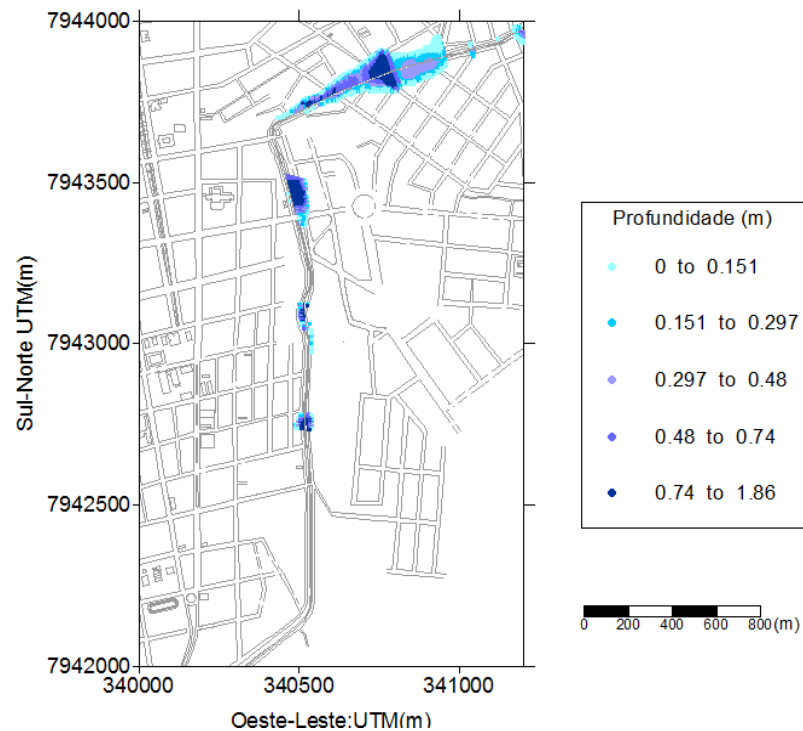
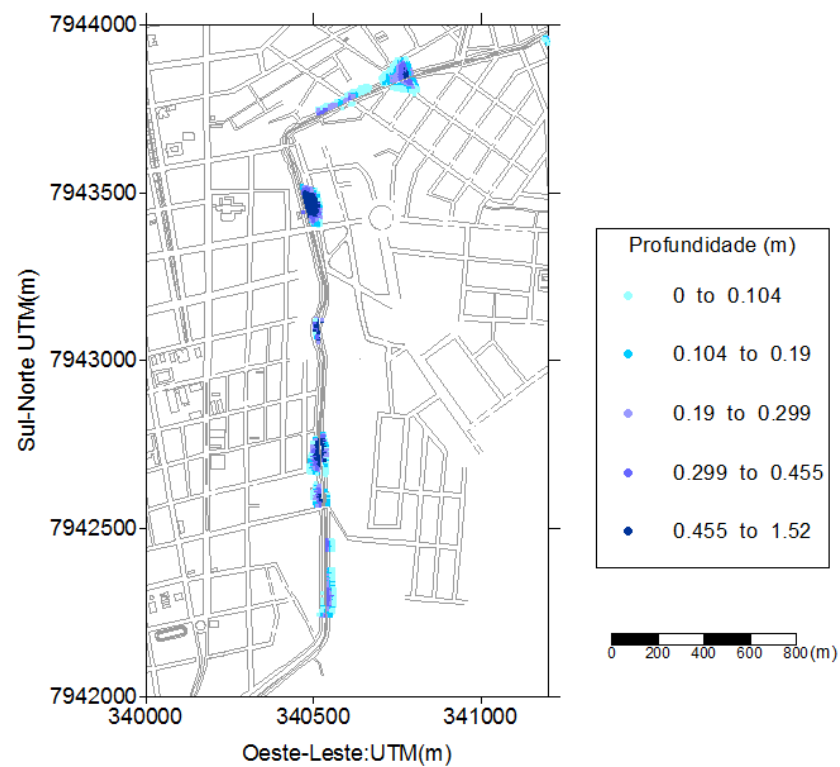


Figura 5.50 – Pontos atingidos para o instante de 59 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 29% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 56 minutos, chuva tipo 4



Portanto, para o cenário de 29% de ocupação urbana da área livre, com a enchente mínima estipulada para os menores tempos de retorno, a resposta da simulação foi similar à da condição atual. Porém, para as simulações de inundação máxima, verificou-se que as zonas alcançadas pela enchente sofreram espalhamento.

C) Condição atual mais 50% de ocupação da área livre

Para a condição atual mais 50% de ocupação da área livre obteve-se um crescimento mais similar ao da condição de 29% de ocupação da área livre. Apesar do padrão obtido pela distribuição das envoltórias em relação ao período de retorno e à duração da chuva, foi possível verificar um crescimento significativo nas áreas de envoltória, principalmente para os tipos de chuva 3 e 4 (Figuras 5.53 e 5.54).

Figura 5.51 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e chuva tipo 1

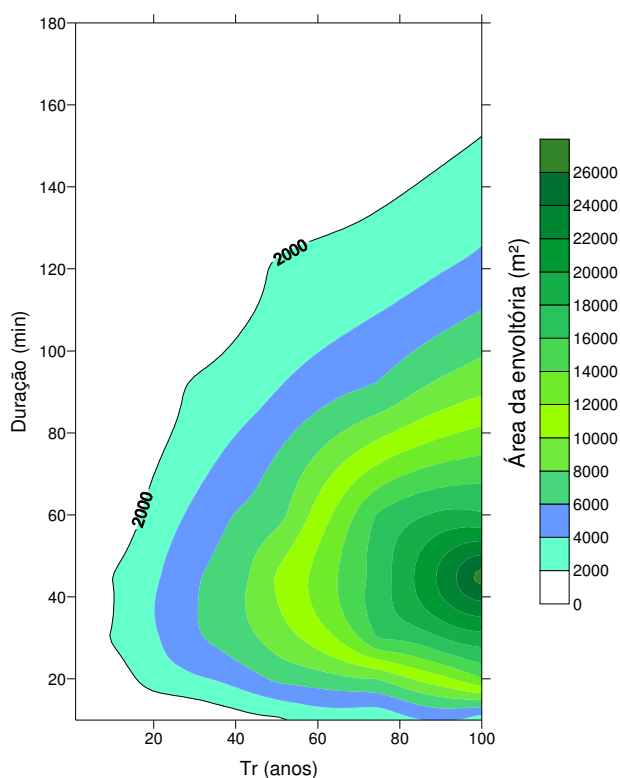
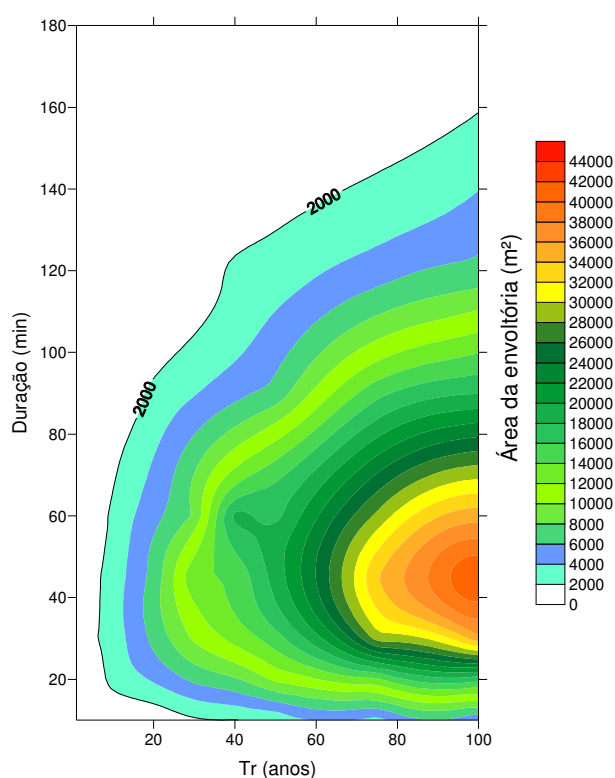


Figura 5.52 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e chuva tipo 2



Nesses casos, tanto as chuvas com distribuição temporal tipo 3 quanto as chuvas com distribuição tipo 4 apresentam enchentes mínimas com pequenos tempos de retorno. Para a

chuva tipo 4, nota-se que essas enchentes mínimas surgem com tempos de retorno da ordem de 1 ano, para precipitações entre 30 e 78 minutos de duração. Quando cenários como estes vigorarem, é possível a ocorrência de enchentes anuais.

Figura 5.53 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e chuva tipo 3

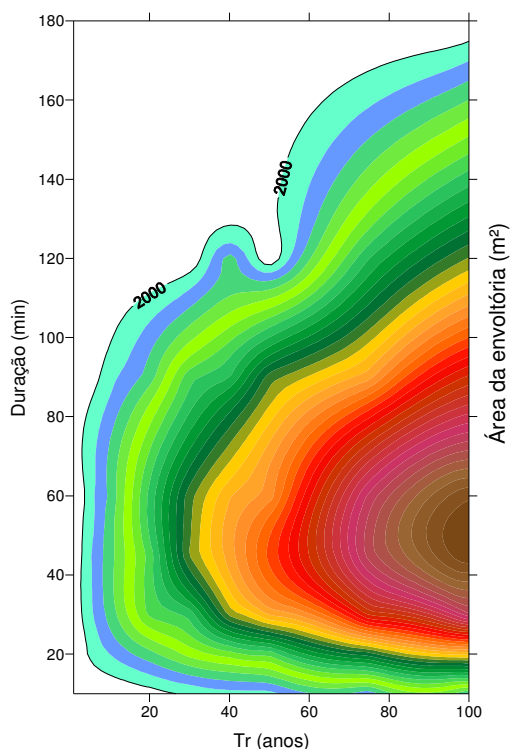
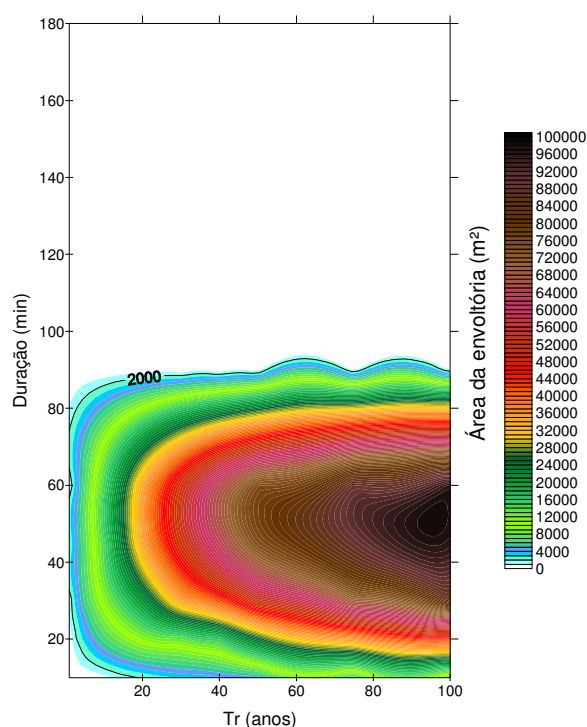


Figura 5.54 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 50% da área livre e chuva tipo 4

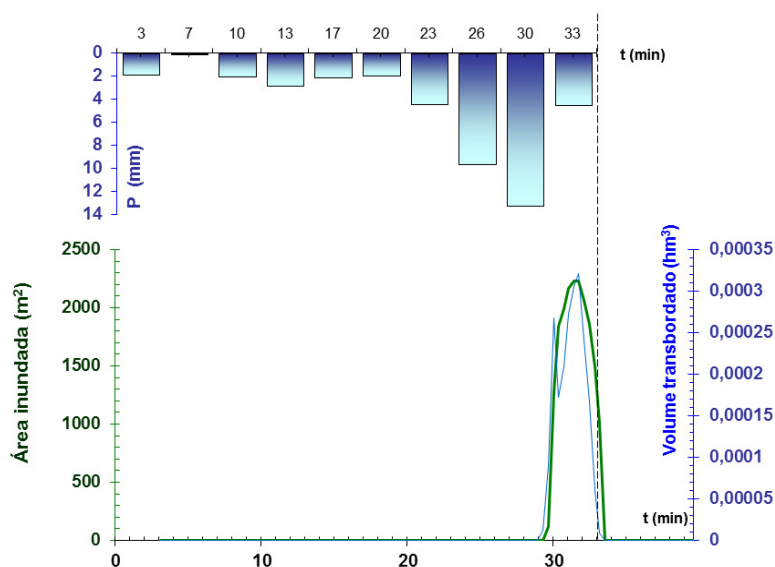


Na condição de 50% de ocupação da área livre, com o tipo de chuva 4 são observados dois tipos de casos extremos: o mínimo e o máximo. No caso mínimo tem-se a envoltória de enchente de aproximadamente 2000 m² para o menor tempo de recorrência e, no caso máximo, tem-se a envoltória de maior dimensão para a chuva de 100 anos de recorrência. Nota-se também que, para a chuva tipo 4, durações superiores a 90 minutos não mais condicionam enchentes mínimas, ao passo que para outras distribuições temporais, é possível que essas inundações ocorram para chuvas de grande duração.

O inundograma (Figura 5.55) representa a chuva com o tempo de retorno de 1,5 anos, com uma duração de 33 minutos e com o hietograma tipo 4, responsável pela geração de enchente mínima. Percebe-se que, a enchente fica restrita a instantes próximos do fim da chuva, com o tempo final da recessão superando levemente essa duração. Isto permite

destacar uma tendência de surgimento de enchentes mesmo após o término da precipitação, uma vez que os volumes de água conduzidos pelo canal passam a aumentar com a evolução da urbanização da bacia.

Figura 5.55 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1,5$ anos, duração = 33 minutos e chuva tipo 4.



As Figuras 5.56 a 5.58 apresentam as zonas inundáveis para três instantes: um na fase de crescimento (T1), outro na fase crítica da enchente (T2) e o último na recessão da inundação (T3). Nota-se que as profundidades da água, na zona inundável, chegam a atingir a ordem de 25 cm no instante crítico.

Figura 5.56 – Pontos atingidos para o instante de 30 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4.

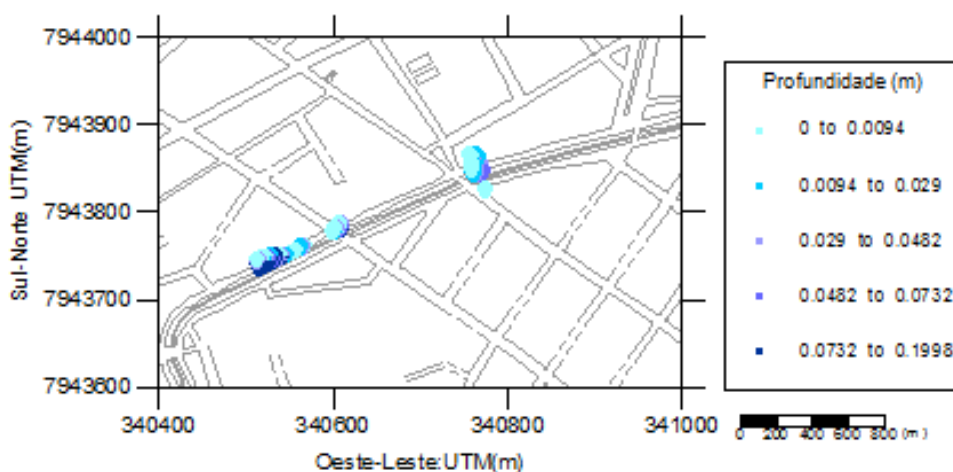


Figura 5.57 – Pontos atingidos para o instante de 31 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4

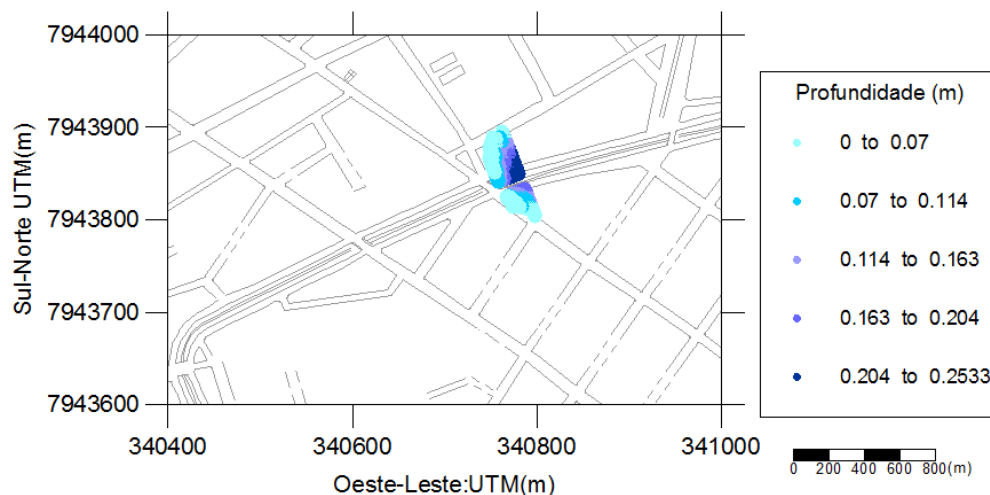
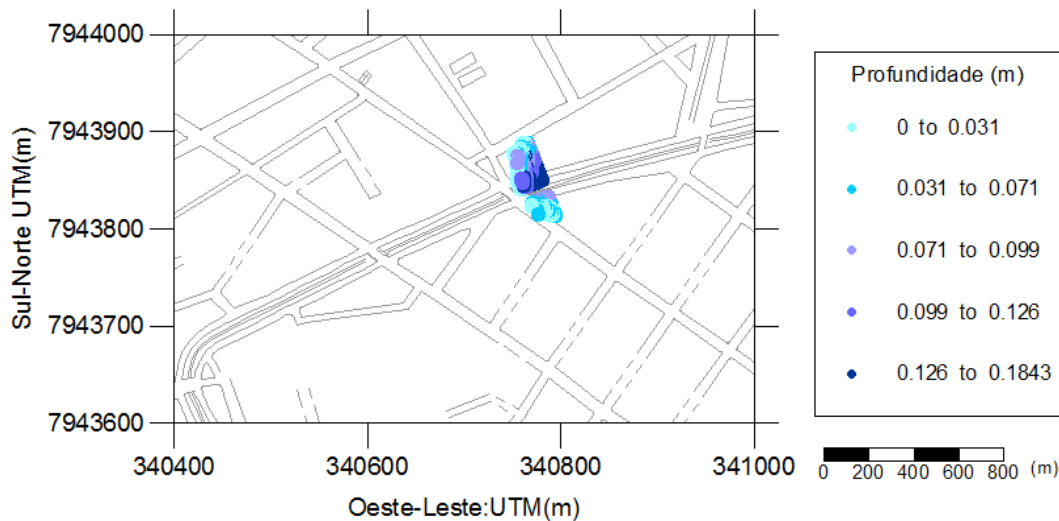
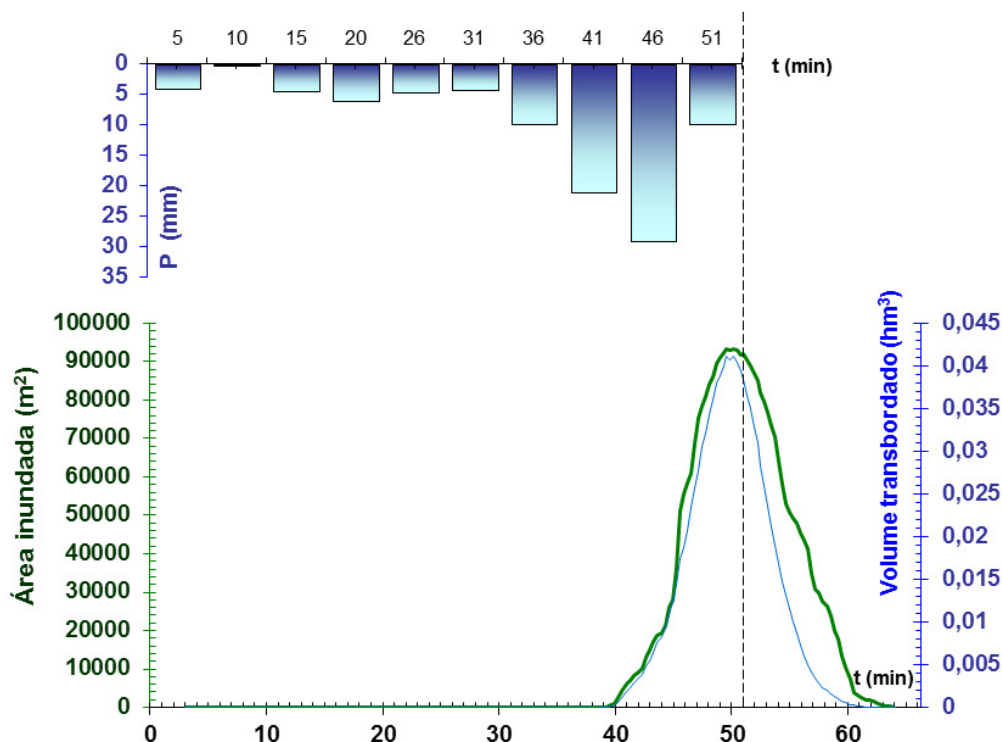


Figura 5.58 – Pontos atingidos para o instante de 33 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 1,5 anos, duração de 33 minutos, chuva tipo 4



A condição de máximas envoltórias para as chuvas de caráter mais catastrófico foi determinada com o tempo de retorno de 100 anos, com a duração de 51 minutos e com o tipo de chuva de 4. No inundograma da figura 5.59 verifica-se que o ponto crítico ocorre próximo ao término da chuva. O prolongamento da enchente após o final da chuva é confirmado com a expansão da base do inundograma em relação aos casos anteriores. Isto indica que, mesmo com o final da precipitação, as vazões escoadas pelo canal assumem valores significativos o suficiente para gerarem enchentes nas adjacências.

Figura 5.59 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 51 minutos e chuva tipo 4.



De acordo com o inundograma foram selecionados três instantes (T_1 , T_2 e T_3) para a demarcação de algumas áreas inundáveis em planta. O primeiro instante situa-se na fase de crescimento da enchente, com três áreas significativas ao longo do canal (Figura 5.60). O segundo instante é o pico do inundograma, com a máxima área alcançada pela enchente. A figura 5.61 apresenta uma área de enchente maior do que a figura 5.60, porém, não apresenta área de inundação significativa a jusante. O terceiro instante situa-se na recessão da enchente, que apresenta áreas próximas à jusante e uma área menor onde ocorreu o pico de cheia do inundograma (Figura 5.62).

Nota-se, neste caso, o surgimento de inundações no baixo curso do trecho estudado, comprovando a impossibilidade do canal conduzir, sem transbordar na maior parte da sua extensão, as vazões originadas pelas condições simuladas de chuva e de crescente ocupação da bacia.

Figura 5.60 – Pontos atingidos para o instante de 45 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.

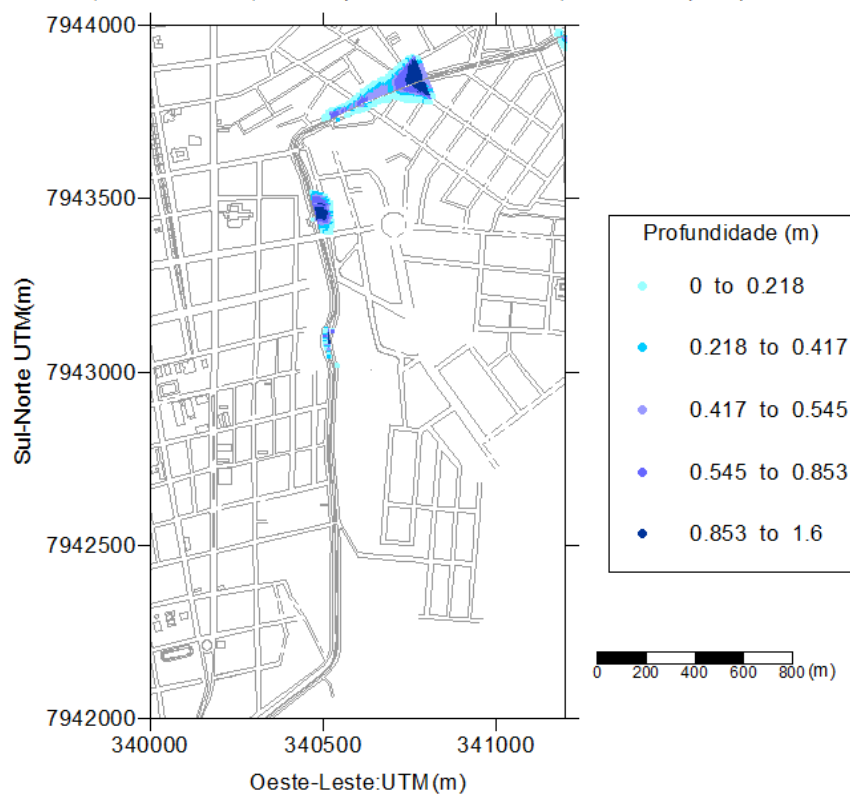


Figura 5.61 – Pontos atingidos para o instante de 50 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.

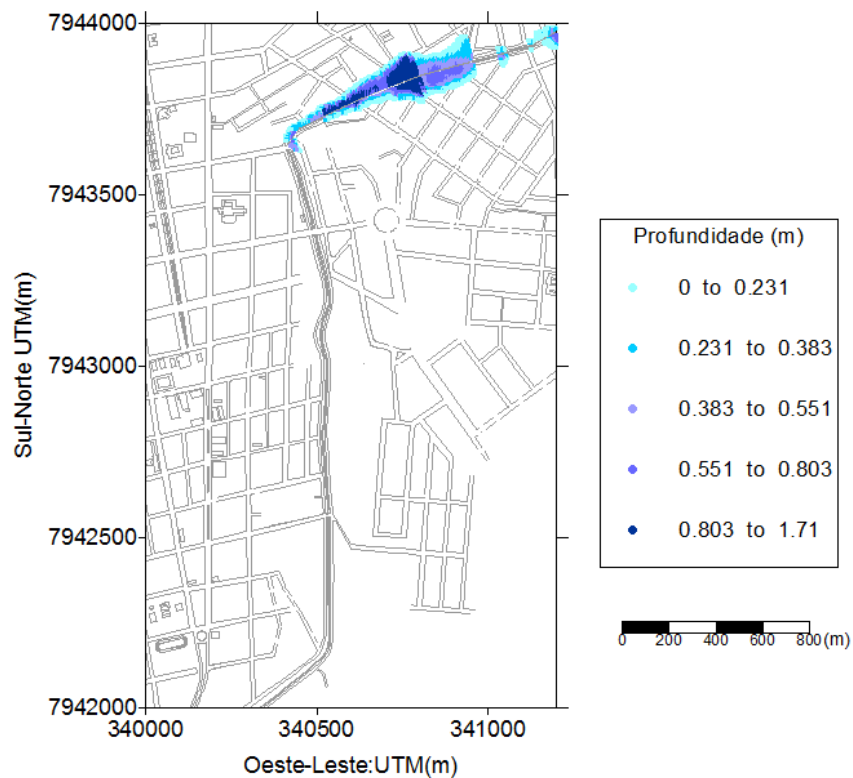
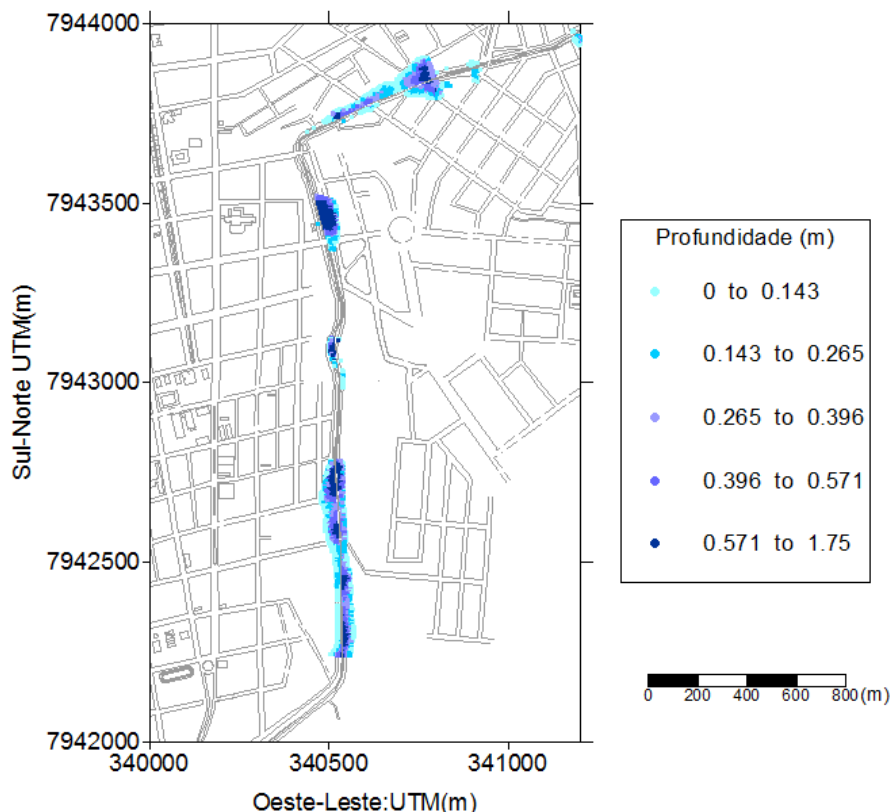


Figura 5.62 – Pontos atingidos para o instante de 55 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 50% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 51 minutos, chuva tipo 4.



Desta forma, o cenário de 50% da ocupação urbana da área livre, para os menores tempos de retorno (de acordo com a simulação) é similar às outras condições, porém com uma profundidade maior e uma área mais significativa. Já nas condições de 100 anos de tempo de retorno percebeu-se que o pico de cheia determina uma área significativa diferenciando dos outros picos de cheia, com alargamento significativo da base do inundograma. Isto evidencia a tendência das enchentes perdurarem por mais tempo, quando a ocupação da bacia aumenta.

D) Condição atual mais 80% de ocupação da área livre

Na condição atual mais 80% de ocupação da área livre, percebe-se um crescimento significativo nas áreas de envoltória, principalmente para os tipo de chuva 1 e 2 que tinham um crescimento gradativo nas outras condições (Figuras 5.63 e 5.64). Os tipos de chuva 3 e 4 apresentam um crescimento, e o tipo de chuva 3 já passa a apresentar probabilidade de ocorrência de enchente de ano em ano.

Figura 5.63 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e chuva tipo 1

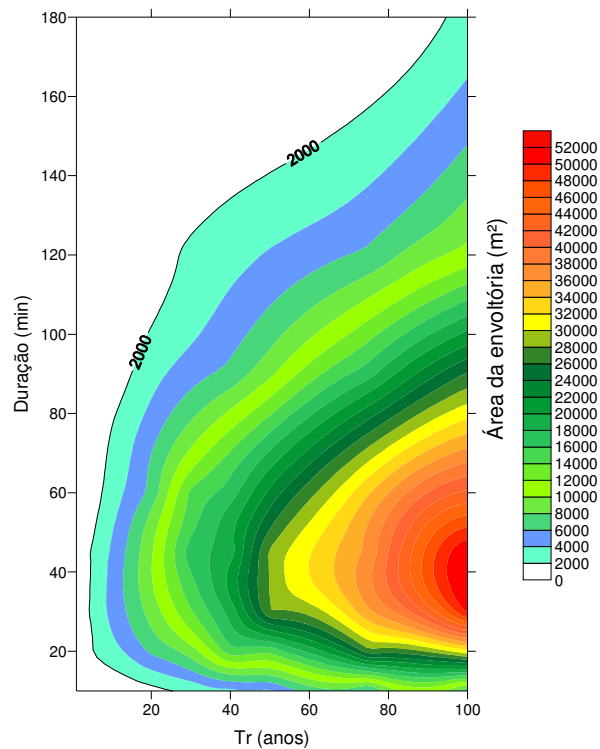


Figura 5.64 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e chuva tipo 2

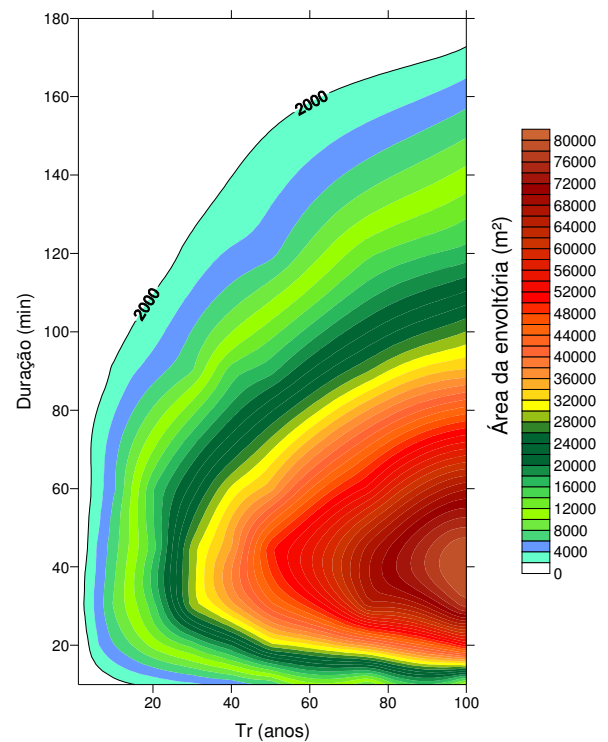


Figura 5.65 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e chuva tipo 3

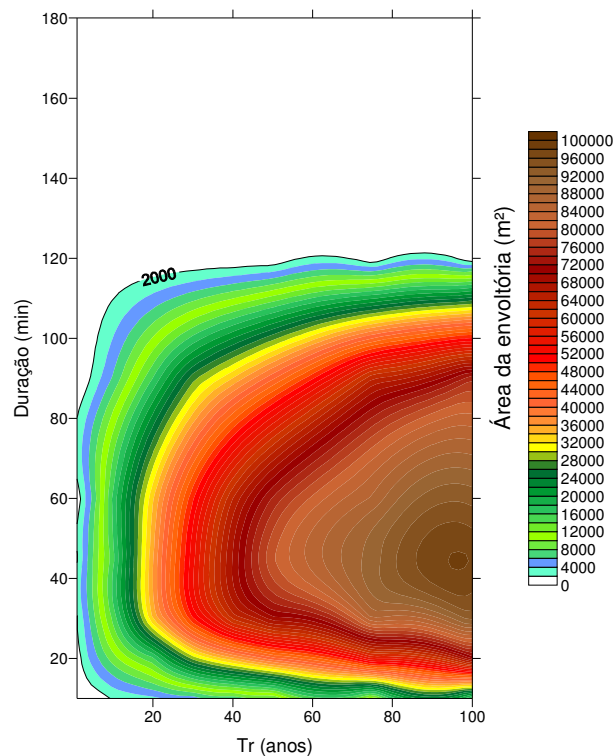
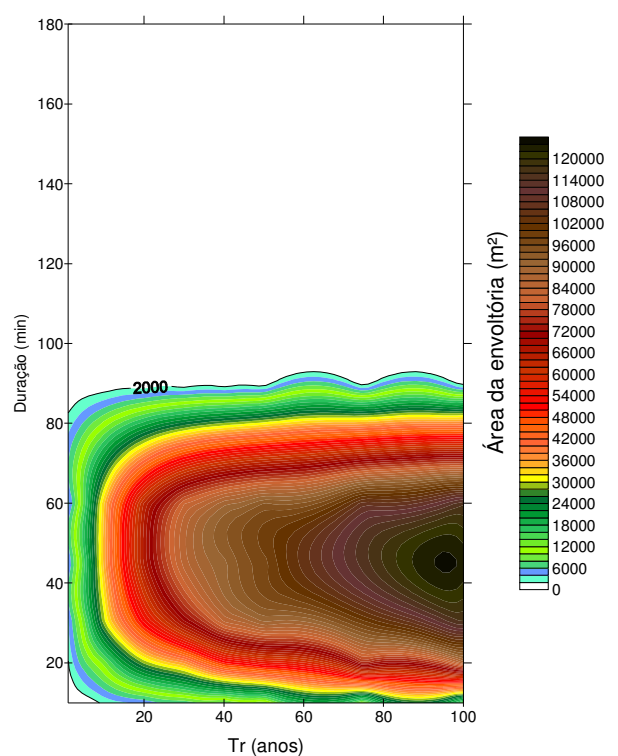


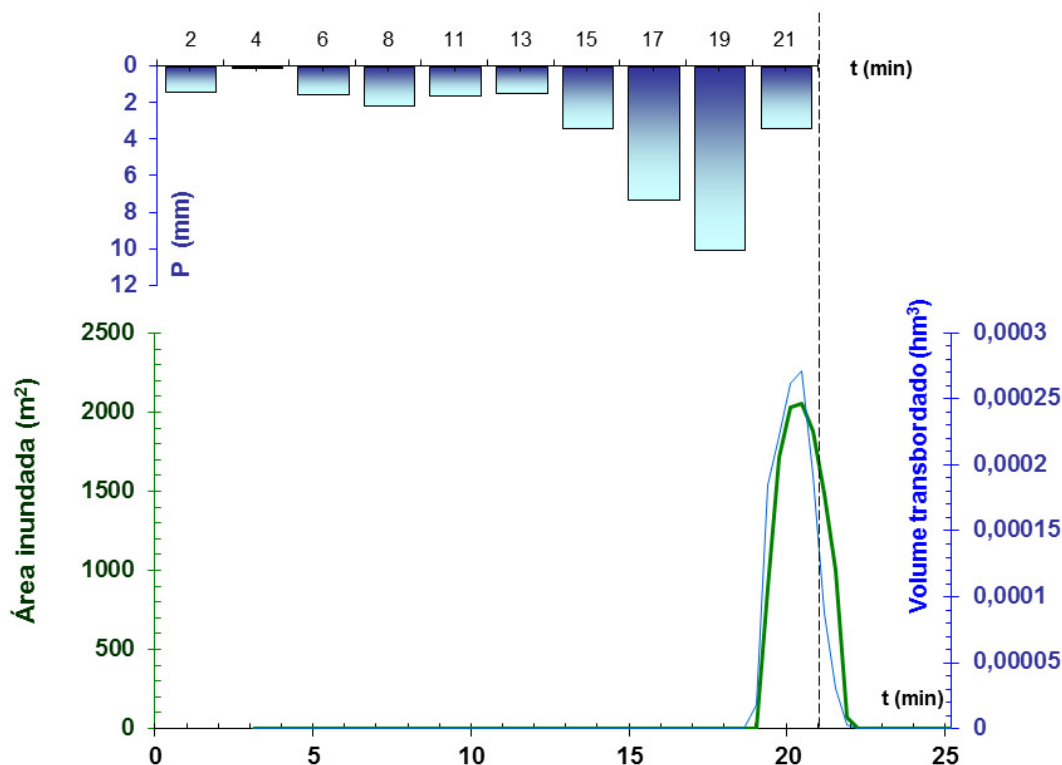
Figura 5.66 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 80% da área livre e chuva tipo 4



Assim como nos itens anteriores, na condição de 80% de ocupação da área livre, com o tipo de chuva 4, são observados dois tipos de casos extremos: o mínimo e o máximo. Para a enchente mínima, o tem-se o inundograma da Figura 5.67. Percebe-se que este diagrama é gerado pelo hietograma de uma precipitação que tem o tempo de retorno de 1 ano, com uma duração de 21 minutos e com o tipo de chuva de 4.

Quando o grau de ocupação da bacia aumenta, vislumbrou-se, desde o item anterior, a tendência do inundograma estender-se além do final da chuva. Esta tendência foi confirmada pelas simulações com ocupação de 80% da área livre remanescente. O pico da enchente mínima ocorre praticamente no instante final da chuva e a recessão do inundograma avança no tempo, mesmo com o fim do evento de precipitação.

Figura 5.67 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 21 minutos e chuva tipo 4.



Na análise de enchentes em instantes específicos (Figuras 5.68 a 5.70), verificaram-se, na planície de inundação, profundidades alagadas máximas em torno de 23 cm, para a fase crítica.

Figura 5.68 – Pontos atingidos para o instante de 19 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.

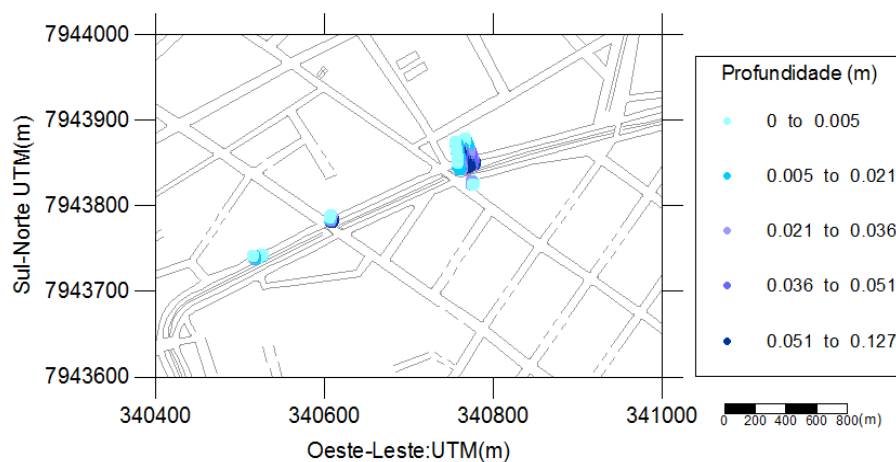


Figura 5.69 – Pontos atingidos para o instante de 21 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.

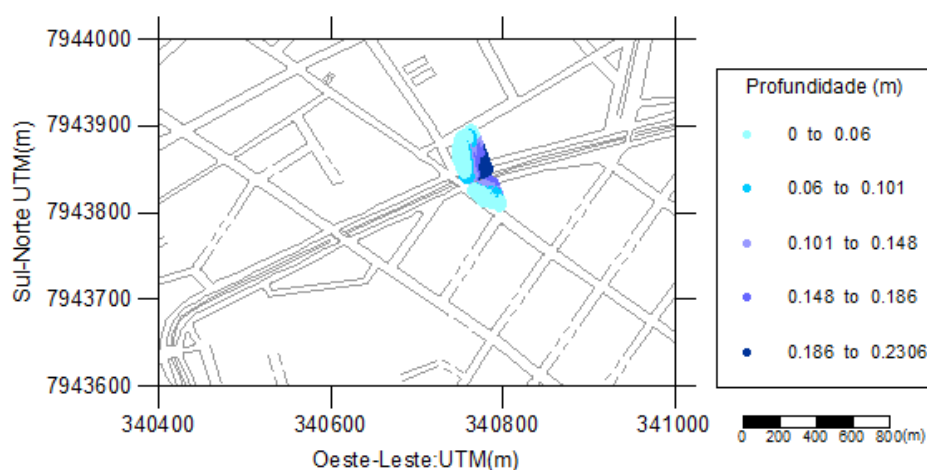
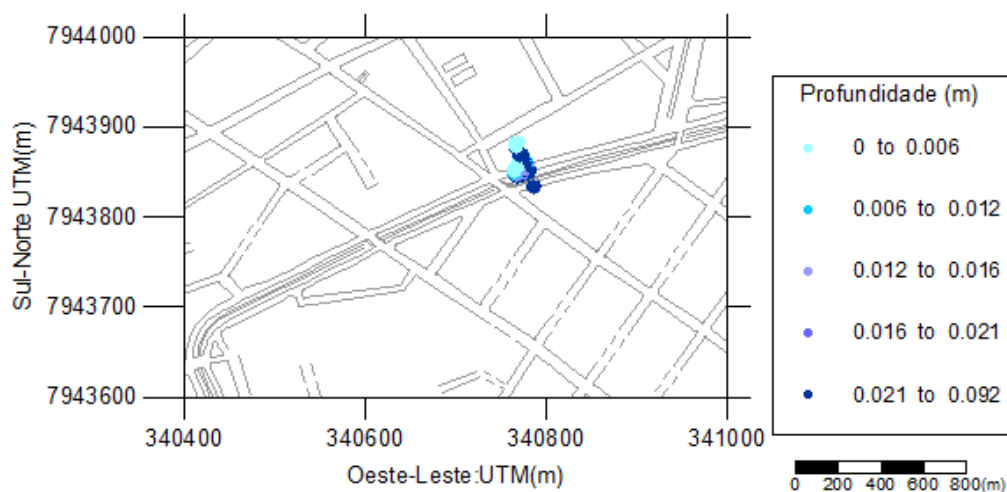


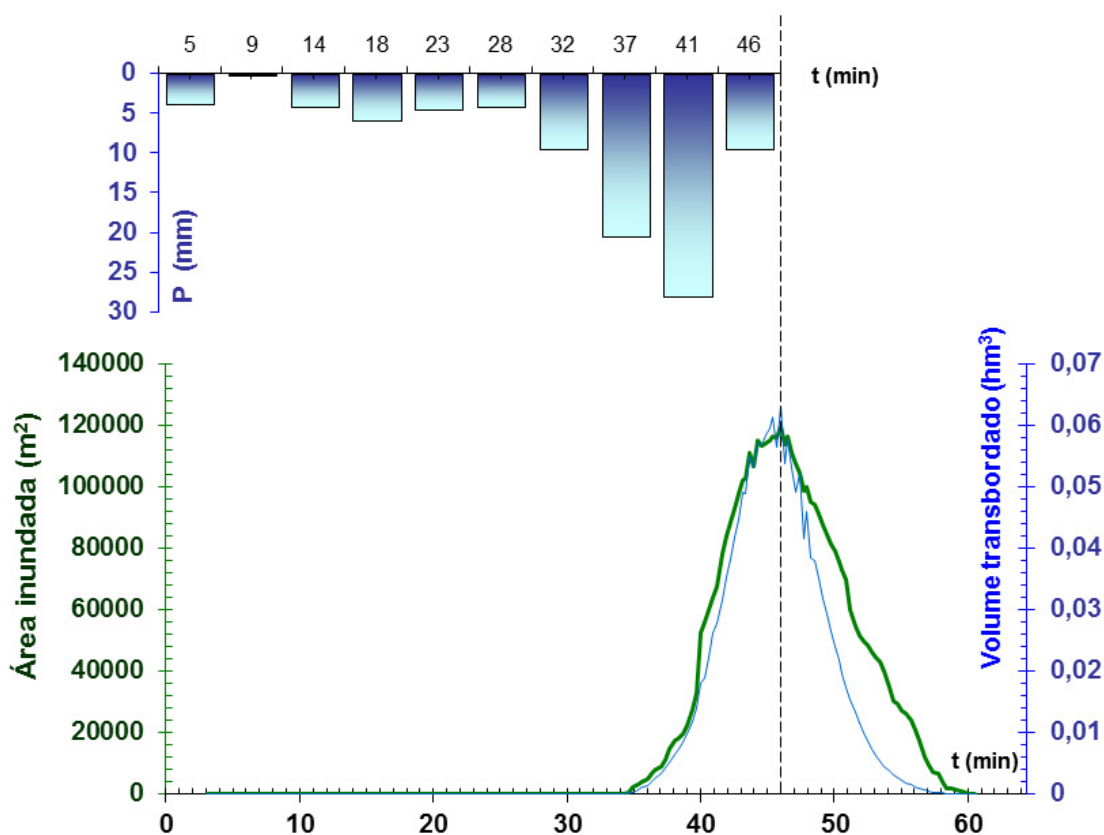
Figura 5.70 – Pontos atingidos para o instante de 22 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 21 minutos, chuva tipo 4.



A condição de máxima envoltória para as “chuvas catastróficas” foi determinada com o tempo de retorno de 100 anos, com uma duração de 46 minutos e com o tipo de chuva de 4. No inundograma da Figura 5.71 verifica-se que o pico de cheia ocorre após o término da chuva e um pouco depois do pico de precipitação, que foi no tempo de 41 minutos.

Nota-se que tanto o aumento da ocupação da bacia, quanto o aumento do tempo de retorno da chuva contribuem para ampliar a base do inundograma. Este fator significa que os alagamentos tendem a perdurar por mais tempo. O deslocamento do inundograma para a direita também é observado com o aumento da área urbanizada da bacia, indicando que os picos de enchente tendem a surgir após o término da precipitação. O aumento da ocupação da bacia também diminui a duração da chuva responsável tanto pelas enchentes mínimas, quanto pelas enchentes máximas. O resultado disto traz a possibilidade das inundações serem mais recorrentes.

Figura 5.71 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 46 minutos e chuva tipo 4.



As Figuras 5.72 a 5.74 ilustram as áreas inundáveis em planta, para diferentes instantes do inundograma. Em linhas gerais, nota-se um crescimento pronunciado das manchas de inundação, tanto em largura, quanto ao longo do alinhamento longitudinal do canal. Para o instante crítico de enchente, aquele na qual a soma das áreas inundáveis é maior, as inundações concentram-se basicamente no alto curso do trecho estudado, principalmente a partir da afluição do Córrego do Mocambo. Na fase de recessão, a enchente torna-se mais distribuída ao longo do comprimento do canal.

Figura 5.72 – Pontos atingidos para o instante de 40 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.

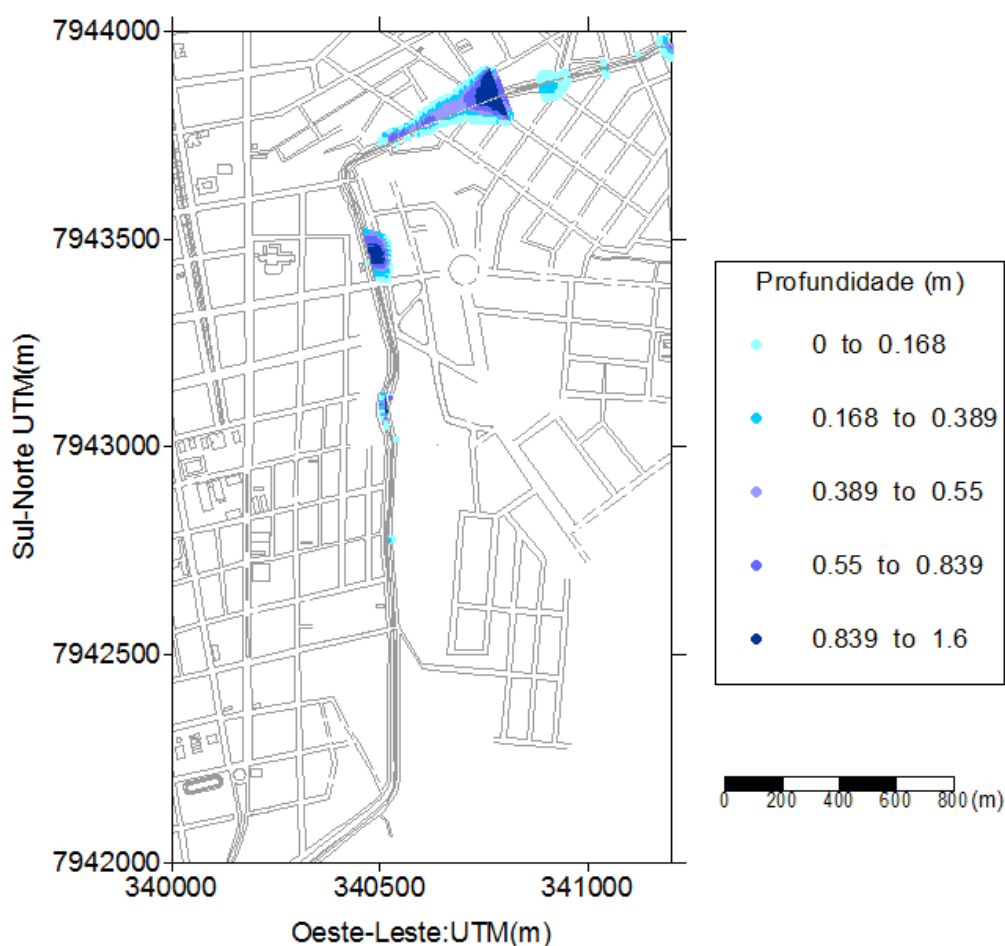


Figura 5.73 – Pontos atingidos para o instante de 46 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.

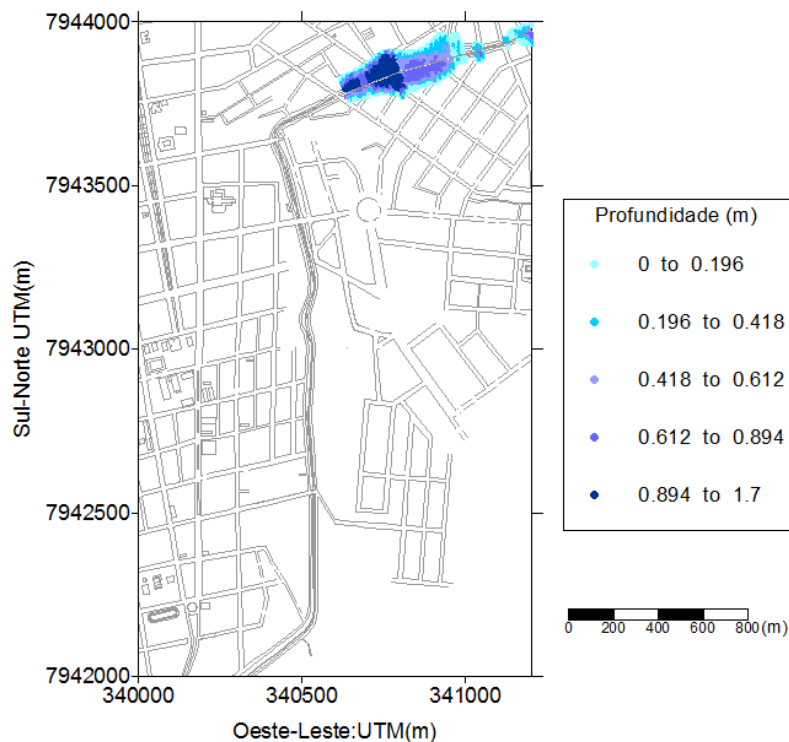
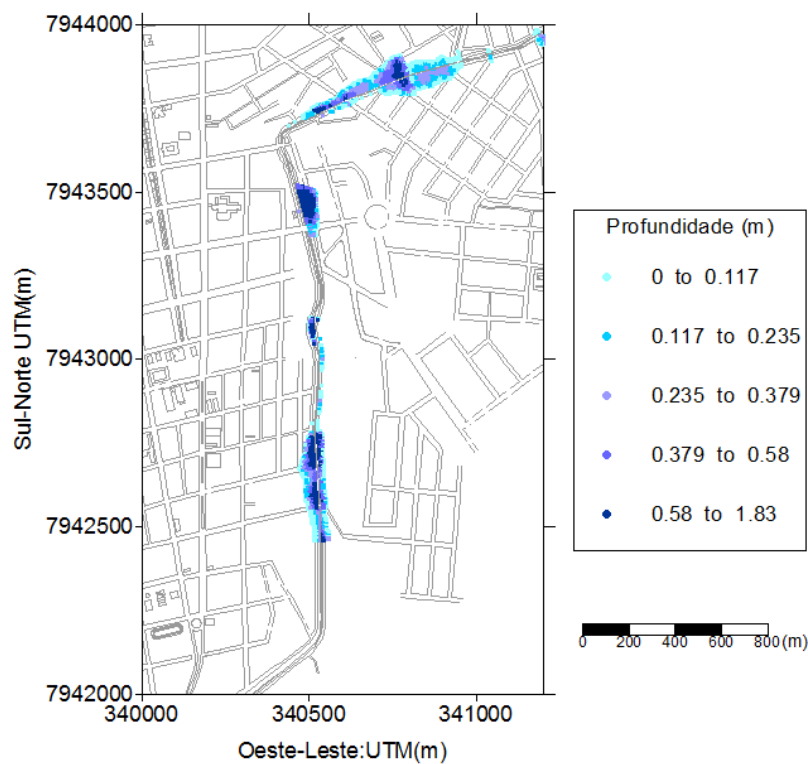


Figura 5.74 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 80% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 46 minutos, chuva tipo 4.



Diante das simulações do cenário de 80% da ocupação urbana da área livre conclui-se que as áreas de enchentes tiveram um crescimento significativo quando comparadas aos cenários anteriores.

E) Condição atual mais 100% de ocupação da área livre

Este cenário de ocupação é o mais extremo de todos, no qual toda a bacia está supostamente urbanizada, incluindo a faixa de cabeceira, situada fora do perímetro urbano de Patos de Minas. Na condição atual mais 100% de ocupação da área livre percebe-se a ocorrência de enchentes mínimas com um tempo de retorno máximo de 2 anos para todos os tipos de chuva. A chuva do tipo 1 possui uma área máxima de envoltória maior do que a máxima área de envoltória da chuva de tipo 4, na condição de ocupação atual. Isto comprova que, se a bacia for totalmente urbanizada, haverá modificações notáveis na sua dinâmica hídrica. Os tipos de chuva 1,2,3 e 4 chegam a cenários com grandes áreas de envoltórias (figuras 5.75, 5.76, 5.77 e 5.78).

Figura 5.75 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e chuva tipo 1

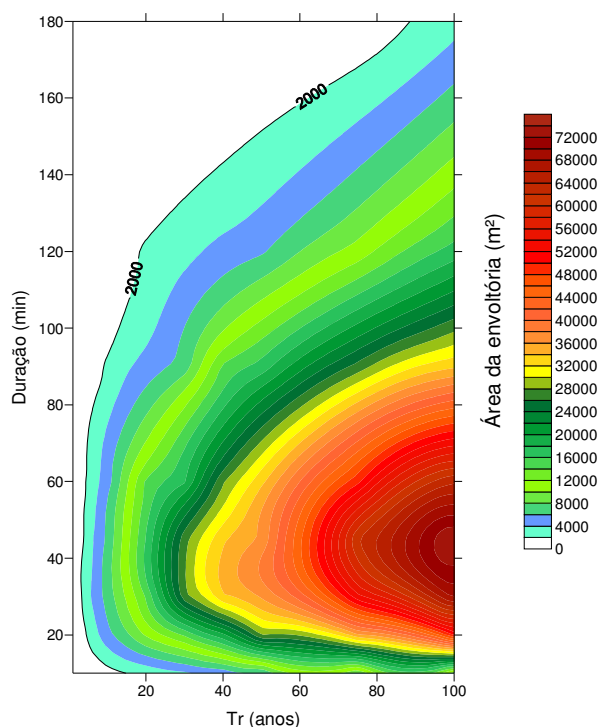


Figura 5.76 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e chuva tipo 2

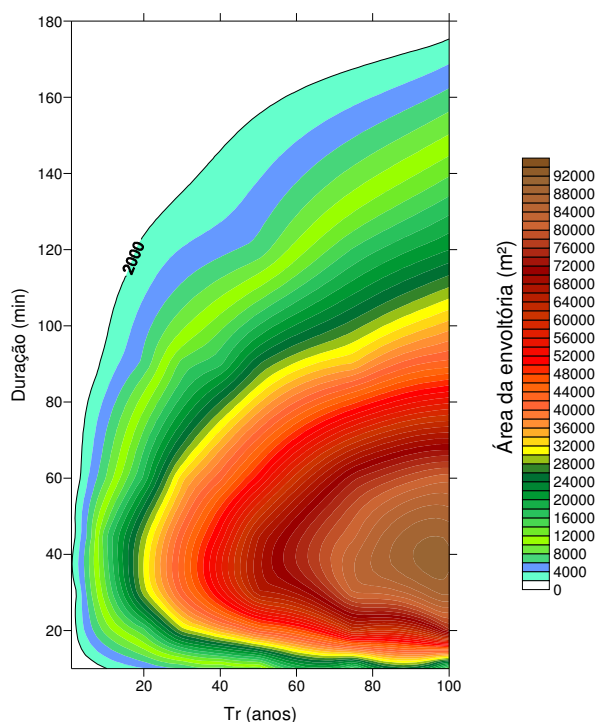


Figura 5.77 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 3

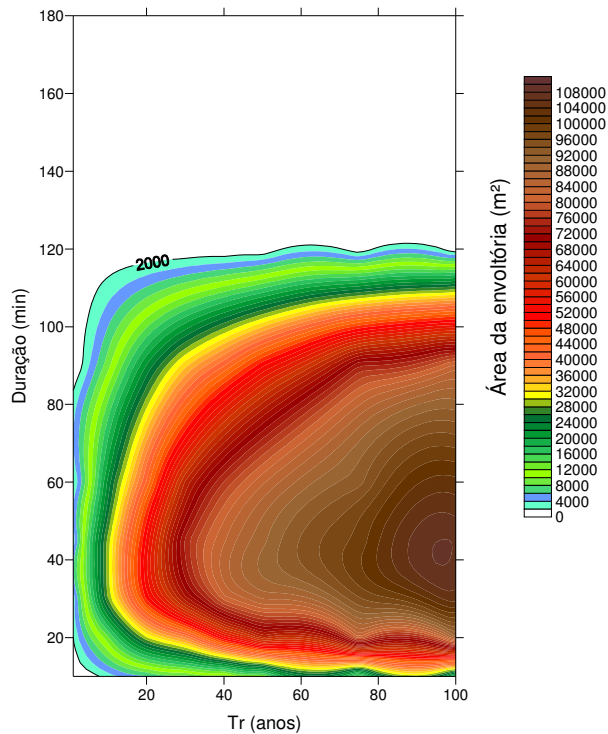
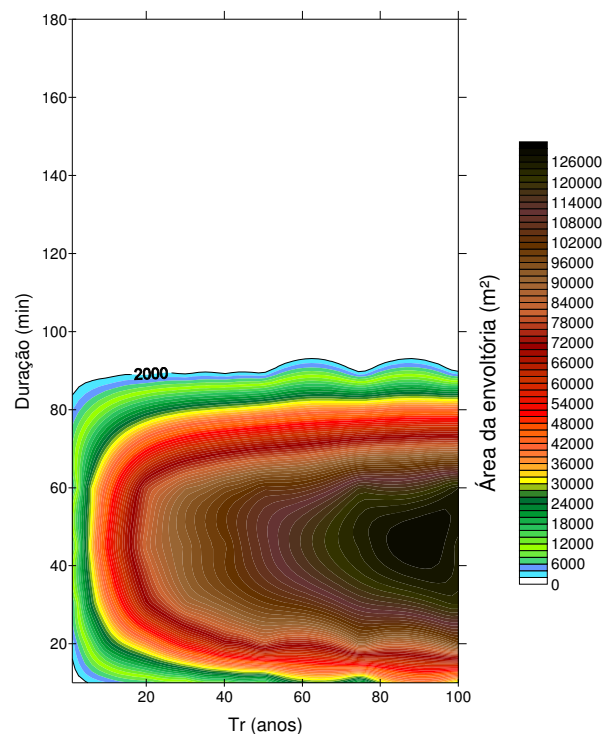


Figura 5.78 – Distribuição da área da envoltória de enchente para condição de ocupação residencial em 100% da área livre e Chuva tipo 4

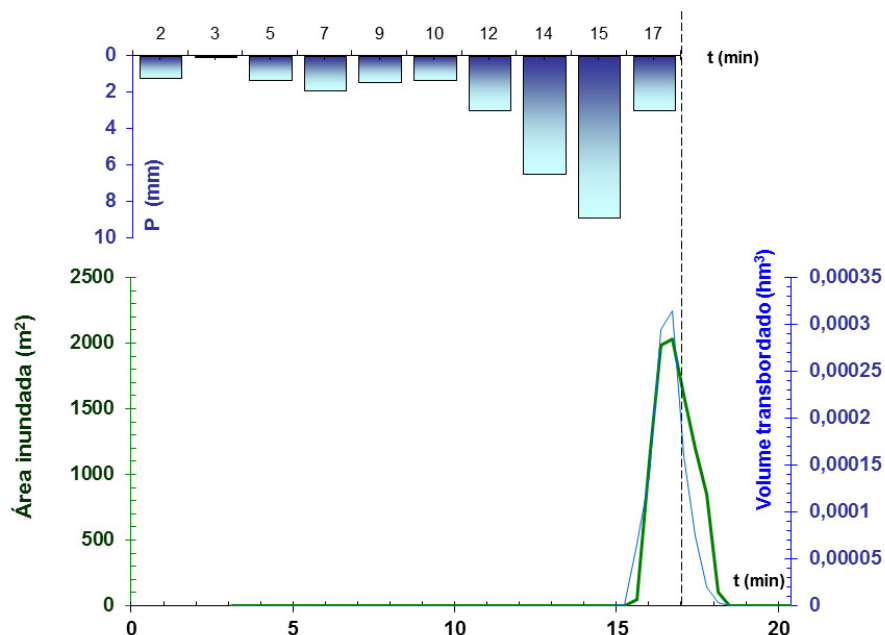


Assim como nos casos anteriores, para a condição de 100% de ocupação da área livre, para o tipo de chuva 4, são observados dois tipos de casos extremos: o mínimo e o máximo.

O inundograma do caso mínimo (figura 5.79) tem o tempo de retorno de 1 ano, com uma duração de 17 minutos e com o tipo de chuva de 4. O pico da precipitação ocorreu com 15 minutos gerando o pico crítico de enchente com 17 minutos e com uma área superior a 2000 m².

Além disso, esta chuva para este cenário possui um tempo de retorno de 1 ano, consequente traria problemas de inundação de ano em ano para a população. Esta simulação comprovou a tendência das enchentes mínimas ocorrerem para chuvas de menor duração e menor tempo de retorno. O resultado indica a possibilidade de enchentes recorrentes por transbordamento da água do canal.

Figura 5.79 – Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 17 minutos e chuva tipo 4.



As manchas de inundação da enchente mínima, para três instantes específicos, são ilustradas pelas Figuras 5.80 a 5.82. No caso, as profundidades máximas não variaram muito em relação à ocupação de 80%, atingindo a planície de inundação com o máximo em torno de 23 cm de lâmina de água. Nota-se também que a enchente mínima tende a concentrar-se em torno de um mesmo setor.

Figura 5.80 – Pontos atingidos para o instante de 16 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.

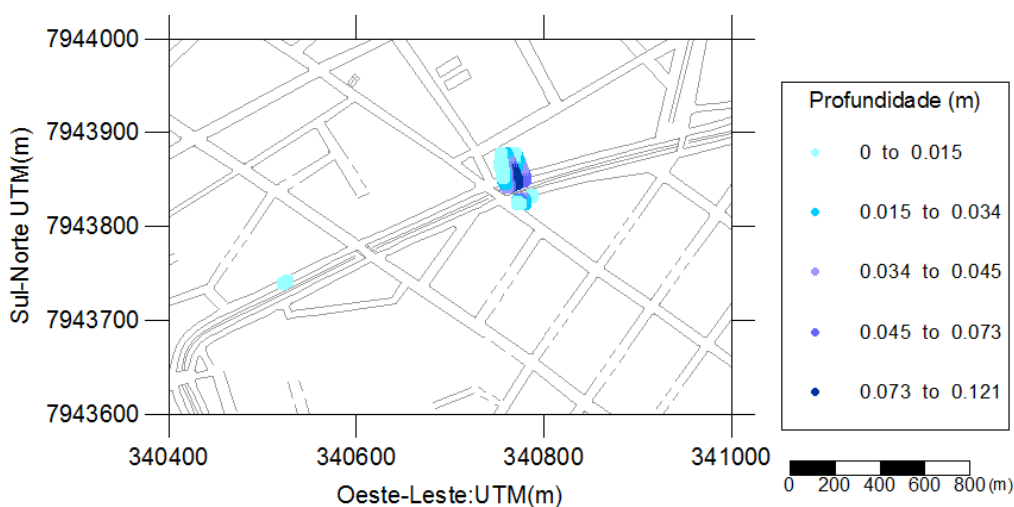


Figura 5.81 – Pontos atingidos para o instante de 17 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.

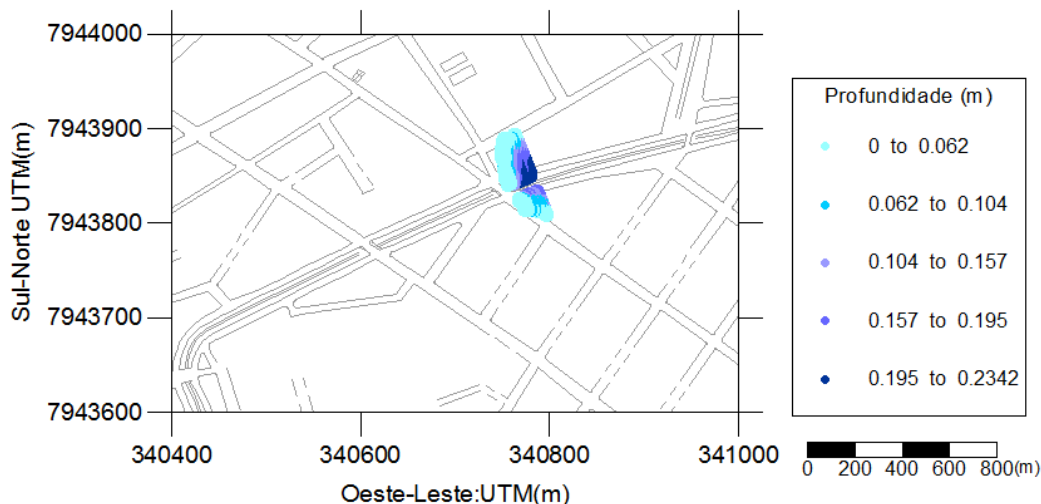
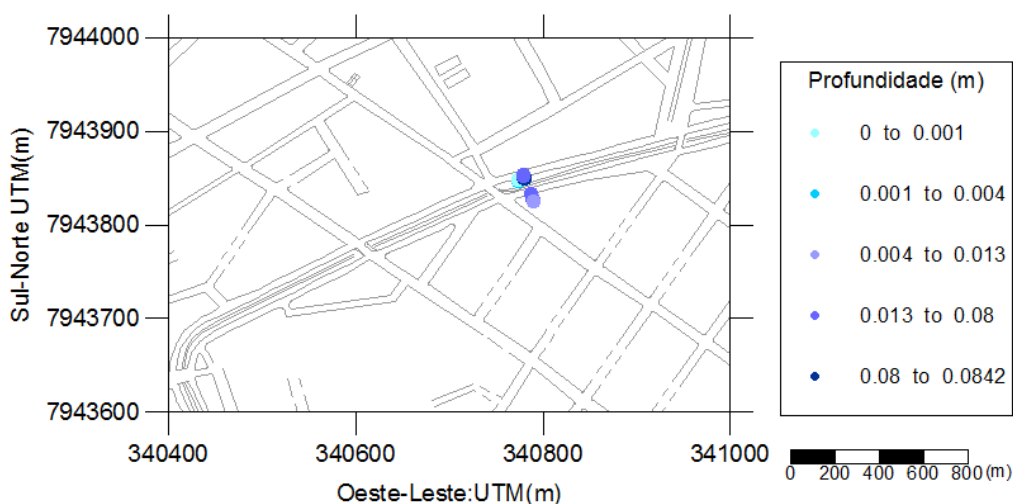
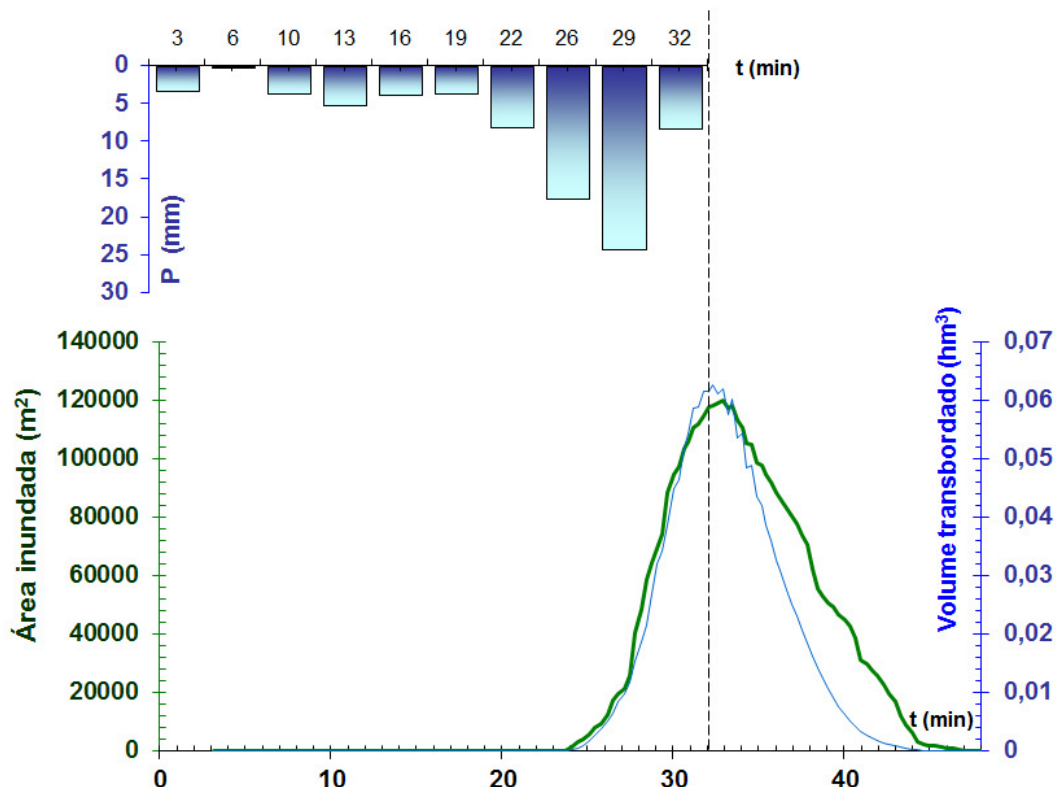


Figura 5.82 – Pontos atingidos para o instante de 18 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 1 ano, duração de 17 minutos, chuva tipo 4.



As condições de máximas envoltórias para as “chuvas catastróficas” foram determinadas com o tempo de retorno de 100 anos, com uma duração de 32 minutos e com o tipo de chuva 4. No inundograma da figura 5.83 verifica-se que o pico de cheia ocorre após o término da chuva e um pouco depois do pico de precipitação, como ocorre nos cenários anteriores. Nota-se também que o inundograma apresenta uma tênue perda de simetria, indicando que a maior parte da duração das enchentes situa-se após o valor de pico, depois do término da precipitação.

Figura 5.83 – Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $T_r = 100$ anos, duração = 32 minutos e chuva tipo 4.



Na análise das enchentes, mapeadas em planta para instantes específicos (Figuras 5.84 a 5.87) percebe-se o mesmo padrão do cenário de ocupação anterior. Na fase crítica, há alagamentos notáveis a jusante do encontro do Córrego do Mocambo com o Córrego do Monjolo. As lâminas líquidas mais extremas na planície de inundação chegam a atingir a ordem de 2 m. Na fase de recessão, as zonas inundáveis distribuem-se ao longo do alto, médio e baixo curso do canal. Este resultado confirma que as dimensões do canal são insuficientes para conter a propagação da cheia gerada por chuvas de grande período de retorno.

Figura 5.84 – Pontos atingidos para o instante de 27 minutos, correspondente à fase de crescimento da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.

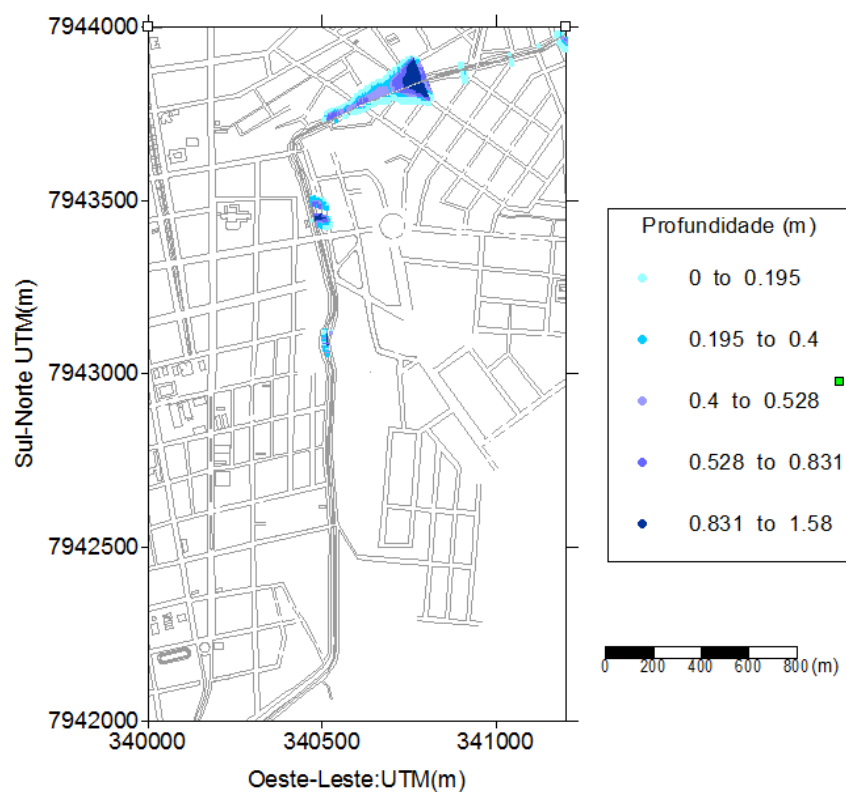


Figura 5.85 – Pontos atingidos para o instante de 33 minutos, correspondente à fase crítica da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.

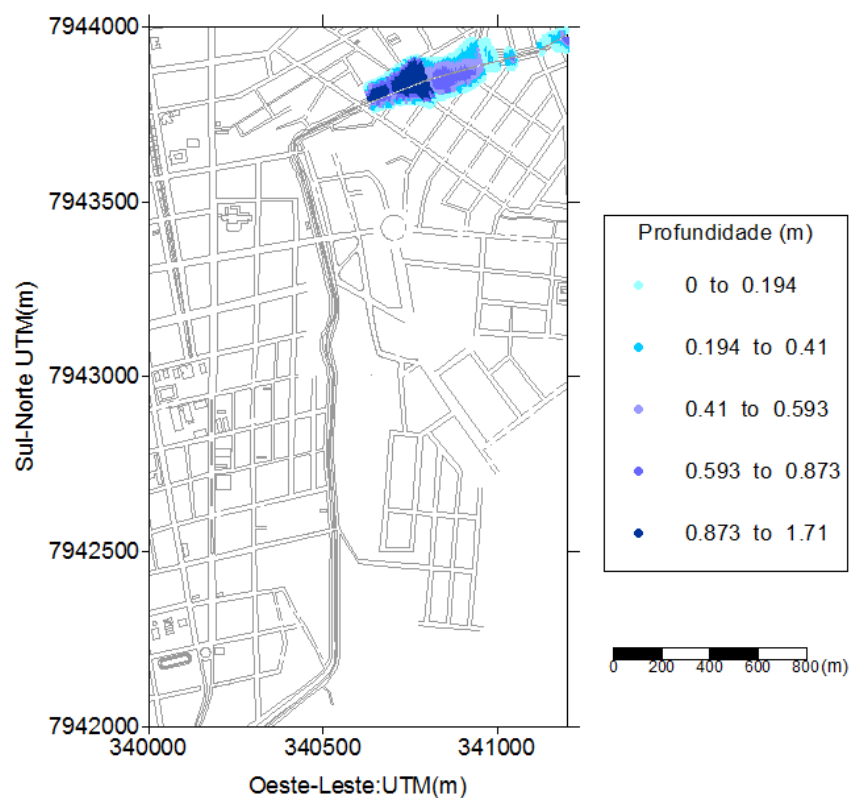
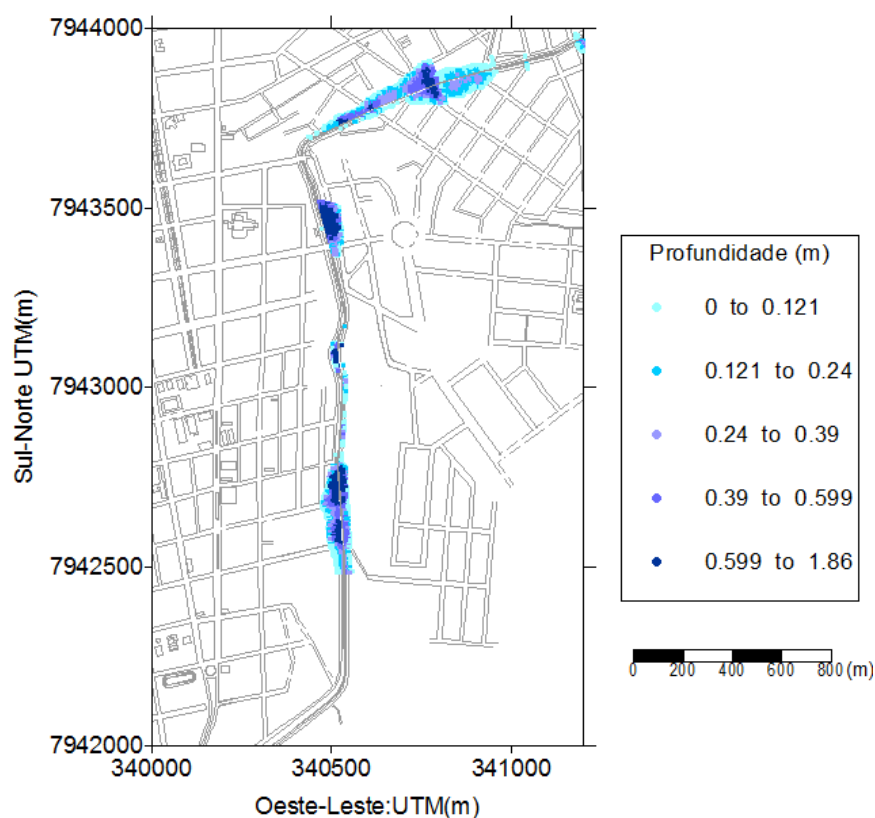


Figura 5.86 – Pontos atingidos para o instante de 51 minutos, correspondente à fase de recessão da enchente. Ocupação adicional de 100% da área remanescente, tempo de retorno de 100 anos, duração de 32 minutos, chuva tipo 4.



Apesar de previsível, conclui-se que as simulações do cenário de 100% da ocupação urbana da área livre levariam às condições mais críticas de enchentes na Bacia do Córrego do Monjolo. Porém, mesmo com o avanço da urbanização sobre a bacia, pode-se ocupar o solo com maiores taxas permeáveis nos loteamentos. O aumento das áreas permeáveis nos lotes pode reduzir as enchentes nas adjacências do canal de macrodrenagem. Além disso, é possível auxiliar o planejamento urbano na ocupação do solo no crescimento da cidade. Esta ideia é explorada no item seguinte.

5.3 CONDIÇÕES DE IMPERMEABILIZAÇÃO DOS LOTES

De acordo com o Plano Diretor de Patos de Minas a área permeável dos “ (...) novos loteamentos deve exigir a implantação e/ou conservação de áreas verdes (m²/hab) que atendam aos padrões recomendados pela ONU (Organização das Nações Unidas)” (PLANO DIRETOR, 1991, p.8).

Porém, a lei complementar nº 320, de 31 de dezembro de 2008, constitui a revisão da Lei de Zoneamento, Uso e Ocupação dos Terrenos e Edificações no Município de Patos de Minas, que regulamenta as obras urbanas com a exigência de 20% de áreas permeáveis nos lotes, para a liberação do “habite-se”. Com isto, a Tabela 5.3 apresenta as características de urbanização e as áreas permeáveis exigidas pela cidade.

Tabela 5.3 – Parâmetros de edificações na cidade de Patos de Minas

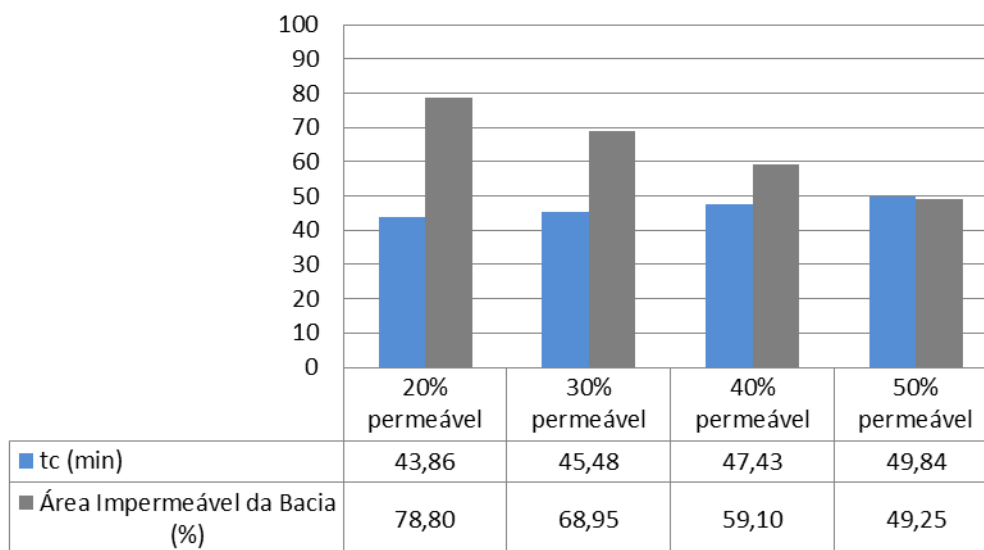
Macrozonas	Área mínima dos lotes (m²)	Usos	Taxa ocupação máxima (%)	Taxa de área permeável mínima (%)	Altura das edificações (Largura da via vezes)
De adensamento preferencial	360,00	Residencial unifamiliar, multifamiliar e não residencial.	70	10	3,00
De adensamento	360,00	Residencial unifamiliar, multifamiliar horizontal (exceto conjuntos) e não residencial.	70	20	1,00
Rural	5000,00	Residencial unifamiliar, multifamiliar e não residencial.	20	80	1,00

Fonte: Lei complementar nº 320, de 31 de dezembro de 2008. ORG. CAIXETA, 2012

Assim, as condições de chuva crítica, encontradas na condição de urbanização A, B, C, D e E já analisadas, comprovou que o cenário mais crítico é o de chuva com distribuição temporal tipo 4. Com isto, foi proposta a simulação de áreas permeáveis nos lotes, com taxas de 20%, 30%, 40% e 50% , utilizando o tipo de chuva 4 e os cenários de urbanização B,C,D e E. A urbanização “A” não foi utilizada por causa das residências já serem edificadas.

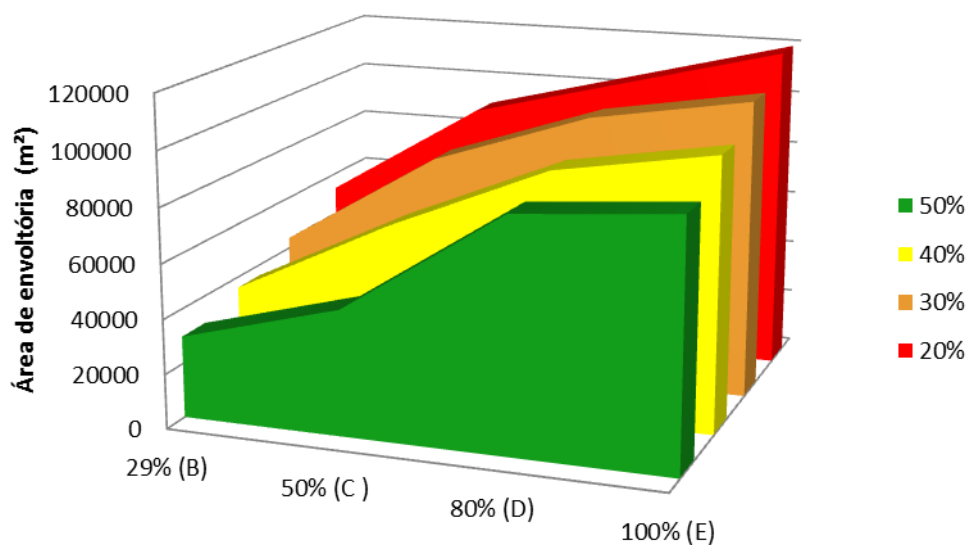
Como a ocupação das áreas remanescentes refere-se a condições de uso residencial do solo, os valores de CN não sofreram variação, mas o tempo de concentração e a área impermeável tiveram valores variáveis conforme o cenário simulado. A Figura 5.87 apresenta a variação do tempo de concentração e da área impermeável para a condição E (100% de ocupação da área livre), que foi o cenário mais crítico encontrado. O tempo de concentração da bacia apresenta um crescimento com a redução da área impermeável, o que é favorável para a redução dos picos de cheia nas bacias urbanas.

Figura 5.87 – Variação do tempo de concentração com a taxa de área permeável dos lotes.



A Figura 5.88 apresenta as áreas de envoltórias máximas para a porcentagem de lotes permeáveis. Ao dobrar a área permeável de 20% para 40% a envoltória máxima reduz 20000 m² na área máxima (urbanização E), que é uma área significativa. Assim, é fundamental ter um planejamento do crescimento urbano, adequando as áreas permeáveis, para redução do risco de enchentes.

Figura 5.88 – Área de envoltória máxima para porcentagem dos lotes permeáveis



Também a Figura 5.88 permite verificar como a área permeável nas zonas residenciais gera a redução significativa da área de enchente. Isto é, 50% da área permeável na condição de E (100% de ocupação da área livre) é similar à condição de 20% de área permeável na condição C (50% de ocupação da área livre).

Os itens 5.3.1 a 5.3.4, fazem uma abordagem de como diferentes taxas de áreas permeáveis nos lotes alteram os cenários de enchentes para diferentes taxas de urbanização da área remanescente da bacia, utilizando exclusivamente ocupações residenciais

5.3.1- Alterações para 29% de ocupação da área remanescente da bacia

As Figuras 5.89 a 5.92 ilustram as distribuições das áreas de envoltória de enchente, para diferentes cenários de impermeabilização dos lotes, considerando diversas condições de chuva (durações e tempos de recorrência). Os gráficos foram obtidos para o hietograma tipo 4, uma vez que esta distribuição temporal de chuva induz os cenários mais críticos de alagamentos.

Figura 5.89 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

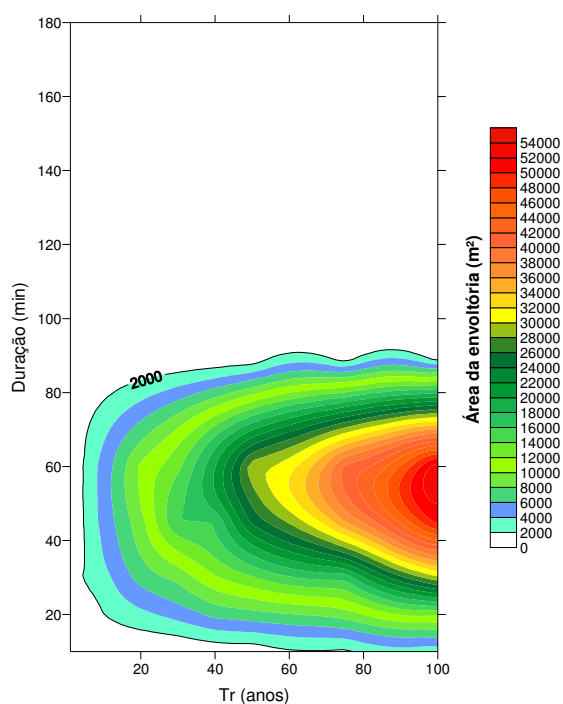


Figura 5.90 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

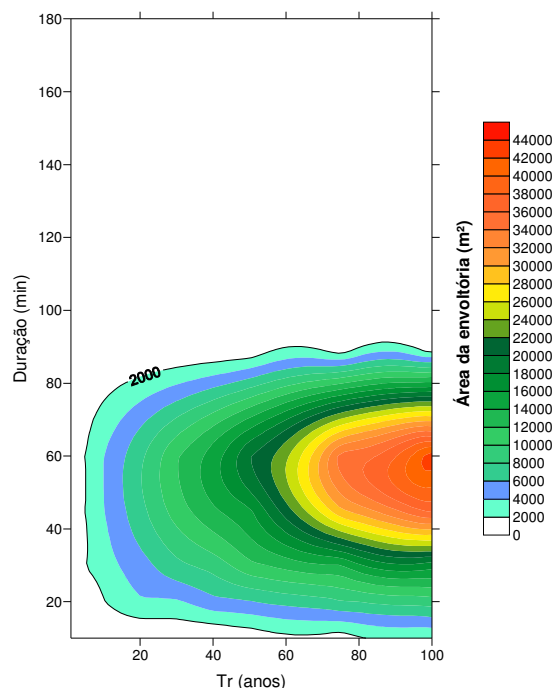


Figura 5.91 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

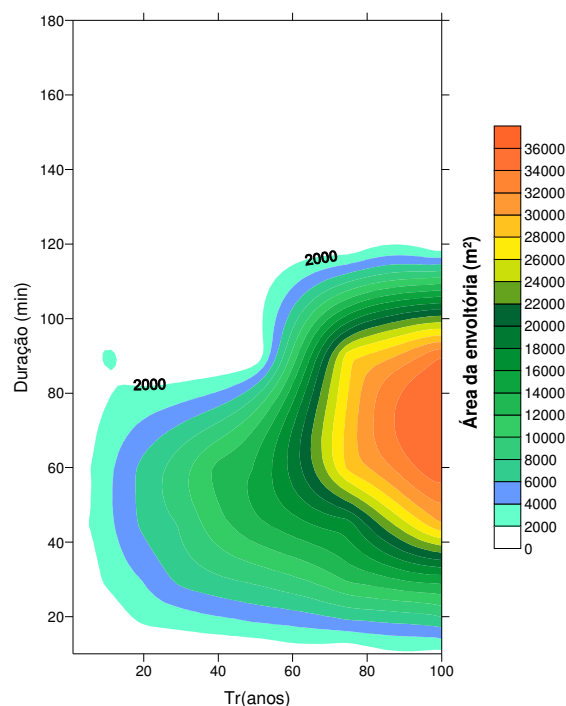
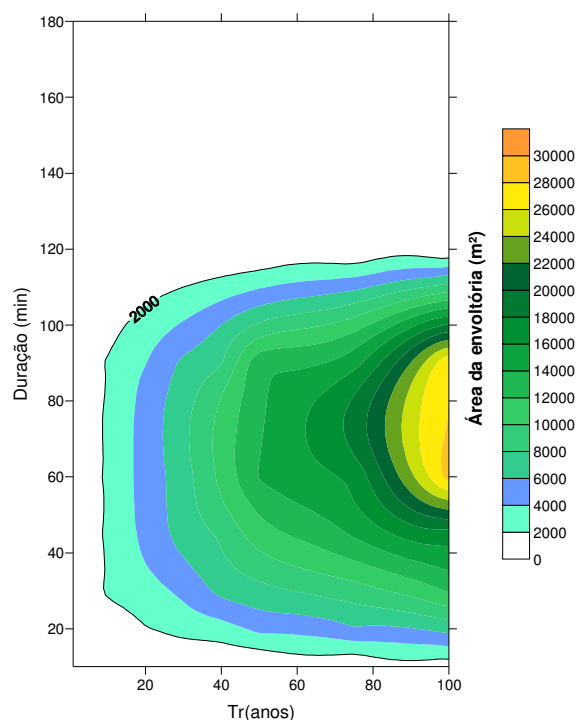


Figura 5.92 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização B (29% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4



Por uma breve análise desses diagramas, percebe-se que o aumento da taxa de áreas permeáveis nos lotes reduz sensivelmente as áreas das envoltórias de inundação, independente das condições de precipitação impostas. Para as enchentes máximas, por exemplo, verificadas para chuvas com períodos de retorno de 100 anos, a área da envoltória sofreu uma redução da ordem de 24000 m^2 , da situação de 20% para a situação de 50% de áreas permeáveis nos lotes. Em termos meramente comparativos, no que se refere à área superficial ocupada, isto equivale aproximadamente a 20 piscinas olímpicas oficiais (de $25 \times 50 \text{ m}$).

O aumento das áreas permeáveis nos lotes também resulta na queda da probabilidade de ocorrência de enchentes mínimas (aquelas cuja envoltória atinge cerca de 2000 m^2). Em termos numéricos, a taxa de 20% de área permeável tende a produzir enchentes mínimas com tempos de retorno de 4,5 anos, para 31 minutos de duração de uma chuva tipo 4. Quando ocorre um aumento para 50% de taxa de área permeável, as enchentes mínimas já tendem a surgir para chuvas com 8 anos de tempo de retorno e 60 minutos de duração. Estes valores permitem deduzir que a redução das áreas impermeáveis dentro dos lotes

contribui massivamente para a redução das inundações na bacia analisada, haja vista que há um aumento sensível do período de retorno e da duração da chuva que causa a enchente mínima.

5.3.2- Alterações para 50% de ocupação da área remanescente da bacia

As Figuras 5.93 a 5.96 ilustram as distribuições das áreas de envoltória de enchente, para diferentes cenários de impermeabilização dos lotes, considerando diversas condições de chuva tipo 4, no que diz respeito às suas durações e tempos de recorrência.

Figura 5.93 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

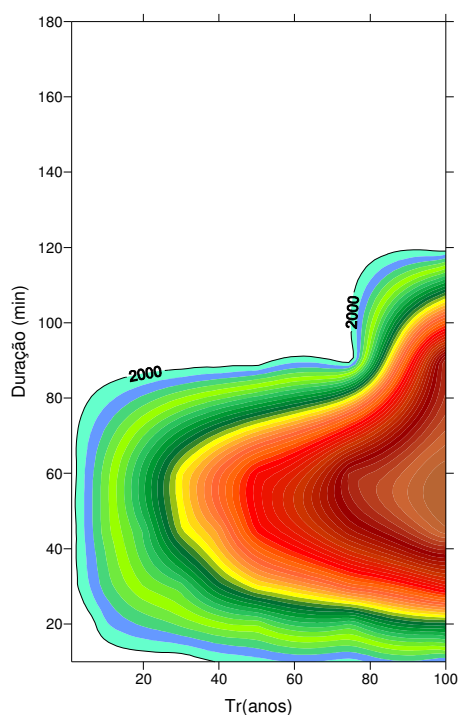
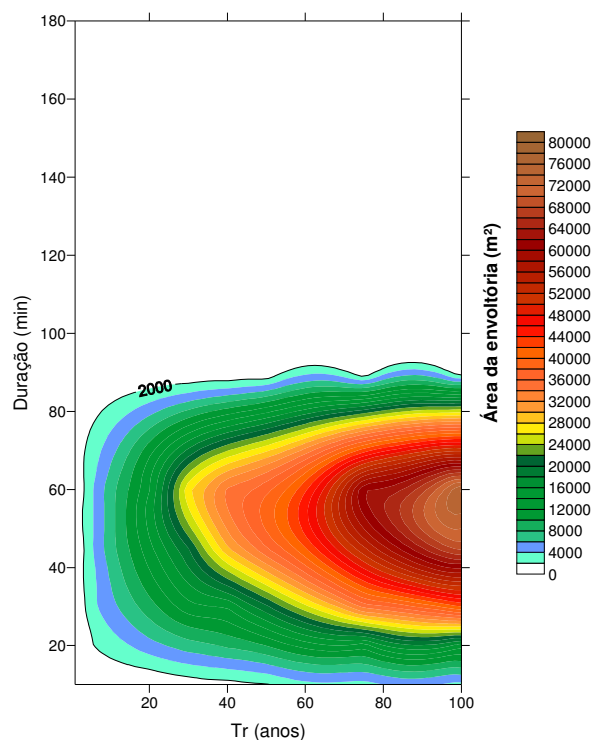


Figura 5.94 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4



Neste caso, quando o grau de ocupação da área livre da bacia aumenta para 50%, percebe-se que o aumento da taxa de áreas permeáveis nos lotes reduz mais drasticamente as áreas das envoltórias de inundação, independente das condições de precipitação impostas. Para as enchentes máximas, verificadas para chuvas com períodos de retorno de 100 anos, a área da envoltória sofreu uma redução da ordem de 42.000 m², da situação de 20% para a situação de 50% de áreas permeáveis nos lotes. Em termos comparativos, isto equivale aproximadamente à área de 34 piscinas olímpicas oficiais. Em relação ao item anterior

(condição de ocupação B), esta redução é da ordem de 75%. Isto tende a indicar que o grau de sensibilidade das áreas permeáveis, em nível de lote, é tão maior quanto mais ocupada estiver a bacia.

Figura 5.95 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

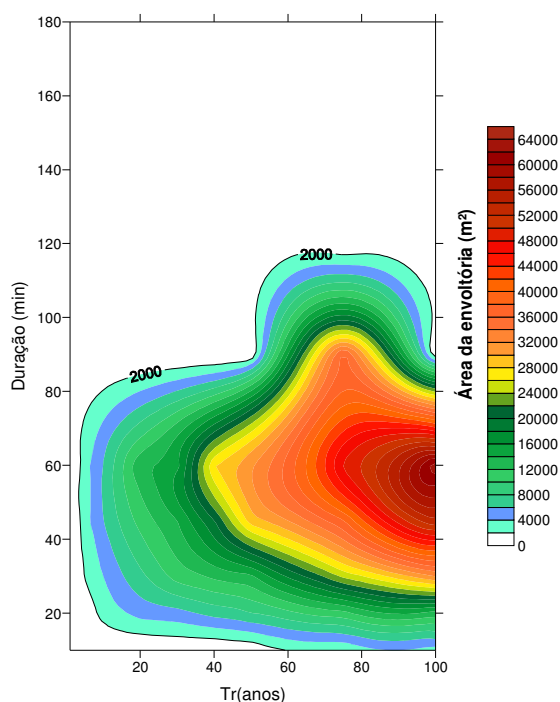
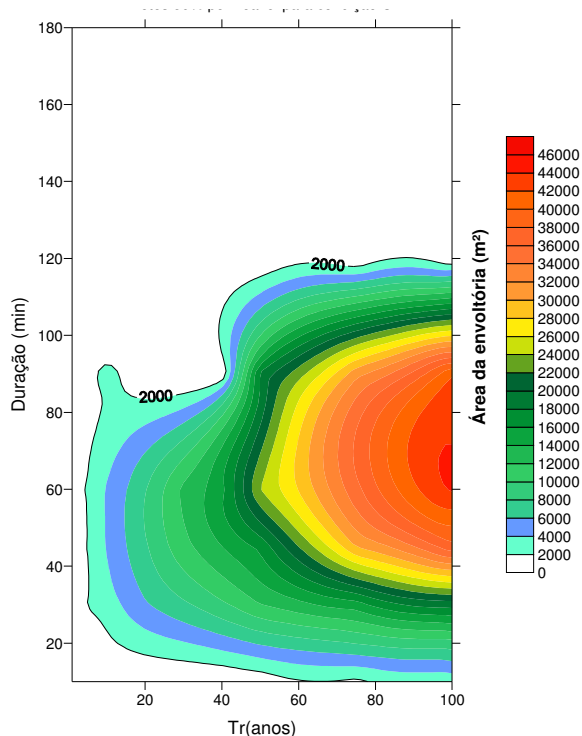


Figura 5.96 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização C (50% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4



Em relação às enchentes mínimas, as alterações também são consideráveis. Em termos numéricos, a taxa de 20% de área permeável tende a produzir enchentes mínimas com tempos de retorno de 2 anos, para 30 minutos de duração de uma chuva tipo 4. Quando ocorre um aumento para 50% de taxa de área permeável, as enchentes mínimas já tendem a surgir para chuvas com 4 anos de tempo de retorno e 60 minutos de duração.

5.3.3- Alterações para 80% de ocupação da área remanescente da bacia

As Figuras 5.97 a 5.100 ilustram as distribuições das áreas de envoltória de enchente, para diferentes cenários de impermeabilização dos lotes, considerando diversas condições de chuva tipo 4, no que diz respeito às suas durações e tempos de recorrência.

Figura 5.97 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

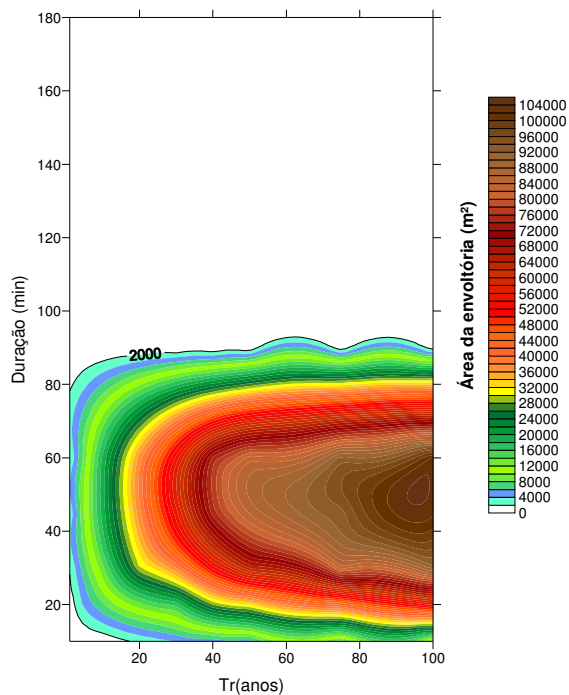


Figura 5.98 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

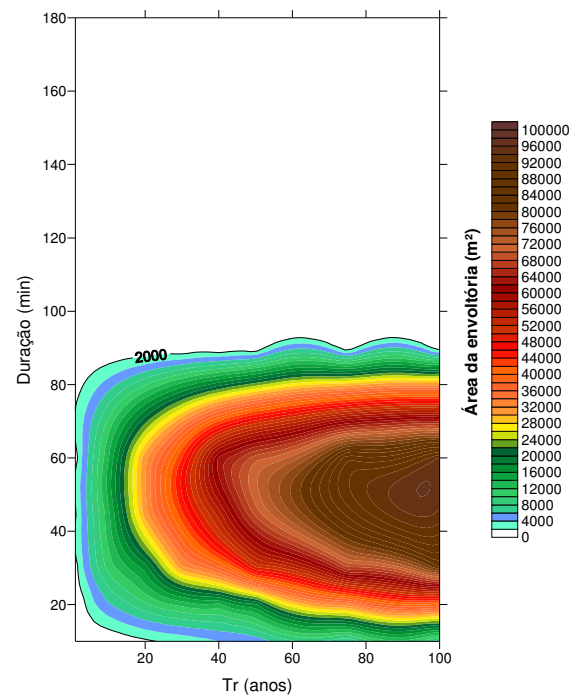


Figura 5.99 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

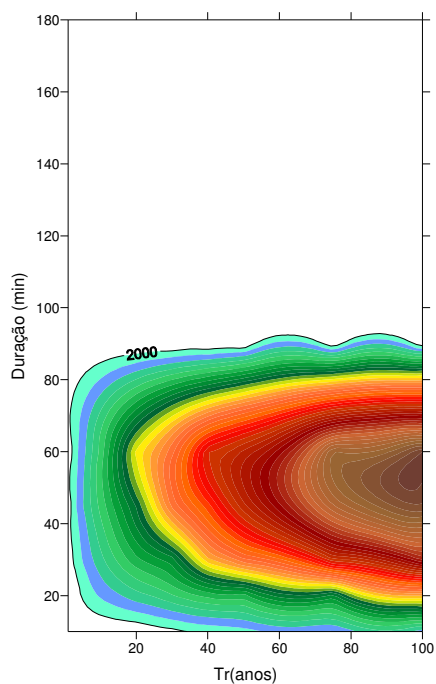
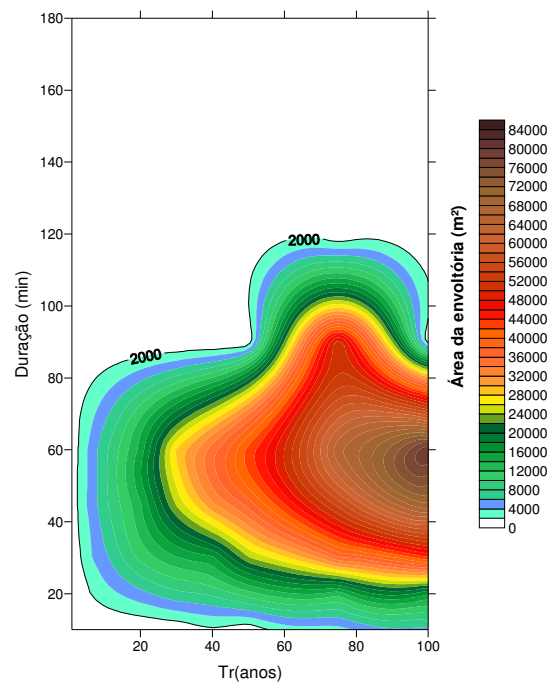


Figura 5.100 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização D (80% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4



Quando o grau de ocupação da área livre da bacia aumenta para 80%, percebe-se que o aumento da taxa de áreas permeáveis nos lotes também reduz as áreas das envoltórias de inundação, independente das condições de precipitação impostas. Esta redução, todavia, é menos sensível em relação à mudança do cenário de ocupação B para C. Para as enchentes máximas, verificadas para chuvas com períodos de retorno de 100 anos, a área da envoltória sofreu uma redução da ordem de 20000 m², da situação de 20% para a situação de 50% de áreas permeáveis nos lotes.

Em termos comparativos, isto equivale aproximadamente à área de 16 piscinas olímpicas oficiais. Note-se que a redução na área da envoltória máxima foi menos significativa do que aquela verificada no item anterior. Isto permite vislumbrar que, em relação ao surgimento de enchentes, o grau de sensibilidade das áreas permeáveis, em nível de lote, também depende do grau de ocupação da bacia.

Em relação às enchentes mínimas, as alterações também são consideráveis. Em termos numéricos, a taxa de 20% de área permeável tende a produzir enchentes mínimas com tempos de retorno de 1 ano, para 26 minutos de duração de uma chuva tipo 4. Quando ocorre um aumento para 50% de taxa de área permeável, as enchentes mínimas já tendem a surgir para chuvas com 2 anos de tempo de retorno e 38 minutos de duração.

5.3.4 - Alterações para 100% de ocupação da área remanescente da bacia

As Figuras 5.101 a 5.104 ilustram as distribuições das áreas de envoltória de enchente, para diferentes cenários de impermeabilização dos lotes, considerando diversas condições de chuva tipo 4, no que diz respeito às suas durações e tempos de recorrência.

Com a ocupação total da bacia, são obtidos os cenários mais críticos em termos de enchente. Nestas condições, as enchentes máximas apresentam maior área de envoltória, ao passo que as enchentes mínimas são induzidas por chuvas de menor tempo de recorrência.

Figura 5.101 – Taxa de área permeável de 20% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

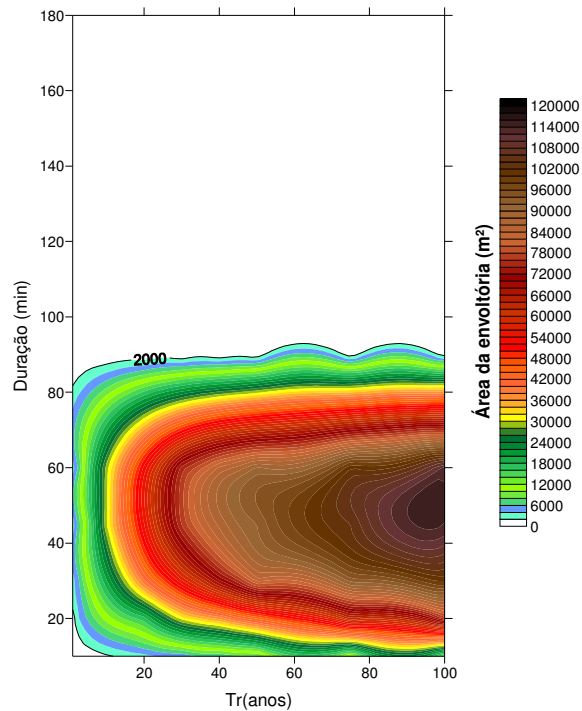


Figura 5.102 – Taxa de área permeável de 30% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

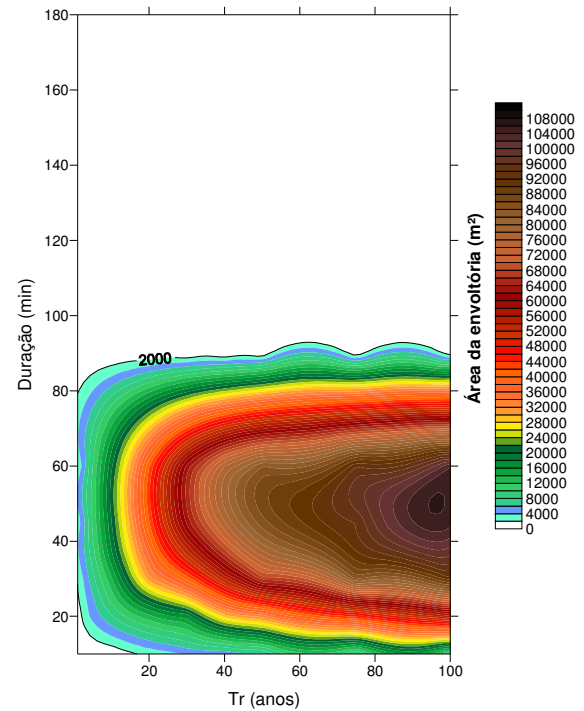


Figura 5.103 – Taxa de área permeável de 40% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4

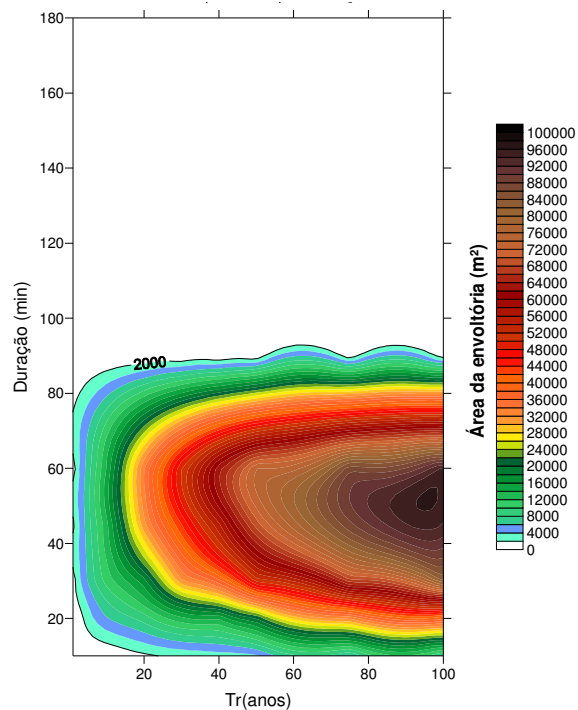
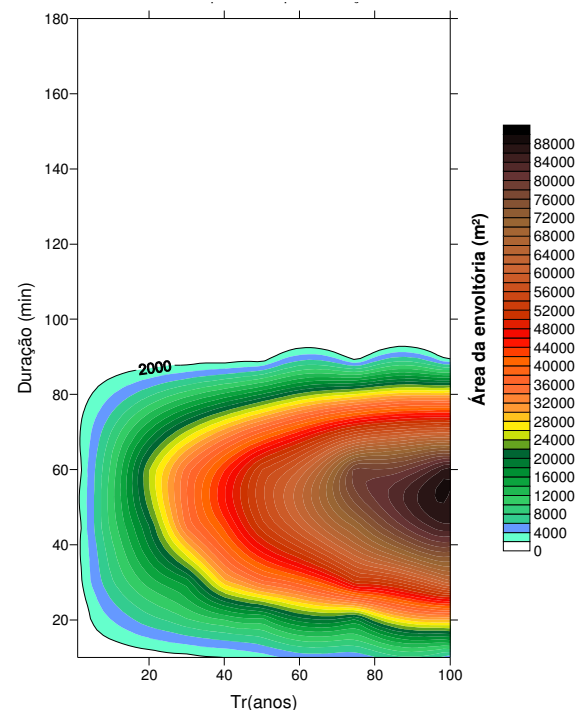


Figura 5.104 – Taxa de área permeável de 50% nos lotes. Condição de urbanização E (100% de ocupação da área remanescente da bacia) – chuva tipo 4



Quando o grau de ocupação da área livre da bacia aumenta para 100%, percebe-se que o aumento da taxa de áreas permeáveis nos lotes reduz consideravelmente as áreas das envoltórias de inundação, independente das condições de precipitação impostas. Esta redução torna a ser mais sensível em relação à mudança do cenário de ocupação C para D (item anterior). Para as enchentes máximas, verificadas para chuvas com períodos de retorno de 100 anos, a área da envoltória sofreu uma redução da ordem de 32000 m², da situação de 20% para a situação de 50% de áreas permeáveis nos lotes. Em termos comparativos, isto equivale aproximadamente à área de 26 piscinas olímpicas oficiais. Note-se que a redução na área da envoltória máxima foi mais significativa do que aquela verificada no item anterior. Apesar disso, o efeito é menos pronunciado do que aquele resultante da mudança de cenário B para C.

No que diz respeito às enchentes mínimas, as alterações também existem, mas são menos importantes do que nos casos em que a ocupação da bacia é menor. Em termos numéricos, a taxa de 20% de área permeável tende a produzir enchentes mínimas com tempos de retorno de 1 ano, para 24 minutos de duração de uma chuva tipo 4. Quando ocorre um aumento para 50% de taxa de área permeável, as enchentes mínimas já tendem a surgir para chuvas com 2 anos de tempo de retorno e 29 minutos de duração. Assim, na condição extrema de urbanização total da bacia, as enchentes mínimas têm probabilidade de ocorrer com periodicidade de um a dois anos, mesmo que a ocupação da área livre remanescente ocorra com a taxa de apenas 50% de impermeabilização dos lotes.

5.4 PROPOSIÇÃO DE TAXAS MÁXIMAS DE OCUPAÇÃO DA BACIA E DE TAXAS MÁXIMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DOS LOTES

Em termos de macrodrenagem, o planejamento das cidades deve buscar um equilíbrio entre o crescimento urbano e a redução das enchentes. Nesse sentido, a partir das simulações aplicadas para a Bacia do Córrego do Monjolo, apresentam-se, neste item, sugestões para taxas de urbanização da área remanescente da bacia, bem como sugestões para as taxas de áreas permeáveis a serem mantidas nos lotes.

Assim, foi possível analisar os instantes de chuva para a condição do crescimento da urbanização por meio da matriz resumo, apresentada na tabela 5.4. Esta matriz aborda os

cenários simulados, relacionando as áreas alagadas máximas (A_{alag} , na última coluna) com o instante em que a máxima inundação em planta foi verificada (na primeira coluna).

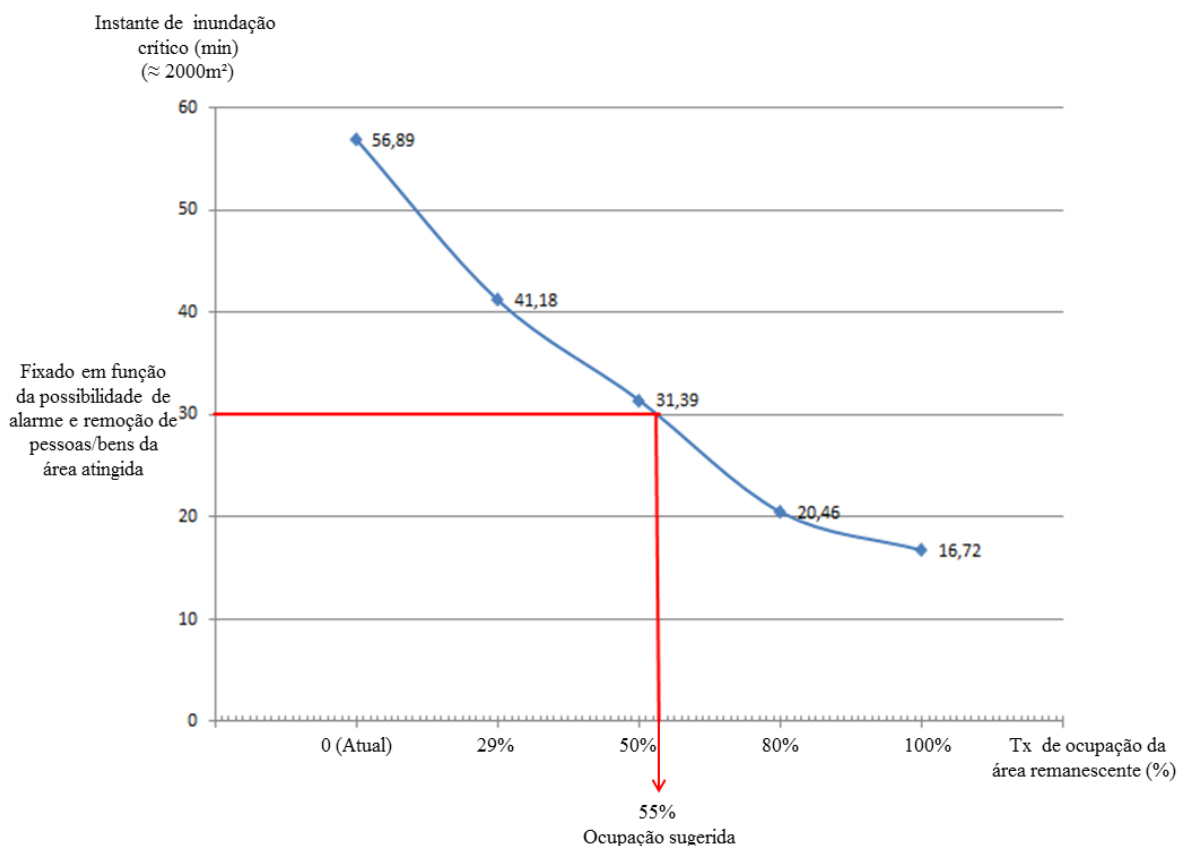
Tabela 5.4: Matriz dos instantes de Chuva								
Instante de Chuva (min)	Características da Bacia do Córrego do Monjolo							
	Duração (min)	Tr (anos)	Tipo de Chuva	Condição de Urbanização	CN	Ai(m ²)	tc (min)	A alag (m ²)
55,14	60	5	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	1356,587466
56,89	60	5	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	1239,358712
58,33	60	5	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	785,0243889
30,94	43	15	3	Atual	86,2	6732397,493	50,38	991,4869697
33,42	43	15	3	Atual	86,2	6732397,493	50,38	1886,158153
35,20	43	15	3	Atual	86,2	6732397,493	50,38	1645,86837
50,57	56	100	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	14308,90665
54,51	56	100	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	34694,75359
58,06	56	100	4	Atual	86,2	6732397,493	50,38	18463,82029
40,50	44	2,5	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	1535,638348
41,18	44	2,5	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	1666,864564
43,33	44	2,5	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	825,2670953
49,34	56	100	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	18478,9842
54,43	56	100	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	73887,06705
59,40	56	100	4	Atual + 29% de ocupação	87,12	8481820,708	47,31	32533,02038
30	33	1,5	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	1270,269776
31,39	33	1,5	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	2227,346316
32,81	33	1,5	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	1855,247089
44,95	51	100	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	28032,25277
49,59	51	100	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	93146,40982
54,64	51	100	4	Atual + 50% de ocupação	87,88	10155829,77	45,05	53024,13991
19,39	21	1	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	889,4221345
20,46	21	1	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	2058,793531
21,52	21	1	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	999,0689288
39,67	46	100	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	32998,43603
45,99	46	100	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	119571,00
50,92	46	100	4	Atual + 80% de ocupação	89,65	12278929,07	42,78	69588,10
16	17	1	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	1109,298951
16,72	17	1	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	1984,140395
17,77	17	1	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	850,3458834
27,46	32	100	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	25631,10462
32,90	32	100	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	119888,5631
37,82	32	100	4	Atual + 100% de ocupação	90,51	14004184,34	41,28	70510,47069

A matriz de instantes de chuva apresenta em destaque na cor amarela, os pontos críticos para cada cenário. Além disso, na cor vermelha destacam-se os picos de cheia com uma

duração próxima a 30 minutos para as condições de urbanização da ocupação atual mais de 50% de ocupação da área e com área da envoltória de enchente próxima a 2000 m². A cor azul apresenta o cenário para a menor área de envoltória, com um tempo de retorno de 5 anos e uma duração de aproximadamente uma hora.

Para a proposta de uma taxa de urbanização da área restante da bacia, foi estipulado o instante de 30 minutos transcorridos após o início da chuva. Este valor foi fixado em função da possibilidade de alarme e remoção de pessoas e bens da área atingida. A figura 5.105 mostra que, para se ter enchentes menores que as mínimas na bacia, a sua ocupação sugerida deve ser de 55% da área livre.

Figura 5.105 –: Diagrama utilizado para proposição da máxima taxa de ocupação da área restante da bacia

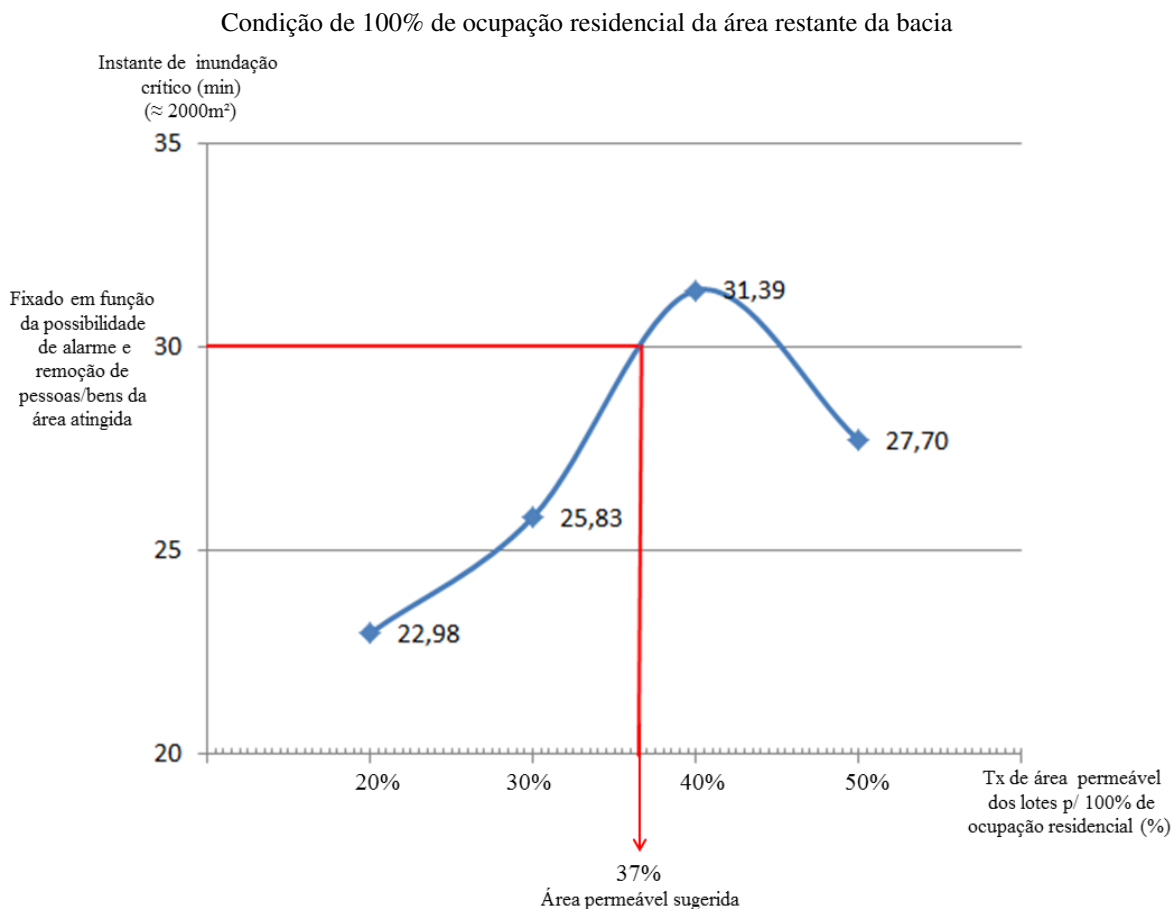


Para fixação da máxima taxa de impermeabilização permissível para os lotes, estipulou-se a condição de ocupação de toda a área remanescente da bacia (condição E). Nesse contexto, os resultados são resumidos pela tabela 5.5.

Tabela 5.5: Matriz dos instantes de Chuva para % permeável dos Lotes								
Instante de Chuva (min)	Características da Bacia do Córrego do Monjolo							
	Duração (min)	Tr (anos)	Tipo de Chuva	% permeável dos Lotes	CN	Ai(m ²)	t _c (min)	A alag (m ²)
21,91	24	1	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	47,241438
22,98	24	1	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	2196,4353
24,03	24	1	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	1285,4337
40,45	48	100	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	17569,149
46,93	48	100	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	111558,61
52,77	48	100	4	20% permeável	90,514	11203347,47	43,86	59034,301
24,78	27	1,5	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	603,05737
25,83	27	1,5	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	2339,326
27,59	27	1,5	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	942,49585
42,30	50	100	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	18048,562
49,15	50	100	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	101089,68
54,48	50	100	4	30% permeável	90,514	9802929,038	45,48	51997,076
30,35	33	1,5	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	1336,7577
31,39	33	1,5	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	2009,2192
32,82	33	1,5	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	1385,7488
45,97	52	100	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	28085,91
51,19	52	100	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	92210,913
55,68	52	100	4	40% permeável	90,514	8402510,604	47,43	50656,236
26,64	29	2	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	182,55025
27,70	29	2	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	1350,7552
28,76	29	2	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	845,68006
46,50	54	100	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	16493,094
52,84	54	100	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	84738,892
56,46	54	100	4	50% permeável	90,514	7002092,17	49,84	52660,789

Assim como no caso anterior, o instante de 30 minutos foi fixado em função da possibilidade de alarme e remoção de pessoas e bens da área atingida. A figura 5.106 mostra que, para evitar enchentes maiores que as mínimas, seria necessário que os lotes tivessem, no mínimo, 37% de área permeável. Assim, a taxa máxima permissível de impermeabilização do lote seria de 63%.

Figura 5.106 – Diagrama utilizado para proposição da máxima taxa de impermeabilização dos lotes.



Após a obtenção dos resultados e das análises da dinâmica hídrica na referida área urbana, constatou-se a necessidade de um planejamento urbano na Bacia do Córrego do Monjolo. Nesse sentido, destacam-se alguns pontos relevantes para auxiliar a ocupação da presente Bacia, que serão abordados no capítulo seguinte, respondendo o objetivo geral desse trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A estimativa e determinação das inundações urbanas são informações relevantes para o planejamento urbano buscando preservar os recursos hídricos. Nos últimos anos, surgiu uma nova dinâmica ambiental de acordo com a nova configuração da drenagem urbana, que veio a modificar o comportamento dos recursos hídricos. Isso significa que os rios e córregos, que tinham uma maior área permeável e um menor escoamento superficial, com a nova dinâmica inserida no espaço urbano, passam a sofrer inundações geradas pela nova dinâmica, propiciando um desequilíbrio ambiental.

Esse desequilíbrio ambiental é metodologicamente observado ao se realizar a transposição de dados da área física de estudo (real) para o ambiente computacional. Com isto, este trabalho teve o intuito primeiramente de estimar e delimitar as áreas inundáveis utilizando simulações computacionais para os cenários de crescimento da urbanização com taxas de 29%, 50%, 80% e 100% de ocupação futura da área remanescente para a determinação da mancha de enchente do Córrego do Monjolo.

Nas simulações realizadas, constatou-se o surgimento das inundações presentes no baixo curso do canal artificial, comprovando a impossibilidade do canal escoar sem transbordar na maior parte da sua extensão. Além disso, com alargamento significativo da base do inundograma foi observado que fica evidente a tendência das enchentes perdurarem por mais tempo, com a crescente ocupação da bacia. No inundograma também se vislumbrou a tendência da área alagada estender após o fim da chuva, o que foi confirmado pelas simulações com ocupação de 80% da área livre remanescente. Nessa simulação, o pico da

enchente mínima ocorre praticamente no instante final da chuva e a recessão do inundograma avança no tempo, mesmo com o fim do evento de precipitação.

Com o crescimento da taxa de ocupação da bacia foi constatado o aumento do tempo de retorno da chuva, que contribui para o alargamento da base do inundograma, comprovando que os alagamentos tendem a demorar por um tempo maior. Com o deslocamento do inundograma para a direita se observa como o aumento da área urbanizada da bacia indica que os picos de enchente tendem a surgir após o término da precipitação. Outra constatação é que o aumento da ocupação da bacia diminui a duração da chuva responsável tanto pelas enchentes mínimas quanto pelas enchentes máximas.

No caso da enchente mínima, o aumento da ocupação da bacia diminui o tempo de retorno e o tempo de duração das chuvas. No caso da ocupação total da bacia, há o máximo de 2 anos de tempo de retorno em atingir enchentes mínimas (2000 m² aproximadamente). O resultado disso traz a possibilidade de as inundações serem mais recorrentes.

Nesse sentido, os hietogramas tipo 4 demonstraram as enchentes extremas (mínima e máxima). As mínimas com aproximadamente 2000 m² e menor tempo de retorno e as máximas com tempo de retorno de 100 anos com as máximas áreas de envoltórias. Nas enchentes máximas (Tr= 100 anos) com 100% de ocupação da bacia, observa-se que o inundograma apresenta uma tênue perda de simetria, indicando que a maior parte da duração das enchentes situa-se após o valor de pico, depois do término da precipitação.

Outra constatação desse estudo é que a inundação do canal comporta-se bem distribuída ao longo do seu comprimento longitudinal, principalmente na fase de recessão. Porém, percebe-se que as dimensões do canal são insuficientes para conter a propagação da cheia. Assim, com o aumento da urbanização da bacia, em linhas gerais, nota-se um crescimento nas manchas de inundação, tanto em largura quanto ao longo do alinhamento longitudinal do canal.

Desta forma, é importante a previsão de uma bacia de contenção, como por exemplo, a construção de um piscinão nas áreas que ainda não foram ocupadas. Assim, não será necessário, no futuro, realizar desapropriações de áreas já habitadas.

Tendo isso em vista, foram propostos cenários para áreas permeáveis com taxas de 20%, 30%, 40% e 50% nos lotes e com o tipo de chuva 4 na Bacia do Córrego do Monjolo, em Patos de Minas, MG. Fazendo-se a comparação desses cenários, constatou-se que a redução das áreas impermeáveis nos lotes contribui verdadeiramente para a redução da probabilidade de enchentes críticas. Isso pode ser comprovado com o aumento das áreas permeáveis nos lotes, que aumenta o período de retorno e a duração da chuva responsável por causar as enchentes mínimas.

Além disso, a sensibilidade das taxas de áreas permeáveis dos lotes depende também do grau de ocupação da bacia. Nesse estudo, não foi possível estabelecer uma regra geral de previsão da sensibilidade. Todavia, as maiores reduções percentuais (tomando por base as enchentes máximas $T_r = 100$ anos) ocorreram na passagem da condição B para C. Para as enchentes mínimas com o aumento das taxas de áreas permeáveis nos lotes, ocorre o aumento do tempo de retorno e da duração da chuva.

Ao se analisar as simulações, foi possível estabelecer uma taxa de ocupação máxima sugerida de 55%, com uma duração de precipitação de 30 minutos. Este período é o tempo necessário estipulado para o alarme e consequente desocupação de pessoas e bens da área atingida. Além disso, esse estudo propõe uma área permeável mínima de 37% nos lotes, com uma urbanização de 100% da área remanescente, de forma a evitar as inundações na Bacia do Córrego do Monjolo. A legislação de Patos de Minas exige atualmente 20% da área permeável, o que representa 17% aquém do resultado obtido para a área permeável no lote. Com isto, é necessário a realização de medidas não-estruturais para a captação da precipitação da fonte.

Por este trabalho também foi percebido a necessidade de dados mais confiáveis para um melhor monitoramento de enchentes. Isso significa que se percebeu a carência de dados confiáveis para o monitoramento. Estes dados de monitoramento poderiam ser utilizados para o aprimoramento da alimentação dos modelos, gerando resultados mais confiáveis, podendo-se realizar uma comparação entre os dados simulados e os coletados para melhorar o planejamento urbano.

Contudo, tendo em vista os resultados que foram possíveis de se obter, pode-se realizar um zoneamento das áreas com maior frequência de enchentes. Estas áreas fundamentam a estruturação de um zoneamento de áreas recomendáveis para a ocupação e de áreas vulneráveis à ocupação, reduzindo-se os impactos ambientais e delimitando-se terrenos mais estáveis.

Desse modo, este trabalho é uma contribuição para os estudos de recursos hídricos em áreas urbanas. Igualmente, os elementos abordados podem prever ações de gestão eficientes para melhoria do futuro da cidade, neste caso, Patos de Minas. Porém, deve-se ressaltar que ainda é necessária a realização de trabalhos futuros na continuidade dos estudos do comportamento dos recursos hídricos.

Outra contribuição desse trabalho, não menos importante, é a aplicação dessas observações e análises em outras regiões semelhantes à área estudada. A realização da simulação de enchentes para a Bacia do Córrego do Monjolo possibilita a comparação dos resultados obtidos neste modelo para áreas semelhantes em outras regiões que sofrem com os mesmos problemas ambientais.

É fundamental a continuação e constante enriquecimento do presente estudo, buscando a coleta de dados futuros, a alimentação do modelo e o aprimoramento dos modelos e das simulações.

REFERÊNCIAS

A BÍBLIA SAGRADA: Antigo e Novo Testamentos. Rio de Janeiro: Sociedade Bíblica do Brasil, 1960.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 10ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BAZZAN, T. **Mapeamento das áreas com risco de inundação do rio dos Sinos no município de São Leopoldo, RS**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BERTI SARLAS, T. L. **Elaboração de Manchas de Inundação para o Município de Santa Rita do Sapucaí, utilizando SIG**. 2010.148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

BOTELHO, R. G.M. Planejamento Ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. ;BOTELHO, R. G. M. (org.) **Erosão e conversão do solos**- conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Berthand Brasil, 1999.

BRAGA, B. P. F. Controle de cheias urbanas em ambiente tropical. In: BRAGA, B. P. F **Drenagem urbana: gerenciamento, simulação e controle**. ABRH/ Editora da Universidade/UFRGS. Curitiba - PR, 1997, p. 51-65.

BRAGA, R. **Instrumentos para a gestão ambiental e de recursos hídricos**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2009.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Decreto nº 24643 de 10 de julho de 1934. **Código das águas**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D24643.htm>. Acessado em: 21 de maio de 2012.

BRASIL. Lei nº 10257 de 10 de julho de 2001. **Estatuto da Cidade**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm>. Acessado em: 15 de setembro de 2011.

BRASIL. Lei nº 12608 de abril de 2012. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acessado em: 10 de agosto de 2012.

BRASIL. Lei nº 9433 de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acessado em: 10 de outubro de 2011.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. **Código Florestal**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771.htm>. Acessado em: 10 de outubro de 2011.

CAMPOS, J. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/EXPRESSÃO GRÁFICA. 2009.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo. Oficina de texto, 2005.

CARVALHO, E. T. de.; PRANDINI, F. L. Áreas Urbanas. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO, S. N. A. de. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

CATELAN, Márcio José. Expansão territorial urbana e enchentes em Bauru. In: Simpósio Internacional sobre Cidades Médias, II., 6 a 9 de novembro de 2006, Uberlândia. **Anais em CD-ROM**. Uberlândia - Minas Gerais - Brasil, Universidade Federal de Uberlândia, nov. 2006. p. 1-14.

CHEN. J. HILL,A.A. URBANO, L.D. A **GIS-based model for urban flood inundation**. Department of Earth Sciences, University of Memphis, 1 Johnson Hall, Memphis, TN 38152, USA.

COLOMBO, J.C, et al. Drenagem urbana – propostas estruturais e não estruturais para a bacia do ribeirão quilombo na cidade de Americana/SP. **Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, João Pessoa, 2001. João Pessoa, ABES.CD ROM, 2001, 18p.

CORRÊA, R. L.. **O espaço urbano**. São Paulo: Ática, 2005.

FERRAZ, F. F., et al. Previsão de áreas inundadas na cidade de Piracicaba (SP) através de Sistema de Informações Geograficas (SIG). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 3, n.3. 17-27, Jul/Set 1998.

FERREIRA, F. W. **Planejamento Sim e Não: Um modo de agir num mundo em permanente mudança**. 15.ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2002.

FRANCISCHET, M.M.; ALAMY FILHO, J. E. Equação de Intensidade-Duração-Frequência e Distribuição Temporal das Chuvas Intensas para o Município de Uberlândia Aplicadas na Estimativa de Vazões Críticas Geradas em Lotes. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, 2011. **Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió: ABRH, 2011. CD – ROM.

GARCIA, F.; D. A. RAMOS. Comparação entre custos de obras de macrodrenagem dimensionadas com vazões calculadas pelo método racional e pelo método do SCS ("Soil Conservation Service") na Sub-bacia do rio Morro Alto, em Joinville, SC. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.

GERHARDT, T. E., SILVEIRA, D. T. **Método de pesquisa**. Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/ UFRGS – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GUERRA, A. J. CUNHA, S. B. **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2011.

GUERRA, A. J. **Geomorfologia Urbana**. 8ªed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2011.

GRIBBIN, J, E. **Introdução à Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. Tradução de Glauco Peres Damas. São Paulo. Cengage Learning, 2009. Tradução da 3ªedição norte-americana.

HOSTACHE, A. LAI, X. MONNIER, J. PUECH, C. Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water flood model. Part II: Use of remote sensing image of Mosel River. **Elselvier. Journal of Hydrology** 390 (2010) 257-268. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/advwatres>. Acessado 10 de novembro de 2011.

HUFF, FLOYD A. **Time Distributions of Heavy Rain storms in Illinois**. Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173, 1990. Disponível em: <<http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/C/ISWSC-173.pdf>>. Acessado em: 8 de novembro de 2012.

Instituto Brasileiro Geografia e Estatística. **IBGE**, Disponível em: www.ibge.gov.br. Acessado em 20 de setembro de 2011.

Instituto Nacional de Meteorologia INMET - Coordenação Geral de Agrometeorologia - CGA (Brasília). **Precipitação Pluviométrica (mm) do período compreendido entre 1980 - 2010 da Estação Meteorológica instalada em Patos de Minas/MG.** Recebida em 12 de agosto de 2011.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **INPE** Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html> acessado em 01 de junho de 2011.

KEVIN, E. WHITE, P. E. **Culverts, Drainage, and Bridge Replacement.** Source: HIGHWAY ENGINEERING HANDBOOK. Copyright © 2004 The McGraw-Hill Companies. Disponível em: <www.digitalengineeringlibrary.com>. Acessado em: 15 de agosto de 2012.

LEFEBVRE, H. **A revolução urbana.** Tradução de Sérgio Martins. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2008. Tradução de: Lá révolution urbaine.

LIMA, J.P. **Hidrologia urbana – Conceitos básicos.** Coimbra: Cor Comum, 2010.

LIU, S. SHAO, Y. YANG, C. LIN, Z. LI, M. Improved regional modeling by assimilation of streamflow data into a regional hydrologic model. **Elservier. Environmental Modelling & Software** 31 (2012) 141-149. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/envsoft>. Acessado 20 de dezembro de 2011.

Microsoft Visual Basic. Disponível em: <<http://www.tutorialized.com/tutorials/Visual-Basic/1>> Acessado em: 4 de dezembro de 2010.

MACRODRENAGEM. Disponível em: <www.etg.ufmg.br/tim2/macrodrenagem.ppt> Acessado em: 4 de dezembro de 2010.

MANETAS et. al., 1997, p.118 **A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships.** Journal of Hydrology 206, 1998, p.118-135.

MARÇAL, M. P. V. **Educação ambiental e representações sociais de meio ambiente: uma análise da prática pedagógica no ensino fundamental de Patos de Minas – MG.** 2005. 210 f. Dissertação. (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos básicos.** INPE. Santa Maria. 2007.

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana.** 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MELLO, A. Oliveira. **Patos de Minas: minha cidade.** 17. ed. Patos de Minas: Academia Patense de Letras, 1982.

_____. **Patos e Minas hoje.** Prefeitura Municipal de Patos de Minas, 1980.

_____. **Patos de Minas, meu bem querer.** 3. ed. Patos de Minas: Edição Prefeitura Municipal/SEMED, 2008.

MELLO, C.R. Modelos matemáticos para predição da chuva de projeto para regiões do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.7, n.1, p.121-128, 2003.

MIGUEZ, M. G., MASCARENHAS, F. C. B. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** Volume 4, n. 1, Jan/Mar 1999, 119-140.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 14 mar. 2012.

MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente.** 4 ed. Rio de Janeiro; Fortaleza: ABES, 2011.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008.

NUNES, I. **Patos Notícias**. Disponível em: <www.patosnoticias.com.br> Acessado em 23 de março de 2009.

PATOS DE MINAS. **Lei Orgânica do Município de Patos de Minas**. de 24 de maio de 1990
Disponível em: <http://www.patosdeminas.mg.gov.br/downloads/arquivos/lei_organica_patos_de_minas.pdf> Acessado em: 15 de outubro de 2011.

PATOS HOJE NOTICIAS 2012. Disponível em: <http://www.patoshoje.com.br/> Acessado em: 10 de abril de 2012.

PATOS de Minas. Prefeitura Municipal. Disponível em: <www.patosdeminas.mg.gov.br>.Acessado em 13 de outubro de 2010.

PAZ, A. R. da. **Simulação Hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**. 2010. 258 f. Tese (Dourado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Institutos de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PEREIRA, C.E.; SALLA, M.R.(2010) Estudo de chuvas intensas e da Chuva de Projeto pelo Método Chicago no Sudoeste de Mato Grosso. **In Anais do XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, Punta Del Este, Uruguai, Nov. 2010.

PINHEIRO. M. M. G.; NEGHETTINI, M. Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte- RMBH. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 3, nº4 Out/Dez 1998, 73-88

PINTO, N.L. de S. HOLTZ, A.C.T. MARTINS, J.A. GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica**. ED. Edgard Blucher. São Paulo, 1976.

PIRES, A.A.O.; BARBASSA, A.P. Mapeamento de áreas urbanas de inundação através do modelo MPHRC-MAI com área representada polinomialmente e por M.N.T. In: **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Vitória, 1997.

PONTES, P. R. M. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais**. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisa Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Porto Alegre, 2010.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.

PORTO, R. L.L. et.al. **Hidrologia Ambiental**. São Paulo. EDUSP/ABRH, 1991.

PSUS. MINISTERIO DAS CIDADES. **Programa de Drenagem Urbana Sustentável: Manual para Apresentação de Propostas** – 2006. Disponível em: <<http://www.saude.mg.gov.br/publicacoes/comunicacao-e-educacao-em-saude/atividades-educacionais-agua-para-o-consumo-humano/documentacao/ministerios-das-cidades/DrenagemUrbanaSustentavel.pdf>> Acessado em 1 de dezembro de 2010.

REZENDE, G. B.M **Metodologia numérica para estimativa e delimitação de áreas inundadas: uma ferramenta de auxílio à elaboração de Planos Diretores de Drenagem Urbana**. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

ROCHA, M. **Enxurrada leva calçada e abre enorme buraco no Parque Municipal do Mocambo**. 25/04/2012 Disponível em: <<http://patoshoje.com.br/noticias/patos-de-minas/15510-enxurrada-leva-calcada-e-abre-enorme-buraco-no-parque-municipal-do-ocambo.html>> Acessado em: 4 de outubro de 2012.

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 6ed. Uberlândia: EDUFU, 2007.

SCHUBERT, J. E. SANDERS, B. F. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. **Elselvier. Advances**

in **Water Resources** 41 (2012) 49-64. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/advwatres>. Acessado 10 de dezembro de 2011.

SILVA, A. M.; PINHEIRO, M. S. de F. ; FRANÇA, M. N. **Guia para normatização de trabalhos técnico-científicos: projetos de pesquisa, trabalhos acadêmicos, dissertações e teses.** 5 ed.rev.atul. Uberlândia: Edufu, 2008.

SILVA, A. P. M. **Elaboração de manchas de inundação para o município de Itajubá, utilizando SIG.** 2006. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

SMOLKA, Martim O meio ambiente e estrutura intra-urbana. In: MARTINE, George (org). **População, meio ambiente e desenvolvimento** – verdades e contradições. 2 ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1996.

SPOSITO, Maria Encarnação Beltrão. **Capitalismo e Urbanização.** 16. Ed. São Paulo: Contexto, 2012. 80 p.

SOUZA, Marcelo Lopes de. **Mudar a cidade: uma introdução crítica ao Planejamento e à Gestão Urbanos.** Rio de Janeiro: Bertrand, 2003.

SOUZA, C. D. D. **Simulação computacional do fluxo hídrico subterrâneo na região do Cariri e calibração utilizando gradiente das cargas hidráulicas.** 2007. 117 (Mestre). Curso de Mestrado em Recursos Hídricos Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007

SULEIMAN, Hélio Cesar ; BARBASSA, A. P. . Mapeamento preliminar de áreas urbanas de inundação. **Ciência & Engenharia**, v. 14, p. 51-58, 2005.

TEIXEIRA, W. [et al.]. **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais.** 2002.

TRAVASSOS, Luciana. A inexorabilidades das inundações e as novas abordagens das políticas públicas em drenagem urbana. In: **Encontro Nacional da ANPUR**, XIV., 23 a 27 de maio de 2011, Rio de Janeiro.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência Aplicação**. Porto Alegre. ABRH:EDUSP, 2009.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2.ed. Porto Alegre. ABRH:EDUSP, 2005.

TUCCI, C. E. M. (1995) Inundações urbanas. In: Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L. e Barros, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre, RS. ABRH/ Editora da Universidade/ UFRGS.

TUCCI, C. E. M. **Manejo de Águas Pluviais**. Brasília: Ministério das Cidades, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Curso de Gestão das Inundações urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco 2005.

TUNDISI, J. G. TUNDISI, T. M. **Recursos Hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

VIEIRA DA SILVA, R.C.; MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G. **Hidráulica Fluvial**. 2 ed. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

VII Reunião Nacional de Correlação e Classificação de Solos – MG, **VII RCC**. Guia de Excursão. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). 08 a 16 de Outubro de 2005.

ZUFFO, A. C., LEME, P. E. **GRADEX E SANTA BÁRBARA: Método híbrido para cálculo de vazão de projeto para macro drenagem urbana**. Disponível em: <artigocientifico.com.br/uploads/artc_1150910336_11.pdf> Acessado em: 20 de novembro de 2010.

ANEXO A

**JORNAL LOCAL ABORDANDO ENCHENTES EM 2012. FONTE:
FOLHA PATENSE, 2012**

Temporal causa diversos prejuízos em Patos de Minas

Muito trabalho para Prefeitura na recuperação dos estragos em diversos pontos da cidade

Fotos: Erisdaltton Andrade e Rejane Gomes



Prefeitura trabalha para recuperar estragos na Avenida Ivan Borges Porto

REJANE GOMES

A semana começou com muito trabalho para recuperar os estragos causados pelo forte temporal que caiu em Patos de Minas na tarde da última segunda-feira (30). Ficou difícil contabilizar os prejuízos, já que os estragos se espalharam por diversos pontos. A Prefeitura abriu seis frentes de trabalho para reorganizar a cidade nesta terça - feira (31). O Município utilizou caminhões-pipa para retirar a terra das casas e pontes. Homens e máquinas ainda trabalham para recuperar os prejuízos.

Mais uma vez os moradores da Rua Ana de Oliveira tiveram diversos transtornos com a chuva. A região do Pátio Central Shopping ficou totalmente alagada; carros ficaram ilhados no momento do temporal. Na Avenida Ivan Borges Porto, também não foi diferente; a forte correnteza que desce pela Avenida arrancou grande parte do asfalto, deixando a região intransitável. Um grande buraco se formou em frente às garagens, e os moradores tiveram que usar guinchos para retirar os carros. Máqui-

nas da prefeitura foram enviadas ao local para retirar o entulho e recuperar os danos na via.

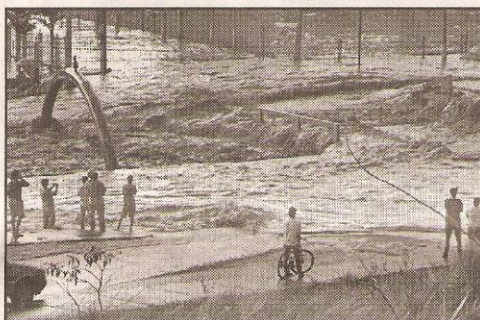
Os moradores do bairro Jardim Paulistano e Vila Rosa também viveram momentos de aflição. O córrego do Monjolo, que divide os dois bairros, transbordou mais uma vez, e a água chegou bem perto das casas.

Na Praça do Campo do Vila Esporte Clube, a enxurrada arrancou a pavimentação feita de brique. Os blocos de concreto se amontoaram em frente ao campo e muitos acabaram entupindo a rede de esgoto. Os servidores da Prefeitura já fizeram a recuperação da praça e retirada de entulho das vias.

O telefone de emergência do Corpo de Bombeiros não parou de tocar. Diversas ocorrências de desabamentos, inundações de residências, desmoronamento e quedas de árvores foram atendidas. O Corpo de Bombeiros também registrou a queda de uma torre de transmissão na Avenida Marabá, ocupando parte da pista.

As viaturas da Polícia Militar também foram acionadas para auxiliar no atendimento das ocorrências do temporal. De acordo com informações da assessoria de comunicação da PM, os policiais atenderam 15 ocorrências de inundação, desabamento ou desmoronamento no centro da cidade e nos bairros Cônego Getúlio, Residencial Gramado, Residencial Monjolo, Sebastião Amorim e Jardim Panorâmico. Felizmente todas as ocorrências sem vítimas.

De acordo com o secretário municipal de Infraestrutura, Jair Valadão, ainda não é possível indicar os valores que serão empenhados pelo Município na recuperação dos estragos. No entanto, ele afirma que os gastos da Prefeitura serão significativos. Ele ainda afirma que desde a última terça-feira (31) a secretaria de Infraestrutura está fazendo o levantamento de todos os prejuízos e que o trabalho de reparação deve seguir nos próximos dias.



O volume de águas do Córrego do Monjolo inundou trecho da Avenida Fátima Porto



Forte enxurrada destrói asfalto na Avenida Ivan Borges Porto

ANEXO B

CÓDIGO BASE EM VISUAL BASIC APLICADO AO EXCEL

ANEXO B1 – CÓDIGO PARA CÁLCULO DAS CURVAS-CHAVE

```

Sub curvachave()
'=====
' CONSTRUÇÃO DAS CURVAS: A = f(h), Pm = f(h) e ycg = f(h)
'=====
'DECLARAÇÃO DE MATRIZES E VETORES:
'~~~~~
'Curso de água:
Dim So(10000) As Double
Dim L(10000), Bo(10000), B(10000), Hc(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000), zo(10000) As Double

'Malha de vizinhança:
Dim xt(254, 254), yt(254, 254) As Double
Dim xdir, ydir, xesq, yesq As Double
Dim zdir, zesq As Double
Dim xdi(10000), ydi(10000), xes(10000), yes(10000) As Double

'Curva-chave A=f(h):
Dim hcc(10000, 100), Acc(10000, 100), hcg(10000, 100), Pcc(10000, 100) As Double '(seção do
canal,nível de profundidade)

'Demais parâmetros:
Nx = Sheets("1").Cells(9, 10)
Ny = Sheets("1").Cells(11, 10)
Pi = 3.141593
dlat = 0.1 'incremento lateral para área de inundação
Ndis = Sheets("1").Cells(4, 26) 'número de nós da malha
dl = Sheets("1").Cells(6, 26) 'incremento espacial da malha
Npcc = 100 'número de profundidades para construção da curva-chave
hccmax = 7 'profundidade máxima para construção da curva-chave
dhcc = hccmax / (Npcc - 1) 'incremento vertical de profundidade para construção das
curvas-chaves

'LEITURA DOS DADOS DA DISCRETIZAÇÃO:
'~~~~~
Sheets("1").Activate
i = 1
While (Cells(i + 3, 27) <> "")
    x(i) = Cells(i + 3, 27)
    y(i) = Cells(i + 3, 28)
    z(i) = Cells(i + 3, 29)
    L(i) = Cells(i + 3, 30)
    So(i) = Abs(Cells(i + 3, 31))
    Bo(i) = Cells(i + 3, 32)
    Hc(i) = Cells(i + 3, 33)
    zo(i) = z(i) - Hc(i)
    i = i + 1
Wend

'LEITURA DA MALHA DE VIZINHANÇA:
'~~~~~
ind = 1
xto = 1E+30
yto = 1E+30
For i = 1 To Ny
    For j = 1 To Nx
        xt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 17)
        yt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 18)
        zt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 19)
        If (xt(i, j) < xto) Then
            xto = xt(i, j)
        End If
        If (yt(i, j) < yto) Then
            yto = yt(i, j)
        End If
        ind = ind + 1
    Next
Next
dx = xt(1, 2) - xt(1, 1)
dy = yt(2, 1) - yt(1, 1)

```

```

'ELABORAÇÃO DA CURVA-CHAVE PARA AS SEÇÕES DISCRETAS:
'~~~~~
Sheets("CC1").Activate
Sheets("CC1").Range(Cells(1, 1), Cells(15000, 100)).ClearContents
Sheets("CC2").Activate
Sheets("CC2").Range(Cells(1, 1), Cells(15000, 100)).ClearContents
Sheets("CC3").Activate
Sheets("CC3").Range(Cells(1, 1), Cells(15000, 100)).ClearContents
Sheets("1").Activate
For i = 1 To Ndis
    Sheets("1").Cells(14, 86) = i
    somatório = 0
    If (i < Ndis) Then
        mr = (y(i + 1) - y(i)) / (x(i + 1) - x(i))
        Else
        mr = (y(i) - y(i - 1)) / (x(i) - x(i - 1))
    End If
    m1 = mr
    m2 = -1 / mr
    ang2 = Atn(m2)
    For k = 1 To Npcc
        Sheets("1").Cells(16, 86) = k
        hcc(i, k) = (k) * dhcc
        NA = z(i) - Hc(i) + hcc(i, k)
        'SEM TRANSBORDAMENTO:
        '-----
        If (hcc(i, k) <= Hc(i)) Then
            Acc(i, k) = Bo(i) * hcc(i, k)
            Pcc(i, k) = Bo(i) + 2 * hcc(i, k)
            I1 = (hcc(i, k) - dhcc / 2) * Bo(i) * dhcc
            somatório = somatório + I1
            hcg(i, k) = somatório / Acc(i, k)
            B(k) = Bo(i)
            If (m2 < 0) Then
                xdi(k) = x(i) + Bo(i) / 2 * Cos(ang2)
            Else
                xdi(k) = x(i) - Bo(i) / 2 * Cos(ang2)
            End If
            ydi(k) = y(i) + Bo(i) / 2 * Sin(ang2)
            If (m2 < 0) Then
                xes(k) = x(i) - Bo(i) / 2 * Cos(ang2)
            Else
                xes(k) = x(i) + Bo(i) / 2 * Cos(ang2)
            End If
            yes(k) = y(i) - Bo(i) / 2 * Sin(ang2)
        End If
        'COM TRANSBORDAMENTO:
        '-----
        If (hcc(i, k) > Hc(i)) Then
            'MARGEM DIREITA:
            '-----
            ind = 1
            Do
                delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
                If (delta > 500) Then
                    GoTo 5
                End If
                If (m2 < 0) Then
                    xdir = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
                Else
                    xdir = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
                End If
                ydir = y(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Sin(ang2)
                'Interpolação por inverso da distância:
                indx = Int((xdir - xto) / dx)
                indy = Int((ydir - yto) / dy)
                soma1 = 0
                soma2 = 0
                For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
                    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
                        If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
                            dist = Sqr((xdir - xt(ky, kx)) ^ 2 + (ydir - yt(ky, kx)) ^ 2)
                            soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
                            soma2 = soma2 + 1 / dist
                            zdir = soma1 / soma2
                        End If
                    End For
                End For
            Loop
        End If
    End For
End For

```

```

        End If
    Next
    Next
    ind = ind + 1
    Loop Until (NA < zdir)
    xdi(k) = xdir
    ydi(k) = ydir
5
    'MARGEM ESQUERDA:
    '-----
    ind = 1
    Do
        delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
        If (delta > 500) Then
            GoTo 10
        End If
        If (m2 < 0) Then
            xesq = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
        Else
            xesq = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
        End If
        yesq = y(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Sin(ang2)
        'Interpolação por inverso da distância:
        indx = Int((xesq - xto) / dx)
        indy = Int((yesq - yto) / dy)
        somal = 0
        soma2 = 0
        For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
            For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
                If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
                    dist = Sqr((xesq - xt(ky, kx)) ^ 2 + (yesq - yt(ky, kx)) ^ 2)
                    somal = somal + zt(ky, kx) / dist
                    soma2 = soma2 + 1 / dist
                    zesq = somal / soma2
                End If
            Next
        Next
        ind = ind + 1
    Loop Until (NA < zesq)
    xes(k) = xesq
    yes(k) = yesq
10
    'CÁLCULOS DAS CURVAS PROPRIAMENTE DITOS:
    '-----
    B(k) = Sqr((xdi(k) - xes(k)) ^ 2 + (ydi(k) - yes(k)) ^ 2)
    Acc(i, k) = Acc(i, k - 1) + (B(k) + B(k - 1)) * dhcc / 2
    Bdir = Sqr((xdi(k) - xdi(k - 1)) ^ 2 + (ydi(k) - ydi(k - 1)) ^ 2)
    Besq = Sqr((xes(k) - xes(k - 1)) ^ 2 + (yes(k) - yes(k - 1)) ^ 2)
    Pcc(i, k) = Pcc(i, k - 1) + Sqr(dhcc ^ 2 + Bdir ^ 2) + Sqr(dhcc ^ 2 + Besq ^ 2)
    I1 = (hcc(i, k) - dhcc / 2) * (B(k) + B(k - 1)) / 2 * dhcc
    somatório = somatório + I1
    hcg(i, k) = somatório / Acc(i, k)
End If
'ANEXAÇÕES:
'-----
Sheets("CC1").Cells(i + 1, 1) = L(i)
Sheets("CC1").Cells(1, k + 1) = hcc(i, k)
Sheets("CC1").Cells(i + 1, k + 1) = Acc(i, k)
Sheets("CC2").Cells(i + 1, 1) = L(i)
Sheets("CC2").Cells(1, k + 1) = hcc(i, k)
Sheets("CC2").Cells(i + 1, k + 1) = Pcc(i, k)
Sheets("CC3").Cells(i + 1, 1) = L(i)
Sheets("CC3").Cells(1, k + 1) = hcc(i, k)
Sheets("CC3").Cells(i + 1, k + 1) = hcg(i, k)
Next
Next
Sheets("1").Cells(14, 86) = "finalizadas"
Sheets("CC1").Cells(1, 1) = "A = f (h)"
Sheets("CC2").Cells(1, 1) = "Pm = f (h)"
Sheets("CC3").Cells(1, 1) = "hcg = f (h)"

End Sub

```

ANEXO B2 – CÓDIGO PARA CÁLCULO DA PROPAGAÇÃO DE CHEIAS E DAS ÁREAS INUNDÁVEIS

```

Sub KINEMATICS()
'=====
' PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM CANAL COM TRANSBORDAMENTOS
' CURVA-CHAVE PARA ÁREA, PERÍMETRO E CENTRÓIDE
' MÉTODO DIFUSIVO DE LAX
'=====
' DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS E ATRIBUIÇÕES INICIAIS:
'~~~~~
'Curso de água:
Dim Ao(10000), A(10000) As Double
Dim Qo(10000), Q(10000) As Double
Dim Vo(10000), V(10000) As Double
Dim ql(10000) As Double
Dim So(10000), Sf(10000) As Double
Dim ho(10000), h(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000) As Double
Dim Bo(10000), Hc(10000), B(10000) As Double
Dim n_M1(10000), n_M2(10000), nc(10000) As Double
Dim P(10000), Ppl(10000) As Double
Dim h_(10000) As Double
Dim L(10000) As Double
'Malha de vizinhança:
Dim xt(254, 254), yt(254, 254), zt(254, 254) As Double
Dim xdir, ydir, xesq, yesq As Double
Dim zdir, zesq As Double
Dim xdi(10000), ydi(10000), xes(10000), yes(10000) As Double
Dim dvert(200000) As Double
'Sub-bacias:
Dim Lb(10), CNb(10), Ab(10), Aib(10), tcb(10) As Double
'Afluente:
Dim Laf, CNaf, Abaf, Aiaf, tcbaf As Double
'Vetores que armazenam dados de inundação:
Dim xin(200000), yin(200000), zin(200000), dvein(200000) As Double
Dim Atransb(10000), Atransbo(10000) As Double
Dim xdirenv(10000), ydirenv(10000) As Double
Dim xesqenv(10000), yesqenv(10000) As Double
Dim distesqmax(10000), distdirmax(10000) As Double
'Curvas-chaves:
Dim Acc(10000, 100), hcc(10000, 100), Pcc(10000, 100), hcg(10000, 100) As Double
'Características da precipitação:
Tr = Sheets("1").Cells(3, 65)      'tempo de recorrência:anos
td = Sheets("1").Cells(5, 65)      'duração da chuva: minutos
'Outras variáveis e parâmetros:
Pi = 3.141593
Nx = Sheets("1").Cells(9, 10)      'malha do terreno
Ny = Sheets("1").Cells(11, 10)     'malha do terreno
tipo = Sheets("1").Cells(7, 65)    'tipo de distribuição temporal da chuva
Ndis = Sheets("1").Cells(4, 26)    'número de nós da malha
dl = Sheets("1").Cells(6, 26)      'incremento espacial da malha
Lf = Sheets("1").Cells(2, 15)      'comprimento do canal
Qini = Sheets("1").Cells(4, 48)     'vazão inicial de regime permanente
CFL = 200
hjus = Sheets("1").Cells(12, 86)   'contorno de jusante
dlat = 0.25                       'incremento lateral para cálculo de áreas inundadas
fator_hidr = 0                    'intervalo para anexação de resultados hidrodinâmicos
fator_alag = 0                    'intervalo para anexação de resultados de alagamentos
Macro4
'Leitura da bacia afluente:
Laf = Sheets("1").Cells(15, 68)    'intersecção do afluente no canal principal
CNaf = Sheets("1").Cells(15, 69)
Aaf = Sheets("1").Cells(15, 70)
Aiaf = Sheets("1").Cells(15, 71)
tcaf = Sheets("1").Cells(15, 72)
Qaf = 0.5 'vazão do afluente em regime permanente

'LEITURA DAS CURVAS-CHAVES:
'~~~~~
Npcc = Sheets("1").Cells(16, 86)
For i = 1 To Ndis
For k = 1 To Npcc
    hcc(i, k) = Sheets("CC1").Cells(1, k + 1)

```

```

    Acc(i, k) = Sheets("CC1").Cells(i + 1, k + 1)
    Pcc(i, k) = Sheets("CC2").Cells(i + 1, k + 1)
    hcg(i, k) = Sheets("CC3").Cells(i + 1, k + 1)
Next
Next

'LEITURA DOS DADOS DA DISCRETIZAÇÃO e HIDRODINÂMICOS INICIAIS:
'~~~~~
Sheets("1").Activate
ActiveWindow.ScrollColumn = 100
i = 1
While (Cells(i + 3, 27) <> "")
    x(i) = Cells(i + 3, 27)
    y(i) = Cells(i + 3, 28)
    z(i) = Cells(i + 3, 29)
    L(i) = Cells(i + 3, 30)
    So(i) = Abs(Cells(i + 3, 31))
    Bo(i) = Cells(i + 3, 32)
    Hc(i) = Cells(i + 3, 33)
    n_M1(i) = Cells(i + 3, 34) * 1
    n_M2(i) = 0.016 'coef. de Manning p/asfalto na planície de inundação
    ho(i) = Cells(i + 3, 49)
    'Ao(i) = Bo(i) * ho(i)
    'P(i) = Bo(i) + 2 * ho(i)
    Qo(i) = Qini
    'Vo(i) = Qini / Ao(i)
    ql(i) = 0
    'B(i) = Bo(i)
    'nc(i) = n_M1(i)
    'Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
    distesqmax(i) = 0
    distdirmax(i) = 0
    xesqenv(i) = x(i)
    yesqenv(i) = y(i)
    xdirenv(i) = x(i)
    ydirenv(i) = y(i)

    i = i + 1
Wend

'LEITURA DOS DADOS DAS SUB-BACIAS E DA MALHA DE VIZINHANÇA:
'~~~~~
'Sub-bacias:
i = 1
While (Sheets("1").Cells(i + 3, 68) <> "")
    Lb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 68)
    CNb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 69)
    Ab(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 70)
    Aib(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 71)
    tcb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 72)
    i = i + 1
Wend
Nsub_bacias = i - 1
'Malha de vizinhança:
ind = 1
xto = 1E+30
yto = 1E+30
For i = 1 To Ny
For j = 1 To Nx
    xt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 17)
    yt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 18)
    zt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 19)
    If (xt(i, j) < xto) Then
        xto = xt(i, j)
    End If
    If (yt(i, j) < yto) Then
        yto = yt(i, j)
    End If
    ind = ind + 1
Next
Next
dx = xt(1, 2) - xt(1, 1)
dy = yt(2, 1) - yt(1, 1)

'ÁREAS, PERÍMETROS E CENTRÓIDES:
```

```

'~~~~~
For i = 1 To Ndis
    For k = 1 To Npcc
        If (ho(i) <= hcc(i, k) And ho(i) > hcc(i, k - 1)) Then
            Ao(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
            P(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
            h_(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (hcg(i, k) -
hcg(i, k - 1)) + hcg(i, k - 1)
            Ppl(i) = P(i) - (Bo(i) + 2 * Hc(i))
            If (Ppl(i) > 0) Then
                nc(i) = Sqr(1 / P(i)) * Sqr(Ppl(i) * n_M2(i) ^ 2 + (P(i) - Ppl(i)) *
n_M1(i) ^ 2)
            Else
                nc(i) = n_M1(i)
            End If
            Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
            Vo(i) = Qo(i) / Ao(i)
            GoTo 10
        End If
    Next
Next
10
Next

'LAÇO TEMPORAL ----->
t = 0
nível = 0
lin = 1
Sheets("1").Activate
ordem_canal = Cells(6, 10)
Range(Cells(4, 87), Cells(10000, 99)).ClearContents
Sheets("2").Activate
ActiveSheet.Range(Cells(2, 1), Cells(50000, 200)).ClearContents
Sheets("1").Activate

Do

norma = 0

'ÁREAS, PERÍMETROS E CENTRÓIDES:
'~~~~~
For i = 1 To Ndis
    For k = 2 To Npcc
        If (ho(i) <= hcc(i, k) And ho(i) >= hcc(i, k - 1)) Then
            Ao(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
            P(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
            h_(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (hcg(i, k) -
hcg(i, k - 1)) + hcg(i, k - 1)
            Ppl(i) = P(i) - (Bo(i) + 2 * ho(i))
            If (Ppl(i) > 0) Then
                nc(i) = ((P(i) - Ppl(i)) * n_M1(i) + Ppl(i) * n_M2(i)) / (P(i))
            Else
                nc(i) = n_M1(i)
            End If
            Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
            Vo(i) = Qo(i) / Ao(i)
            GoTo 15
        End If
    Next
Next
15
hcc(i, 0) = 0
Acc(i, 0) = 0
Pcc(i, 0) = 0
hcg(i, 0) = 0
Next

'CONTROLE DO PASSO DE TEMPO:
'~~~~~
dtmin = 1000

```



```

For i = 1 To Ndis
    dt1 = d1 / (Abs(Vo(i)) + Sqr(9.81 * ho(i)))
    dt2 = d1 / (Abs(Vo(i)) - Sqr(9.81 * ho(i)))
    If (Abs(dt1) < Abs(dt2)) Then
        dt = Abs(dt1)
    Else
        dt = Abs(dt2)
    End If
    If (dt < dtmin) Then
        dtmin = dt
    End If
Next
dt = CFL * dtmin
If (t > 40 * 60) Then
    dt = 0.25 * CFL * dtmin
End If

'dt = 0.25 * 60

'MODELO HIDROLÓGICO:
'~~~~~
cont = 0
For i = 1 To (Ndis)
    'CONTRIBUIÇÕES DIFUSAS:
    If (ordem_canal = 1) Then 'canal primário
        If (L(i) <= Lb(2 + cont)) Then
            ql(i) = STB(CNb(2 + cont), Ab(2 + cont), Aib(2 + cont), tcb(2 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td, t,
tipo, dt)
            ql(i) = ql(i) / (Lb(2 + cont) - Lb(1 + cont))
        Else
            cont = cont + 1
            ql(i) = STB(CNb(2 + cont), Ab(2 + cont), Aib(2 + cont), tcb(2 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td, t,
tipo, dt)
            ql(i) = ql(i) / (Lb(2 + cont) - Lb(1 + cont))
        End If
    Else 'canal secundário
        If (L(i) <= Lb(1 + cont)) Then
            ql(i) = STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - 0
            ql(i) = ql(i) / (Lb(1 + cont) - 0)
        Else
            cont = cont + 1
            ql(i) = STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(cont), Ab(cont), Aib(cont), tcb(cont), Tr, td, t, tipo, dt)
            ql(i) = ql(i) / (Lb(1 + cont) - Lb(cont))
        End If
    End If
    If (cont > Nsub_bacias - 1) Then
        cont = Nsub_bacias - 1
    End If
    If (ql(i) < 0) Then
        ql(i) = 0
    End If
Next

'MODELO DE ONDA CINEMÁTICA:
'=====
teta = 0.7
beta = 0.6
Q(1) = Qini + STB(CNb(1), Ab(1), Aib(1), tcb(1), Tr, td, t, tipo, dt)
Bd = Qo(1) / (Vo(1) * ho(1))
alfa = nc(1) ^ 0.6 / (Bd ^ 0.6 * So(1) ^ 0.3)
h(1) = alfa * Q(1) ^ beta
V(1) = Q(1) / Ao(1)
For i = 1 To (Ndis - 1)
    Ba = Ao(i + 1) / ho(i + 1)
    Bd = Bo(i + 1)
    alfa = nc(i + 1) ^ 0.6 / (Bd ^ 0.6 * So(i) ^ 0.3)
    If ((L(i + 1) - Laf) <= d1 And (L(i + 1) - Laf) > 0) Then
        Q(i + 1) = Qaf + Q(i) + 1 * STB(CNaf, Aaf, Aiaf, tcaf, Tr, td, t, tipo, dt)
    Else
        Q(i + 1) = Q(i) + 1 / teta * (d1 / dt) * (Ba * alfa) * (Qo(i) ^ beta - Q(i) ^ beta)
        + (1 - teta) / teta * (Qo(i) - Qo(i + 1)) + ql(i) * d1 / teta
    End If
Next

```

```

End If
h(i + 1) = alfa * Q(i + 1) ^ beta
For k = 1 To Npcc
    If (h(i + 1) <= hcc(i + 1, k) And h(i + 1) >= hcc(i + 1, k - 1)) Then
        A(i + 1) = (h(i + 1) - hcc(i + 1, k - 1)) / (hcc(i + 1, k) - hcc(i + 1, k - 1))
* (Acc(i + 1, k) - Acc(i + 1, k - 1)) + Acc(i + 1, k - 1)
        GoTo 11
    End If
Next
11
V(i + 1) = Q(i + 1) / A(i + 1)
Next

'CÁLCULO DE ÁREAS INUNDADAS E PROFUNDIDADES DE ALAGAMENTO:
'~~~~~
inu = 1
For i = 1 To Ndis
    If (i < Ndis) Then
        mr = (y(i + 1) - y(i)) / (x(i + 1) - x(i))
    Else
        mr = (y(i) - y(i - 1)) / (x(i) - x(i - 1))
    End If
    m1 = mr
    m2 = -1 / mr
    ang2 = Atn(m2)
    NA = z(i) - Hc(i) + h(i)
    'COM TRANSBORDAMENTO:
    '-----
    If (h(i) > Hc(i)) Then
        'MARGEM DIREITA:
        '-----
        ind = 1
        Do
            delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
            If (delta > 500) Then
                GoTo 35
            End If
            If (m2 < 0) Then
                xdir = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
            Else
                xdir = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
            End If
            ydir = y(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Sin(ang2)
            'Interpolação por inverso da distância:
            indx = Int((xdir - xto) / dx)
            indy = Int((ydir - yto) / dy)
            soma1 = 0
            soma2 = 0
            For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
                For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
                    If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
                        dist = Sqr((xdir - xt(ky, kx)) ^ 2 + (ydir - yt(ky, kx)) ^ 2)
                        soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
                        soma2 = soma2 + 1 / dist
                        zdir = soma1 / soma2
                    End If
                Next
            Next
            Next
            'coordenadas e profundidades de alagamento:
            If (NA >= zdir) Then
                xin(inu) = xdir
                yin(inu) = ydir
                dvert(inu) = NA - zdir
                xdi(i) = xdir
                ydi(i) = ydir
            End If
            inu = inu + 1
            ind = ind + 1
            Loop While (NA > zdir)
            'xdi(i) = xdir
            'ydi(i) = ydir
        Next
    End If
    'MARGEM ESQUERDA:
    '-----

```

```

ind = 1
Do
    delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
    If (delta > 500) Then
        GoTo 40
    End If
    If (m2 < 0) Then
        xesq = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
    Else
        xesq = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
    End If
    yesq = y(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Sin(ang2)
    'Interpolação por inverso da distância:
    indx = Int((xesq - xto) / dx)
    indy = Int((yesq - yto) / dy)
    soma1 = 0
    soma2 = 0
    For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
        If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
            dist = Sqr((xesq - xt(ky, kx)) ^ 2 + (yesq - yt(ky, kx)) ^ 2)
            soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
            soma2 = soma2 + 1 / dist
            zesq = soma1 / soma2
        End If
    Next
Next
Next
If (NA >= zesq) Then
    xin(inu) = xesq
    yin(inu) = yesq
    dvert(inu) = NA - zesq
    xes(i) = xesq
    yes(i) = yesq
End If
inu = inu + 1
ind = ind + 1
Loop While (NA > zesq)
'xes(i) = xesq
'yes(i) = yesq
'envoltórias:
'B(i) = Sqr((xdi(i) - xes(i)) ^ 2 + (ydi(i) - yes(i)) ^ 2)
distesq = Sqr((xes(i) - x(i)) ^ 2 + (yes(i) - y(i)) ^ 2)
distdir = Sqr((xdi(i) - x(i)) ^ 2 + (ydi(i) - y(i)) ^ 2)
If (distesq > distesqmax(i)) Then
    xesqenv(i) = xes(i)
    yesqenv(i) = yes(i)
    distesqmax(i) = distesq
End If
If (distdir > distdirmax(i)) Then
    xdirenv(i) = xdi(i)
    ydirenv(i) = ydi(i)
    distdirmax(i) = distdir
End If

Else 'SEM TRANSBORDAMENTO
xdi(i) = x(i)
ydi(i) = y(i)
xes(i) = x(i)
yes(i) = y(i)
'xesqenv(i) = xes(i)
'yesqenv(i) = yes(i)
'xdirenv(i) = xdi(i)
'ydirenv(i) = ydi(i)

40
End If
Next

'ÁREAS TRANSBORDADAS DAS SEÇÕES E ÁREA ALAGADA EM PLANTA:
'~~~~~
Aalagada = 0
Valagado = 0
For i = 1 To Ndis
    Atransb(i) = A(i) - Bo(i) * h(i)
    If Atransb(i) < 0 Then

```

```

        Atransb(i) = 0
        'B(i) = Bo(i)
        B(i) = 0
        Else
        B(i) = Sqr((xdi(i) - xes(i)) ^ 2 + (ydi(i) - yes(i)) ^ 2)
    End If
    If (i > 1) Then
        Aalagada = Aalagada + (B(i) + B(i - 1)) * dl / 2
        Valagado = Valagado + (Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2
    End If
Next

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DA HIDRODINÂMICA:
'~~~~~
If (t > thidr) Then
    For i = 1 To Ndis
        'hidrodinâmica:
        Cells(i + 3, 87) = L(i)
        Cells(i + 3, 88) = z(i) - Hc(i)
        Cells(i + 3, 89) = h(i)
        Cells(i + 3, 90) = V(i)
        Cells(i + 3, 91) = Q(i)
        Cells(i + 3, 92) = A(i)
        Cells(i + 3, 93) = V(i) / Sqr(9.81 * h(i))
        Cells(i + 3, 94) = ql(i)
        Cells(i + 3, 95) = z(i) - Hc(i) + h(i)
        'limites de inundação:
        Cells(i + 3, 96) = xdi(i)
        Cells(i + 3, 97) = ydi(i)
        Cells(i + 3, 98) = xes(i)
        Cells(i + 3, 99) = yes(i)
    Next
    thidr = thidr + fator_hidr
End If

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DE ALAGAMENTOS:
'~~~~~
If (t > talag) Then
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 1) = t / 60
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 2) = Aalagada
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 3) = Valagado / 1000000#
    talag = talag + fator_alag
    lin = lin + 1
End If

'ATUALIZAÇÕES DAS VARIÁVEIS:
'~~~~~
For i = 1 To Ndis
    norma = norma + Abs(Q(i) - Qo(i))
    ho(i) = h(i)
    'Verificando armazenamento lateral em áreas inundadas:
    If (Atransb(i) = 0) Then
        Qo(i) = Q(i)
    Else
        'Qo(i) = Q(i)
        'Qo(i) = Q(i - 1) - ((Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2 - (Atransbo(i) +
Atransbo(i - 1)) * dl / 2) / dt
        '*****
        Q(i) = Q(i - 1) - ((Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2 - (Atransbo(i) +
Atransbo(i - 1)) * dl / 2) / dt
        Qo(i) = Q(i)
        '*****
    End If
    Atransbo(i) = Atransb(i)
    'Verificando entrada de água pontual pelo afluente:
    'If ((L(i) - Laf) <= 1 * dl And (L(i) - Laf) > 0) Then
    '    Qo(i) = Qaf + Qo(i - 1) + 1 * STB(CNaf, Aaf, Aiaf, tcaf, Tr, td, t, tipo, dt)
    'End If
Next

Cells(4, 86) = nível
Cells(6, 86) = dt
Cells(8, 86) = t

```

```

Cells(10, 86) = t / 60
Cells(3, 102) = t
Cells(3, 104) = t / 60
Cells(12, 86) = h(Ndis)
Cells(3, 106) = Q(1)
Cells(2, 102) = norma

t = t + dt
nível = nível + 1
    ActiveSheet.ChartObjects("Chart 42").Activate
    ActiveChart.ChartArea.Select
    ActiveWindow.Visible = True
    'Windows("versão 3.xls").Activate
    Range("CX3").Select

'Loop Until (norma < 0.001 And t / 60 > tcb(Nsub_bacias))
Loop Until (norma < 1000 And t / 60 > tcb(Nsub_bacias))

'ANEXAÇÃO DA ENVOLTÓRIA:
'~~~~~
Aenv = 0
For i = 2 To Ndis
    B1 = Sqr((xdirenv(i - 1) - xesqenv(i - 1)) ^ 2 + (ydirenv(i - 1) - yesqenv(i - 1)) ^ 2)
    B2 = Sqr((xdirenv(i) - xesqenv(i)) ^ 2 + (ydirenv(i) - yesqenv(i)) ^ 2)
    Aenv = Aenv + (B1 + B2) * dl / 2
    Sheets("2").Cells(i, 10) = xdirenv(i)
    Sheets("2").Cells(i, 11) = ydirenv(i)
    Sheets("2").Cells(i, 12) = xesqenv(i)
    Sheets("2").Cells(i, 13) = yesqenv(i)
Next
Sheets("2").Cells(2, 14) = Aenv

End Sub

```

```

Sub FLOOD_STORAGE()
'~~~~~
' ARMAZENAMENTO DE RESULTADOS DE INUNDAÇÃO E PROFUNDIDADES PARA UM INSTANTE ESPECÍFICO
'~~~~~
' DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS E ATRIBUIÇÕES INICIAIS:
'~~~~~
'Curso de água:
Dim Ao(10000), A(10000) As Double
Dim Qo(10000), Q(10000) As Double
Dim Vo(10000), V(10000) As Double
Dim ql(10000) As Double
Dim So(10000), Sf(10000) As Double
Dim ho(10000), h(10000) As Double
Dim x(10000), y(10000), z(10000) As Double
Dim Bo(10000), Hc(10000), B(10000) As Double
Dim n_M1(10000), n_M2(10000), nc(10000) As Double
Dim P(10000), Ppl(10000) As Double
Dim h_(10000) As Double
Dim L(10000) As Double
'Malha de vizinhança:
Dim xt(254, 254), yt(254, 254), zt(254, 254) As Double
Dim xdir, ydir, xesq, yesq As Double
Dim zdir, zesq As Double
Dim xdi(10000), ydi(10000), xes(10000), yes(10000) As Double
Dim dvert(200000) As Double
'Sub-bacias:
Dim Lb(10), CNb(10), Ab(10), Aib(10), tcb(10) As Double
'Vetores que armazenam dados de inundação:
Dim xin(200000), yin(200000), zin(200000), dvein(200000) As Double
Dim Atransb(10000), Atransbo(10000) As Double
Dim xdirenv(10000), ydirenv(10000) As Double
Dim xesqenv(10000), yesqenv(10000) As Double
Dim distesqmax(10000), distdirmax(10000) As Double
'Curvas-chaves:
Dim Acc(10000, 100), hcc(10000, 100), Pcc(10000, 100), hcg(10000, 100) As Double
'Características da precipitação:
Tr = Sheets("1").Cells(3, 65)      'tempo de recorrência:anos

```

```

td = Sheets("1").Cells(5, 65)          'duração da chuva: minutos
'Outras variáveis e parâmetros:
Pi = 3.141593
Nx = Sheets("1").Cells(9, 10)          'malha do terreno
Ny = Sheets("1").Cells(11, 10)         'malha do terreno
tipo = Sheets("1").Cells(7, 65)        'tipo de distribuição temporal da chuva
Ndis = Sheets("1").Cells(4, 26)        'número de nós da malha
dl = Sheets("1").Cells(6, 26)          'incremento espacial da malha
Lf = Sheets("1").Cells(2, 15)          'comprimento do canal
Qini = Sheets("1").Cells(4, 48)         'vazão inicial de regime permanente
CFL = 200
hjus = Sheets("1").Cells(12, 86)        'contorno de jusante
dlat = 0.25                            'incremento lateral para cálculo de áreas inundadas
fator_hidr = 0                          'intervalo para anexação de resultados hidrodinâmicos
fator_alag = 0                          'intervalo para anexação de resultados de alagamentos
tempo_sto = Sheets("2").Cells(2, 16) * 60
Macro4
'Leitura da bacia afluente:
Laf = Sheets("1").Cells(15, 68)         'intersecção do afluente no canal principal
CNaf = Sheets("1").Cells(15, 69)
Aaf = Sheets("1").Cells(15, 70)
Aiaf = Sheets("1").Cells(15, 71)
tcaf = Sheets("1").Cells(15, 72)
Qaf = 0.5 'vazão do afluente em regime permanente

'LEITURA DAS CURVAS-CHAVES:
'~~~~~
Npcc = Sheets("1").Cells(16, 86)
For i = 1 To Ndis
For k = 1 To Npcc
    hcc(i, k) = Sheets("CC1").Cells(1, k + 1)
    Acc(i, k) = Sheets("CC1").Cells(i + 1, k + 1)
    Pcc(i, k) = Sheets("CC2").Cells(i + 1, k + 1)
    hcg(i, k) = Sheets("CC3").Cells(i + 1, k + 1)
Next
Next

'LEITURA DOS DADOS DA DISCRETIZAÇÃO e HIDRODINÂMICOS INICIAIS:
'~~~~~
Sheets("1").Activate
ActiveWindow.ScrollColumn = 100
i = 1
While (Cells(i + 3, 27) <> "")
    x(i) = Cells(i + 3, 27)
    y(i) = Cells(i + 3, 28)
    z(i) = Cells(i + 3, 29)
    L(i) = Cells(i + 3, 30)
    So(i) = Abs(Cells(i + 3, 31))
    Bo(i) = Cells(i + 3, 32)
    Hc(i) = Cells(i + 3, 33)
    n_M1(i) = Cells(i + 3, 34) * 1
    n_M2(i) = 0.016 'coef. de Manning p/asfalto na planície de inundação
    ho(i) = Cells(i + 3, 49)
    'Ao(i) = Bo(i) * ho(i)
    'P(i) = Bo(i) + 2 * ho(i)
    Qo(i) = Qini
    'Vo(i) = Qini / Ao(i)
    ql(i) = 0
    'B(i) = Bo(i)
    'nc(i) = n_M1(i)
    'Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
    distesqmax(i) = 0
    distdirmax(i) = 0
    xesqenv(i) = x(i)
    yesqenv(i) = y(i)
    xdirenv(i) = x(i)
    ydirenv(i) = y(i)

    i = i + 1
Wend

'LEITURA DOS DADOS DAS SUB-BACIAS E DA MALHA DE VIZINHANÇA:
'~~~~~
'Sub-bacias:
i = 1

```

```

While (Sheets("1").Cells(i + 3, 68) <> "")
    Lb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 68)
    CNb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 69)
    Ab(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 70)
    Aib(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 71)
    tcb(i) = Sheets("1").Cells(i + 3, 72)
    i = i + 1
Wend
Nsub_bacias = i - 1
'Malha de vizinhança:
ind = 1
xto = 1E+30
yto = 1E+30
For i = 1 To Ny
For j = 1 To Nx
    xt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 17)
    yt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 18)
    zt(i, j) = Sheets("1").Cells(ind + 3, 19)
    If (xt(i, j) < xto) Then
        xto = xt(i, j)
    End If
    If (yt(i, j) < yto) Then
        yto = yt(i, j)
    End If
    ind = ind + 1
Next
Next
dx = xt(1, 2) - xt(1, 1)
dy = yt(2, 1) - yt(1, 1)

'ÁREAS, PERÍMETROS E CENTRÓIDES:
'~~~~~
For i = 1 To Ndis
    For k = 1 To Npcc
        If (ho(i) <= hcc(i, k) And ho(i) > hcc(i, k - 1)) Then
            Ao(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
            Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
            P(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
            Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
            h_(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (hcg(i, k) -
            hcg(i, k - 1)) + hcg(i, k - 1)
            Ppl(i) = P(i) - (Bo(i) + 2 * Hc(i))
            If (Ppl(i) > 0) Then
                nc(i) = Sqr(1 / P(i)) * Sqr(Ppl(i) * n_M2(i) ^ 2 + (P(i) - Ppl(i)) *
            n_M1(i) ^ 2)
            Else
                nc(i) = n_M1(i)
            End If
            Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
            Vo(i) = Qo(i) / Ao(i)
            GoTo 10
        End If
    Next
10
Next

'LAÇO TEMPORAL ----->
t = 0
nível = 0
lin = 1
Sheets("1").Activate
ordem_canal = Cells(6, 10)
Range(Cells(4, 87), Cells(10000, 99)).ClearContents
Sheets("2").Activate
ActiveSheet.Range(Cells(2, 17), Cells(50000, 200)).ClearContents
Sheets("1").Activate

Do

norma = 0

'ÁREAS, PERÍMETROS E CENTRÓIDES:

```

```

'~~~~~
For i = 1 To Ndis
  For k = 2 To Npcc
    If (ho(i) <= hcc(i, k) And ho(i) >= hcc(i, k - 1)) Then
      Ao(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Acc(i, k) -
Acc(i, k - 1)) + Acc(i, k - 1)
      P(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (Pcc(i, k) -
Pcc(i, k - 1)) + Pcc(i, k - 1)
      h_(i) = (ho(i) - hcc(i, k - 1)) / (hcc(i, k) - hcc(i, k - 1)) * (hcg(i, k) -
hcg(i, k - 1)) + hcg(i, k - 1)
      Ppl(i) = P(i) - (Bo(i) + 2 * ho(i))
      If (Ppl(i) > 0) Then
        nc(i) = ((P(i) - Ppl(i)) * n_M1(i) + Ppl(i) * n_M2(i)) / (P(i))
      Else
        nc(i) = n_M1(i)
      End If
      Sf(i) = (nc(i) * Qo(i) / (Ao(i) ^ (5 / 3) * P(i) ^ (-2 / 3))) ^ 2
      Vo(i) = Qo(i) / Ao(i)
      GoTo 15
    End If
  Next
15
hcc(i, 0) = 0
Acc(i, 0) = 0
Pcc(i, 0) = 0
hcg(i, 0) = 0
Next

'CONTROLE DO PASSO DE TEMPO:
'~~~~~
dtmin = 1000
For i = 1 To Ndis
  dt1 = dl / (Abs(Vo(i)) + Sqr(9.81 * ho(i)))
  dt2 = dl / (Abs(Vo(i)) - Sqr(9.81 * ho(i)))
  If (Abs(dt1) < Abs(dt2)) Then
    dt = Abs(dt1)
  Else
    dt = Abs(dt2)
  End If
  If (dt < dtmin) Then
    dtmin = dt
  End If
Next
dt = CFL * dtmin
'dt = .25 * 60

'MODELO HIDROLÓGICO:
'~~~~~
cont = 0
For i = 1 To (Ndis)
  'CONTRIBUIÇÕES DIFUSAS:
  If (ordem_canal = 1) Then 'canal primário
    If (L(i) <= Lb(2 + cont)) Then
      ql(i) = STB(CNb(2 + cont), Ab(2 + cont), Aib(2 + cont), tcb(2 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td, t,
tipo, dt)
      ql(i) = ql(i) / (Lb(2 + cont) - Lb(1 + cont))
    Else
      cont = cont + 1
      ql(i) = STB(CNb(2 + cont), Ab(2 + cont), Aib(2 + cont), tcb(2 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td, t,
tipo, dt)
      ql(i) = ql(i) / (Lb(2 + cont) - Lb(1 + cont))
    End If
  Else 'canal secundário
    If (L(i) <= Lb(1 + cont)) Then
      ql(i) = STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - 0
      ql(i) = ql(i) / (Lb(1 + cont) - 0)
    Else
      cont = cont + 1
      ql(i) = STB(CNb(1 + cont), Ab(1 + cont), Aib(1 + cont), tcb(1 + cont), Tr, td,
t, tipo, dt) - STB(CNb(cont), Ab(cont), Aib(cont), tcb(cont), Tr, td, t, tipo, dt)
      ql(i) = ql(i) / (Lb(1 + cont) - Lb(cont))
    End If
  End If

```



```

End If
If (cont > Nsub_bacias - 1) Then
    cont = Nsub_bacias - 1
End If
If (ql(i) < 0) Then
    ql(i) = 0
End If
Next

'MODELO DE ONDA CINEMÁTICA:
'=====
teta = 0.7
beta = 0.6
Q(1) = Qini + STB(CNb(1), Ab(1), Aib(1), tcb(1), Tr, td, t, tipo, dt)
Bd = Qo(1) / (Vo(1) * ho(1))
alfa = nc(1) ^ 0.6 / (Bd ^ 0.6 * So(1) ^ 0.3)
h(1) = alfa * Q(1) ^ beta
V(1) = Q(1) / Ao(1)
For i = 1 To (Ndis - 1)
    Ba = Ao(i + 1) / ho(i + 1)
    Bd = Bo(i + 1)
    alfa = nc(i + 1) ^ 0.6 / (Bd ^ 0.6 * So(i) ^ 0.3)
    If ((L(i + 1) - Laf) <= dl And (L(i + 1) - Laf) > 0) Then
        Q(i + 1) = Qaf + Q(i) + 1 * STB(CNaf, Aaf, Aiaf, tcaf, Tr, td, t, tipo, dt)
    Else
        Q(i + 1) = Q(i) + 1 / teta * (dl / dt) * (Ba * alfa) * (Qo(i) ^ beta - Q(i) ^ beta)
    + (1 - teta) / teta * (Qo(i) - Qo(i + 1)) + ql(i) * dl / teta
    End If
    h(i + 1) = alfa * Q(i + 1) ^ beta
    For k = 1 To Npcc
        If (h(i + 1) <= hcc(i + 1, k) And h(i + 1) >= hcc(i + 1, k - 1)) Then
            A(i + 1) = (h(i + 1) - hcc(i + 1, k - 1)) / (hcc(i + 1, k) - hcc(i + 1, k - 1))
        * (Acc(i + 1, k) - Acc(i + 1, k - 1)) + Acc(i + 1, k - 1)
        GoTo 11
    End If
Next
11
V(i + 1) = Q(i + 1) / A(i + 1)
Next

'CÁLCULO DE ÁREAS INUNDADAS E PROFUNDIDADES DE ALAGAMENTO:
'~~~~~
inu = 1
For i = 1 To Ndis
    If (i < Ndis) Then
        mr = (y(i + 1) - y(i)) / (x(i + 1) - x(i))
    Else
        mr = (y(i) - y(i - 1)) / (x(i) - x(i - 1))
    End If
    m1 = mr
    m2 = -1 / mr
    ang2 = Atn(m2)
    NA = z(i) - Hc(i) + h(i)
    'COM TRANSBORDAMENTO:
    '-----
    If (h(i) > Hc(i)) Then
        'MARGEM DIREITA:
        '-----
        ind = 1
        Do
            delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
            If (delta > 500) Then
                GoTo 35
            End If
            If (m2 < 0) Then
                xdir = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
            Else
                xdir = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
            End If
            ydir = y(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Sin(ang2)
            'Interpolação por inverso da distância:
            indx = Int((xdir - xto) / dx)
            indy = Int((ydir - yto) / dy)
            soma1 = 0
            soma2 = 0
        
```

```

For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
    If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
        dist = Sqr((xdir - xt(ky, kx)) ^ 2 + (ydir - yt(ky, kx)) ^ 2)
        soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
        soma2 = soma2 + 1 / dist
        zdir = soma1 / soma2
    End If
Next
Next
'coordenadas e profundidades de alagamento:
If (NA >= zdir) Then
    xin(inu) = xdir
    yin(inu) = ydir
    dvert(inu) = NA - zdir
    xdi(i) = xdir
    ydi(i) = ydir
End If
'Sheets("2").Cells(inu + 1, 19) = xin(inu)
'Sheets("2").Cells(inu + 1, 20) = yin(inu)
'Sheets("2").Cells(inu + 1, 21) = dvert(inu)
inu = inu + 1
ind = ind + 1
Loop While (NA > zdir)
'xdi(i) = xdir
'ydi(i) = ydir

'MARGEM ESQUERDA:
'-----
ind = 1
Do
    delta = Bo(i) / 2 + ind * dlat
    If (delta > 500) Then
        GoTo 40
    End If
    If (m2 < 0) Then
        xesq = x(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Cos(ang2)
    Else
        xesq = x(i) + (Bo(i) / 2 + delta) * Cos(ang2)
    End If
    yesq = y(i) + (-Bo(i) / 2 - delta) * Sin(ang2)
    'Interpolação por inverso da distância:
    indx = Int((xesq - xto) / dx)
    indy = Int((yesq - yto) / dy)
    soma1 = 0
    soma2 = 0
    For kx = (indx - 2) To (indx + 2)
    For ky = (indy - 2) To (indy + 2)
        If (kx > 0 And ky > 0 And kx <= Nx And ky <= Ny) Then
            dist = Sqr((xesq - xt(ky, kx)) ^ 2 + (yesq - yt(ky, kx)) ^ 2)
            soma1 = soma1 + zt(ky, kx) / dist
            soma2 = soma2 + 1 / dist
            zesq = soma1 / soma2
        End If
    Next
Next
    If (NA >= zesq) Then
        xin(inu) = xesq
        yin(inu) = yesq
        dvert(inu) = NA - zesq
        xes(i) = xesq
        yes(i) = yesq
    End If
    'Sheets("2").Cells(inu + 1, 19) = xin(inu)
    'Sheets("2").Cells(inu + 1, 20) = yin(inu)
    'Sheets("2").Cells(inu + 1, 21) = dvert(inu)
    inu = inu + 1
    ind = ind + 1
Loop While (NA > zesq)
'xes(i) = xesq
'yes(i) = yesq
'envoltórias:
'B(i) = Sqr((xdi(i) - xes(i)) ^ 2 + (ydi(i) - yes(i)) ^ 2)
distesq = Sqr((xes(i) - x(i)) ^ 2 + (yes(i) - y(i)) ^ 2)
distdir = Sqr((xdi(i) - x(i)) ^ 2 + (ydi(i) - y(i)) ^ 2)

```

```

    If (distesq > distesqmax(i)) Then
        xesqenv(i) = xes(i)
        yesqenv(i) = yes(i)
        distesqmax(i) = distesq
    End If
    If (distdir > distdirmax(i)) Then
        xdirenv(i) = xdi(i)
        ydirenv(i) = ydi(i)
        distdirmax(i) = distdir
    End If

    Else 'SEM TRANSBORDAMENTO
        xdi(i) = x(i)
        ydi(i) = y(i)
        xes(i) = x(i)
        yes(i) = y(i)
        'xesqenv(i) = xes(i)
        'yesqenv(i) = yes(i)
        'xdirenv(i) = xdi(i)
        'ydirenv(i) = ydi(i)

40
    End If
Next
Ninu = inu - 1

'ÁREAS TRANSBORDADAS DAS SEÇÕES E ÁREA ALAGADA EM PLANTA:
'~~~~~
Aalagada = 0
Valagado = 0
For i = 1 To Ndis
    Atransb(i) = A(i) - Bo(i) * h(i)
    If Atransb(i) < 0 Then
        Atransb(i) = 0
        'B(i) = Bo(i)
        B(i) = 0
    Else
        B(i) = Sqr((xdi(i) - xes(i)) ^ 2 + (ydi(i) - yes(i)) ^ 2)
    End If
    If (i > 1) Then
        Aalagada = Aalagada + (B(i) + B(i - 1)) * dl / 2
        Valagado = Valagado + (Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2
    End If
Next

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DA HIDRODINÂMICA:
'~~~~~
If (t > thidr) Then
    For i = 1 To Ndis
        'hidrodinâmica:
        Cells(i + 3, 87) = L(i)
        Cells(i + 3, 88) = z(i) - Hc(i)
        Cells(i + 3, 89) = h(i)
        Cells(i + 3, 90) = V(i)
        Cells(i + 3, 91) = Q(i)
        Cells(i + 3, 92) = A(i)
        Cells(i + 3, 93) = V(i) / Sqr(9.81 * h(i))
        Cells(i + 3, 94) = ql(i)
        Cells(i + 3, 95) = z(i) - Hc(i) + h(i)
        'limites de inundação:
        Cells(i + 3, 96) = xdi(i)
        Cells(i + 3, 97) = ydi(i)
        Cells(i + 3, 98) = xes(i)
        Cells(i + 3, 99) = yes(i)
    Next
    thidr = thidr + fator_hidr
End If

'ANEXAÇÕES DE RESULTADOS DE ALAGAMENTOS:
'~~~~~
If (t > talag) Then
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 1) = t / 60
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 2) = Aalagada
    Sheets("2").Cells(lin + 1, 3) = Valagado / 1000000#
    talag = talag + fator_alag

```

```

'      lin = lin + 1
'End If

'ATUALIZAÇÕES DAS VARIÁVEIS:
'~~~~~
For i = 1 To Ndis
    norma = norma + Abs(Q(i) - Qo(i))
    ho(i) = h(i)
    If (Atransb(i) = 0) Then
        Qo(i) = Q(i)
    Else
        'Qo(i) = Q(i)
        'Qo(i) = Q(i - 1) - ((Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2 - (Atransbo(i) +
Atransbo(i - 1)) * dl / 2) / dt
        '*****
        Q(i) = Q(i - 1) - ((Atransb(i) + Atransb(i - 1)) * dl / 2 - (Atransbo(i) +
Atransbo(i - 1)) * dl / 2) / dt
        Qo(i) = Q(i)
        '*****

    End If
    Atransbo(i) = Atransb(i)
Next

Cells(4, 86) = nível
Cells(6, 86) = dt
Cells(8, 86) = t
Cells(10, 86) = t / 60
Cells(3, 102) = t
Cells(3, 104) = t / 60
Cells(12, 86) = h(Ndis)
Cells(3, 106) = Q(1)
Cells(2, 102) = norma

t = t + dt
nível = nível + 1
ActiveSheet.ChartObjects("Chart 42").Activate
ActiveChart.ChartArea.Select
ActiveWindow.Visible = True
'Windows("versão 3.xls").Activate
Range("CX3").Select

Loop Until (t > tempo_sto)

'ANEXAÇÃO DE RESULTADOS DE PROFUNDIDADES INUNDADAS:
'~~~~~
Sheets("2").Cells(2, 17) = Aalagada
Sheets("2").Cells(2, 18) = Valagado / 1000000#
ind = 1
For k = 1 To Ninu
    If (dvert(k) >= 0) Then
        Sheets("2").Cells(ind + 1, 19) = xin(k)
        Sheets("2").Cells(ind + 1, 20) = yin(k)
        Sheets("2").Cells(ind + 1, 21) = dvert(k)
        ind = ind + 1
    End If
Next

End Sub

```

ANEXO B3 – FUNÇÕES UTILIZADAS NO CÓDIGO

```

Function huff1(x)
'DISTRIBUIÇÃO DE HUFF ACUMULADA COM PROB. DE 50% NO PRIMEIRO QUARTIL
'*****
huff1 = 0.0001184895 * x ^ 3 - 0.032513429 * x ^ 2 + 3.0613031609 * x
End Function

Function huff2(x)
'DISTRIBUIÇÃO DE HUFF ACUMULADA COM PROB. DE 50% NO SEGUNDO QUARTIL
'*****
A = 5.87121 * 0.000001
B = -1.44066 * 0.001
C = 1.04768 * 0.1
D = -9.57391 * 0.1
E = 1.37413
huff2 = A * x ^ 4 + B * x ^ 3 + C * x ^ 2 + D * x + E
End Function

Function huff3(x)
'DISTRIBUIÇÃO DE HUFF ACUMULADA COM PROB. DE 50% NO TERCEIRO QUARTIL
'*****
A = 6.60987 * 0.000000001
B = -1.92496 * 0.000001
C = 2.00555 * 0.0001
D = -8.96766 * 0.001
E = 1.71805 * 0.1
F = -6.62204 * 0.1
huff3 = A * x ^ 6 + B * x ^ 5 + C * x ^ 4 + D * x ^ 3 + E * x ^ 2 + F * x
End Function

Function huff4(x)
'DISTRIBUIÇÃO DE HUFF ACUMULADA COM PROB. DE 50% NO QUARTO QUARTIL
'*****
A = -7.19401 * 0.000000001
B = 1.96767 * 0.000001
C = -1.97733 * 0.0001
D = 9.05332 * 0.001
E = -1.81403 * 0.1
F = 1.51663
huff4 = A * x ^ 6 + B * x ^ 5 + C * x ^ 4 + D * x ^ 3 + E * x ^ 2 + F * x
End Function

Function STB(CN, A, Ai, tc, Tr, td, tfinal, tipo, dt)
'FUNÇÃO QUE GERA A VAZÃO VIA MÉTODO SANTA BÁRBARA
'=====
'Cálculos iniciais:
'=====
intensidade = 40.457 * Tr ^ 0.1471 / (td + 19.081) ^ 0.88655 'intensidade(mm/min)
P = intensidade * td 'altura pluviométrica (mm)
s = 25400 / CN - 254 'potencial de retenção (mm)
D = Ai / A 'fração de área impermeável
kr = dt / (2 * tc * 60 + dt) 'coeficiente de retardo
Qo = 0
t = 0
Paco = 0
Qo = 0
Iento = 0
Qsaio = 0

Do

t = t + dt
'precipitação acumulada:
If (t < td * 60) Then
    If (tipo = 1) Then
        Pac = P / 100 * huff1(t / (td * 60) * 100)
    
```

```

        ElseIf (tipo = 2) Then
            Pac = P / 100 * huff2(t / (td * 60) * 100)
        ElseIf (tipo = 3) Then
            Pac = P / 100 * huff3(t / (td * 60) * 100)
        Else
            Pac = P / 100 * huff4(t / (td * 60) * 100)
        End If
    Else
        Pac = Pac
    End If
    'Chuva efetiva acumulada:
    If (Pac > 0.2 * s) Then
        Q = (Pac - 0.2 * s) ^ 2 / (Pac + 0.8 * s)
    Else
        Q = 0
    End If
    'Chuva efetiva por faixa:
    Qfx = Q - Qo
    'Precipitação por faixa:
    Pfx = Pac - Paco
    'Hidrograma de entrada no reservatório imaginário:
    i_imp = Pfx / dt ' (mm/s)
    i_perm = Qfx / dt ' (mm/s)
    Ient = A * (i_imp * D * 0.001 + i_perm * (1 - D) * 0.001)
    'Hidrograma de saída resultante:
    Qsai = Qsaio + kr * (Iento + Ient - 2 * Qsaio)
    If (Qsai < 0) Then
        Qsai = 0
    End If
    'Atualização:
    Paco = Pac
    Qo = Q
    Iento = Ient
    Qsaio = Qsai
    Loop Until (t >= tfinal)
    STB = Qsai

End Function

```

ÍNDICE

INUNDOGRAMAS

Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $Tr = 5$ anos, duração = 60 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.27).....	142
Inundograma de enchente mínima, gerado para precipitação de $Tr = 15$ anos, duração = 43 minutos e chuva tipo 3. (Figura 5.31).....	144
Inundograma de enchente máxima, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.35).....	146
Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 2,5$ anos, duração = 44 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.43).....	151
Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 56 minutos e chuva tipo 4. (Figura 5.47).....	153
Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1,5$ anos, duração = 33 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.55).....	157
Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 51 minutos e chuva tipo 4. (Figura 5.59).....	159
Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 21 minutos e chuva tipo 4. (Figura 5.67).....	163
Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 46 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.71).....	165
Inundograma de enchente mínima, gerada para precipitação de $Tr = 1$ ano, duração = 17 minutos e chuva tipo 4.(Figura 5.79).....	170
Inundograma de enchente, gerada para precipitação de $Tr = 100$ anos, duração = 32 minutos e chuva tipo 4 (Figura 5.83).....	172