



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ/MUSEU PARAENSE EMÍLIO
GOELDI/EMBRAPA**

Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO URBANA: MODELO EXPERIMENTAL DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Flávio Augusto Altieri dos Santos

Belém - PA

2010

FLÁVIO AUGUSTO ALTIERI DOS SANTOS

ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO URBANA: MODELO EXPERIMENTAL DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, área de concentração de Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha

Belém - PA

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

S237a Santos, Flávio Augusto Altieri dos

Alagamento e inundação urbana: modelo experimental de avaliação de risco. / Flávio Augusto Altieri dos Santos; Orientador:. – 2010

164 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2010.

1. Hidrologia. 2. Recurso hídrico. 3. Sistema de informação geográfica. 4. Modelo digital de elevação do terreno. 5. Inundação. 6. Alagamento. 7. Gerenciamento de risco. I. Universidade Federal do Pará II. Rocha, Edson José Paulino da, *orient.* III. Título.

CDD 20º ed.:551.48098115

FLÁVIO AUGUSTO ALTIERI DOS SANTOS

ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO URBANA: MODELO EXPERIMENTAL DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, área de concentração de Física do Clima.

Data de Aprovação: 18 / 03 / 2010

Conceito: 9,5

Banca Examinadora:

**Prof. Edson José Paulino da Rocha - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará**

**Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará**

**Prof. Everaldo Barreiros de Souza
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará**

**Prof. Ricardo Oliveira Figueiredo
Doutor em Biociência e Biotecnologia
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro
de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Oriental,
Embrapa Amazônia Oriental.**

*Aos meus pais, Raimundo Santos e
Francisca Altieri (homenagem postuma),
pela dedicação para com a criação dos seus
cinco filhos, pela perseverança para lutar
contras as adversidade que a vida lhes
impuseram para educar a cada um de nós.
Sem Vocês este trabalho não existiria.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha esposa Márcia Lobo pelo seu amor, carinho, compreensão, dedicação e apoio incondicional por todas às vezes que necessitei.

Aos meus filhos: Anna Flavia, Anna Livia e Flavio Altieri, pelo carinho e felicidade que sempre me proporcionam no meu retorno pra casa.

Ao professor Edson Rocha, pela orientação, amizade, e principalmente, por ter sido meu grande incentivador no momento de me decidir a retomar meus estudos.

Ao meu sogro Luís Lobo e minha sogra Maria da Graça, por me acolherem na sua família como um filho, e por estarem sempre prontos a me ajudar.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental, que com os seus conhecimentos contribuíram para o meu crescimento profissional.

Aos meus colegas do SIPAM, que nos momentos difíceis, quando o tempo se mostrava curto demais para conciliar os estudos com minhas atribuições institucionais, lá estavam eles, me ajudando a cumprir com minhas obrigações profissionais.

A todos os meus colegas do curso de mestrado, que tive o prazer de conhecer e conviver ao longo desse tempo.

RESUMO

Teve como objetivo desenvolver um modelo experimental de avaliação de risco de alagamento e inundação para Belém, a partir do modelo digital de elevação do terreno, do hidrograma de escoamento superficial e da vazão máxima do canal de drenagem principal da bacia hidrográfica da Travessa Quintino Bocaiúva. Na execução do trabalho foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento para sistematizar os dados vetoriais relativo às unidades edificadas, eixo de vias e das cotas altimétricas para gerar o modelo digital do terreno. O desenvolvimento do sistema foi customizado através da linguagem de programação, objetivando facilitar e simplificar a operacionalização das rotinas de processamento das equações definidas para a execução do modelo hidrológico. Para a aplicação do modelo hidrológico a bacia hidrográfica foi subdividida em células de 25 m², sendo que para cada uma foi determinado sua cota de elevação e calculado o seu escoamento superficial com base na percentagem de impermeabilização de cada uma. A vazão de pico do canal foi obtida através de campanhas de campo considerando duas situações: em condições de ocorrência de chuva de intensidade alta e outra sem influência de chuva. Para essas duas condições, também foi avaliada a influência das condições da maré do Rio Guamá sobre o canal principal da bacia. A coerência do modelo foi constatada a partir do teste de sensibilidade realizado para cada variável utilizada e sua validação feita com base nos dados de alguns eventos pluviométricos já ocorridos e checados através de matérias jornalísticas e registros fotográficos obtidos em campo no dia do evento. Os resultados obtidos indicam que o modelo hidrológico aplicado teve uma resposta positiva, e o sistema desenvolvido se mostrou eficiente e eficaz para ser aplicado como ferramenta de avaliação de risco de alagamento e inundação.

Palavras-chave: Hidrologia. Recurso hídrico. Sistema de informação geográfica. Modelo digital de elevação do terreno. Inundação. Alagamento. Gerenciamento de risco.

ABSTRACT

This study aimed to develop an experimental model for assessing risk of flooding and flood to Bethlehem, based on the model of digital terrain elevation, the runoff hydrograph and the peak flow of the main drainage channel of the river basin. We used GIS tools to systematize the vector data on the units occupied by buildings, roads and the axis of altimetric quotas to generate a digital terrain model. The development of the system was customized by programming language, aiming to facilitate and simplify the operation of the processing routines of the equations defined for the implementation of the hydrological model. The hydrologic model basin was subdivided into cells of 25m², and each one was given his share of high and calculated their runoff based on the percentage of impermeabilização of each. The peak discharge channel was obtained on field trips at two different situations: during rainfall events of high intensity and one without the influence of rain. For these two conditions, it was also evaluated the influence of the tide of the Guamá River on the main channel of the basin. The consistency of the model was found from the sensitivity test performed for each variable used and validated based on data from some rainfall events that was checked by journalistic and photographic records obtained in the field. The results indicate that the applied hydrologic model, and the developed system are efficient and effective to be applied as a tool for risk assessment of flooding and flood.

Keyword: Hydrology. Water resource. Geographical Information System. Digital elevation model of the terrain. Flood. Flooding. Risk Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1.	Evolução da população urbana entre 1955 a 2015.....	24
Tabela 2.	Crescimento da população brasileira e taxa de urbanização.....	25
Tabela 3.	População das 12 maiores metrópoles brasileiras com mais de 1 milhão de habitantes em 2000, 2005 e 2007.....	26
Figura 1.	Representação esquemática da atmosfera urbana comparada com a suburbana e rural.	28
Figura 2.	Quantitativos dos albedos de materiais urbanos.....	28
Figura 3.	Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.	30
Figura 4.	Características dos leitos do rio.	31
Figura 5.	Ilustração das fases da Lua em relação a posição da Terra e do Sol. .	32
Figura 6.	Esquema básico da variação do fluxo de água representado pelas setas, as quais indicam a direção e velocidade do fluxo na forma transversal ao canal.....	40
Figura 7.	Distribuição dos pontos de medidas.	40
Tabela 4.	Distância recomendada entre cada seção vertical, de acordo com a largura do canal drenagem principal.	40
Tabela 5.	Número e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade do rio. S=superfície do canal; F= fundo do canal; p=profundidade do canal.....	41
Figura 8.	Modelo de elevação do terreno de Belém gerado através da interpolação de cotas altimétricas.	42
Quadro 1.	Características morfométrica estudadas.	46
Figura 9.	Mapa de localização da área de estudo deste trabalho.	47
Figura 10.	Exemplo comparativo entre formas de bacia hidrográfica.....	49
Tabela 6.	Classificação das formas de uma bacia.....	50

Quadro 2.	Classes de declividade definidas em função das recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados.....	51
Figura 11.	Representação das classes de exposição do terreno.....	51
Quadro 3.	Classes de exposição do terreno.....	52
Tabela 7.	Classificação das bacias quanto à densidade de drenagem.....	53
Figura 12.	Local da secção transversal definida para realização das medições, localizado na Trav. Quintino Bocaiúva próximo a Pass. Carlos de Carvalho.....	54
Figura 13.	Interface de visualização do software wxtide32.....	58
Figura 14.	Representação do modelo de balanço de água.....	60
Figura 15.	Perfil de umidade em um solo.....	63
Figura 16.	Resposta hidrológica da bacia hidrográfica.....	63
Figura 17.	Hidrograma triangular SCS.....	65
Figura 18.	Representação da divisão da bacia para aplicação do modelo.....	69
Figura 19.	Tabela de atributos do dado espacial (grid) que contém os campos necessários para a execução do modelo hidrológico.....	69
Figura 20.	Distribuição Anual da Precipitação para o período de 1923 a 2009.....	71
Tabela 8.	Variação Decenal das Chuvas (1923-2005).....	71
Figura 21.	Gráfico da média decenal da precipitação total anual.....	72
Tabela 9.	Distribuição Anual da Precipitação Total (mm).....	72
Tabela 10.	Freqüência da precipitação diária.....	73
Tabela 11.	Distribuição das ordens quantílicas para delimitação das categorias.....	74
Figura 22.	Distribuição do período seco e chuvoso referente ao período de 1923 a 2007.....	74
Quadro 4.	Ocorrências dos eventos de El Niño e La Niña.....	75
Tabela 12.	Ocorrência das categorias por décadas.....	76
Tabela 13.	Cálculo do Balanço Hídrico de Belém.....	77
Figura 23.	Distribuição mensal do excedente e deficiência de água no solo.....	78

Figura 24.	Distribuição mensal da evapotranspiração potencial e real.	78
Figura 25.	Temperatura do Ar - Média das Máximas Anual, Normalizada por $Z(i) = (T(i) - T_m) / D_p$ – 1923 a 2006.....	79
Figura 26.	Temperatura do Ar - Média das Máximas e Mínimas Anual, Normalizada por $Z(i) = (T(i) - T_m) / D_p$	81
Figura 27.	Gráfico representativo da média da velocidade e direção do vento registrado na área de estudo.....	82
Figura 28.	Mapa de uso e ocupação de 1979 (a) e de 2006 (b).	83
Tabela 14.	Classes de cobertura do solo.....	84
Figura 29.	Ilhas de calor urbanas extraídas do sensor termal do Landsat TM5 de 27/07/84, 12h52min GMT (a) e de 09/08/06, 10h16min GMT (b).....	85
Figura 30.	Perfil do campo térmico (AB) extraído da imagem Landsat TM5 (B6) de 09/08/06 (10h16min GMT).	86
Figura 31.	Perfil do campo térmico (CD) extraído da imagem Landsat TM5 (B6) de 09/08/06 (10h16min GMT).	87
Figura 32.	Comportamento da Temperatura do ar média por bairro.....	88
Figura 33.	Forma geométrica da bacia hidrográfica do projeto.	90
Foto 1.	Galeria subterrânea por onde desemboca a água do canal da Estrada Nova.....	90
Figura 34.	Perfil topográfico do terreno lateral ao canal da Quintino Bocaiúva.....	91
Tabela 15.	Pontos de referência sobre o perfil topográfico do MDE por onde passa o canal da Quintino Bocaiúva.....	92
Figura 35.	Modelo digital de elevação do terreno apresentado em 3D com alagamento das cotas inferior a 3,53 m de elevação.	92
Foto 2.	Construções habitacionais construídas sobre o canal (Imagem GeoEye-2010/Google).....	93
Foto 3.	Acumulo de lixo registrado no leito do canal, próximo a sua foz, represado pelas moradias construídas indevidamente sobre o canal.....	94

Figura 36. Mapa da distribuição espacial do uso e ocupação do solo na área do projeto.....	95
Tabela 16. Percentual das áreas da bacia em relação aos uso e ocupação do solo na área do projeto.	96
Tabela 17. Percentual das áreas da bacia em relação aos tipos de construção na área do projeto.	96
Figura 37. Mapa da distribuição espacial do tipo de construção existente na área do projeto.....	97
Figura 38. Visualização da distribuição espacial do tipo de uso do solo e de construção das moradias localizadas em uma área considerada crítica em relação a alagamento e inundação.	98
Figura 39. Mapa de localização de árvores isoladas que compõem a arborização da bacia estudada.	99
Tabela 18. Resultado do cálculo das características morfométricas da bacia hidrográfica. 100	
Figura 40. Forma geométrica da bacia hidrográfica do projeto.	102
Figura 41. Variação altimétrica determinada pelo modelo digital de elevação do terreno, classificado em intervalo de 1 metro.	103
Figura 42. Mapa de declividade da bacia hidrográfica estudada.	104
Figura 43. Mapa de exposição do terreno da bacia hidrográfica estudada.	105
Quadro 5. Distribuição da orientação do fluxo do escoamento superficial da área da bacia.....	106
Figura 44. Identificação de pontos de alagamentos através da análise do mapa de orientação do fluxo.	106
Figura 45. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 29/03/2005.	117
Figura 46. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 14/03/2006.	118
Figura 47. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 29/03/2006.	119
Figura 48. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 27/04/2007.	120
Figura 49. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 27/04/2009.	121

Tabela 19. Dados de profundidade para determinação vertical da secção e da vertical da secção molhada do canal com base no levantamento de campo realizado na data de 27/04/09.	122
Figura 50. Vertical da secção transversal, secção molhada e morfologia do fundo do canal da Quintino Bocaiúva.....	122
Tabela 20. Cálculo da área total da secção transversal e secção molhada a partir dos perfis verticais.....	123
Foto 4. Localização da régua linimétrica instalada no Rio Guamá próximo a restaurante (R8) da UFPA.....	124
Quadro 6. Medidas das velocidades do fluxo de água obtidas a 60% de profundidade do canal referente às verticais das secções molhadas obtidas no trabalho de campo executado na data de 27/04/09.	125
Tabela 21. Vazões das verticais das secções molhadas calculadas para a data de 27/04/09.....	126
Figura 51. Precipitação registrada no dia 27/04/09 na estação meteorológica do INMET (CEASA).....	126
Tabela 22. Leitura do nível de água no canal da Quintino Bocaiúva obtida durante o trabalho de campo executado na data de 27/04/09.	128
Figura 52. Esquema da variação da vazão ao longo dos perfis verticais da secção transversal do canal correspondente a data de 27/04/09.....	129
Figura 53. Comportamento da vazão e do nível do canal em relação ao nível da maré referente à data de 27/04/09.....	130
Quadro 7. Medidas das velocidades do fluxo de água obtida a 60% de profundidade do canal referente às verticais das secções molhadas obtidas no trabalho de campo executado na data de 22/08/09.	131
Tabela 23. Vazão das verticais das secções molhadas obtidas a partir da equação 3 para a data de 22/08/09.	132
Figura 54. Gráfico demonstrativo do comportamento da vazão do canal para condições normais, ou seja, sem influência de chuva.....	132

Tabela 24. Leitura do nível do canal da Quintino Bocaiúva obtida durante o trabalho de campo executado na data de 22/08/09.	134
Figura 55. Gráfico demonstrativo do comportamento do nível e vazão do canal e função da variação do nível da maré do Rio Guamá.	135
Tabela 25. Dados de campo de nível e vazão do canal e de nível da maré do Rio Guamá para a data de 22/08/2009.....	135
Figura 56. Gráfico demonstrativo da vazão do canal para o dia 22/08/2009 durante um ciclo de maré.	136
Figura 57. Gráfico comparativo entre as vazões do canal para as data de coleta com e sem ocorrência de chuva.....	137
Tabela 26. Verificação da sensibilidade dos parâmetros para como o modelo hidrológico.....	139
Figura 58. Relação entre a intensidade da precipitação com a área afetada por alagamento e inundação.	139
Figura 59. Relação entre a vazão máxima do canal com a área afetada por alagamento e inundação.	140
Figura 60. Interface do sistema de monitoramento de risco de alagamento e inundação para a área do projeto.....	141
Figura 61. Gráfico do comportamento da maré para o dia 27/04/09.....	143
Figura 62. Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 27/04/09.....	144
Figura 63. Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.....	145
Foto 5. Registro fotográfico da inundação ocorrida na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R Mundurucus decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.	146
Foto 6. Registro fotográfico da inundação ocorrida na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R Mundurucus decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.	146

Figura 64. Ponto de inundação (2) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.....	147
Foto 7. Registro de ponto de inundação na R. Pariquis com a Tv. 14 de Março decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.	147
Figura 65. Gráfico do comportamento da maré do dia 25/01/10.	148
Figura 66. Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 25/01/10.....	149
Figura 67. Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.....	150
Foto 8. Inundação na Tv. Quintino Bocaiúva esquina com a Tv. Tupinambás provocada pela transbordamento do canal.	150
Figura 68. Ponto de alagamento (2) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência e (b) as prováveis edificações afetadas.	151
Foto 9. Ponto de alagamento ocorrido na Tv. Quintino Bocaiúva entre R. Conceição e R. Pariquis conseqüência do transbordamento dos canais da D. Moraes e Generalíssimo Deodoro.	151
Figura 69. Ponto de alagamento (3) e inundação (4) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência e (b) as prováveis edificações afetadas.	152
Foto 10. Ponto de alagamento na Tv. Padre Eutíqueo próximo a Pass. São Sebastião.....	152
Foto 11. Ponto de inundação na Tv. Padre Eutíqueo próximo ao canal da Quintino Bocaiúva.	153

LISTA DE SIGLAS

ARCGIS/ARCVIEW – Sistema de Informação Geográfica
CAD – Computer-Aided Design
CEASA – Central de Abastecimento do Estado do Pará
CENTUR - Fundação Cultural do Pará Tancredo Neves
CODEM – Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ENVI – Environment for Visualizing Images
ETM⁺ - Enhanced Thematic Mapper Plus
FGV – Fundação Getúlio Vargas
GMT – Greenwich Mean Time (Hora Média de Greenwich)
GPS – Global Positioning System
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
LTM – Local Transverso de Mercator
MDE – Modelo Digital De Elevação
MSS – Multispectral Scanner
NMM – Nível Médio do Mar
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONU – Organização das Nações Unidas
PDU – Plano Diretor Urbano
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SHP – Shapefile
TM – Thematic Mapper
UFPA – Universidade Federal do Pará
UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UTM – Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	PROCESSO DE URBANIZAÇÃO.....	24
3.2	EFEITO DA OCUPAÇÃO URBANA SOBRE O CLIMA.....	26
3.3	BACIA HIDROGRÁFICA	28
3.4	PRECIPITAÇÃO INTENSA	29
3.5	ENCHENTE, ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO	29
3.6	NÍVEL DA MARÉ.....	32
3.7	NÍVEL MÉDIO DO MAR	33
3.8	MODELAGEM HIDROLÓGICA	33
3.9	MODELO DIGITAL DO TERRENO	37
3.10	MORFOMETRIA DE BACIA	38
3.11	MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	39
3.12	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.....	41
4	ASPECTOS GERAIS DO RELEVO DE BELÉM	41
5	MATERIAIS E MÉTODOS	43
5.1	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO	45
5.2	CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA	46
5.2.1	Características geométricas	48
5.2.1.1	Área de drenagem e perímetro.....	48
5.2.1.2	Forma da bacia.....	48
5.2.1.3	Características do relevo	50

5.2.1.4	Características de rede de drenagem.....	52
5.3	MEDIÇÃO HIDROLÓGICA.....	53
5.3.1	Medição de vazão e nível do canal.....	53
5.3.2	Morfologia, vertical da secção e vertical da secção molhada do canal.....	54
5.3.3	Vazão do canal.....	54
5.3.4	Elementos geométricos da secção.....	56
5.3.5	Medição do nível de água no canal.....	56
5.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	58
5.5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	67
5.6	PLATAFORMA DE TRABALHO E BASE DE DADOS.....	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
6.1	ASPECTOS CLIMÁTICOS DE BELÉM.....	70
6.1.1	Precipitação anual e sua variabilidade.....	70
6.1.2	Precipitação máxima em 24 horas.....	73
6.1.3	Caracterização de período seco e chuvoso.....	74
6.1.4	Balanço hídrico.....	76
6.1.5	Análise da temperatura do ar.....	79
6.1.6	Análise observacional do vento (Velocidade, Direção e Freqüência)....	81
6.2	ANÁLISE DA EXPANSÃO URBANA.....	82
6.3	ANÁLISE DO GRADIENTE TÉRMICO.....	84
6.4	DISCRETIZAÇÃO DA BACIA.....	89
6.5	OS ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES EM BELÉM.....	107
6.6	VAZÃO DO CANAL DA QUINTINO BOCAIÚVA.....	121
6.7	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	137
6.8	APLICAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO PARA BACIA URBANA..	140
7	CONCLUSÃO.....	154

8	SUGESTÕES	158
	REFERENCIAS	158

1 INTRODUÇÃO

Os eventos naturais extremos que mais repercutem nas atividades humanas no nosso país são de natureza climática. Embora sejam fenômenos naturais, a atuação do homem interferindo nas áreas urbanas ou rurais, ao longo do tempo, tem contribuído para sua maior frequência, intensidade e expansão areolar (BRANDÃO, 1992, 2001).

Historicamente as cidades na Amazônia localizam-se às margens dos rios e neste contexto a cidade de Belém não é diferente, a capital do Estado do Pará, é margeada pelo Rio Guamá e pela Baía do Guajará a uma altitude média de aproximadamente 10 m acima do nível do mar. Entretanto, segundo dados do Plano Diretor Urbano (PDU) de Belém, a concentração de grande parte da população ocorre onde à altitude da porção continental acha-se em áreas de cotas inferiores ou iguais a 4 metros, espaços tradicionalmente conhecidos por “baixadas”. Por esse motivo, estas áreas sofrem influência das bacias hidrográficas existentes no município, o que lhes impõem a condição de ocuparem terrenos alagados permanentemente, ou sujeitos a inundações periódicas.

Em 2007, segundo dados do último censo demográfico realizado pelo IBGE, a população de Belém já era de aproximadamente 1.408.847 habitantes, sinalizando para uma explosão demográfica que trás como conseqüência o efeito de um crescimento desordenado, através da ocupação de locais impróprios para moradia, como aqueles ambientes às margens dos igarapés que por influência de maré constantemente são alagados. Grande parte dos habitantes que ocupam estas áreas são pessoas de baixo poder aquisitivo.

O surgimento dessas áreas periféricas acentua a tendência à concentração da pobreza, criando dificuldade de ampliação das redes de infra-estrutura; dificuldade de acesso aos equipamentos e serviços urbanos concentrados nas áreas mais nobres; alto custo no atendimento às necessidades destas áreas.

Segundo Coelho (2001), a incidência das inundações influencia a classe média e alta a se afastarem das áreas urbanas definidas como área de risco¹, fazendo com que a especulação imobiliária sobre as áreas mais nobres da cidade pressione a população menos favorecida a ocuparem os ambientes naturais impróprios para moradia.

O processo de ocupação urbana, aliado a falta de planejamento de urbanização das cidades, tem como conseqüências: alterações no balanço de energia e alteração dos níveis de conforto urbano (elevação da temperatura e redução da umidade relativa). Além desses aspectos, o processo de urbanização impermeabiliza o solo proporcionando o aumento dos problemas relacionados às inundações que frequentemente afetam a população dessas áreas, tornando inevitável seu sofrimento por conta da perda de seus bens materiais e o aumento do risco de contaminação por doenças veiculadas por meios hídricos.

Segundo Tucci (2003), a maioria dos problemas relativos às inundações, é conseqüência de uma visão distorcida do controle por parte dos profissionais que ainda priorizam projetos localizados sem uma visão da bacia e dos aspectos sociais e institucionais das cidades. Observa-se que países em desenvolvimento e mais pobres, priorizam ações insustentáveis economicamente como as medidas estruturais, enquanto os países desenvolvidos buscam prevenir os problemas com medidas não-estruturais (educação, participação pública, legislação etc.) mais econômicas e com sustentabilidade ambiental. Como a maioria das soluções sustentáveis passa por medidas não-estruturais que envolvem restrições à população, dificilmente o Poder Público responsável pela gestão municipal busca soluções deste tipo, pois na maioria das vezes, ela implica na implementação de ações que interferem nos interesses dos proprietários dessas áreas de risco, que politicamente é complexo e não é bem visto pelos mesmos.

Com o passar do tempo, o processo de urbanização das regiões metropolitanas deixaram de crescer no seu centro, e passam a se expandir na periferia, justamente onde se concentram os mananciais, agravando este problema. Isso evidencia que a vulnerabilidade aos desastres naturais está associada não só aos aspectos relacionados ao meio físico como, por exemplo: clima, relevo, drenagem, solos, etc.,

¹ Área de Risco são ambientes naturais de alta vulnerabilidade socioambiental (DESCHAMPS, 2004).

mas, sobretudo, à situação socioeconômica da população localizada nos ambientes próximos aos leitos fluviais (MONTEIRO, 1991).

Em meados do século XX, morar próximo à orla do Rio Guamá e da baía do Guajará em Belém era quase impossível, não só em virtude das chuvas que inundavam grande parte dessa área, como também, pelas freqüentes enchentes influenciadas pelo regime de maré desses rios, que adentravam pelos inúmeros igarapés tornando a parte mais baixa da cidade uma extensão dos rios. Segundo Boletim SESP (apud, BRASIL,1943), em decorrência dessas incessantes enchentes essa área na época tornou-se um local propício às endemias, como aconteceu na primeira metade do século XX, quando foi registrado um grande surto de malária na região. Este Boletim SESP (apud, BRASIL,1943) informa-se ainda que, objetivando controlar o problema das enchentes nas áreas mais baixas da Cidade, foram realizadas várias obras, entre elas um dique, cuja parte principal, com cerca de 6 km coincide com o trecho hoje denominado Avenida Bernardo Sayão. Outros 10 km foram construídos, quando possível, considerando todas as estradas ou trabalhos feitos anteriormente, além de um sistema de drenagem para a cidade. O dique construído expande-se do igarapé Tucunduba até o igarapé de Val-de-Cans, com uma distância aproximada de 16 km. Esta obra impediu a Inundação de uma área de 38.540 m², e a área beneficiada pelo sistema de drenagem foi de 98.270.000 m².

“A cidade é construída em um terreno baixo, alagado pelas chuvas torrenciais e invadido pelas marés. A parte alta da Cidade é uma espécie de faixa que corre do sul para leste, à esquerda ficam as terras banhadas pelo Rio Guamá, à direita o litoral da baía de Guajará. Vários igarapés cortam o Município.” (Boletim SESP apud, BRASIL,1994).

Além da construção do dique, foram realizadas umas séries de obras como a construção de um canal pavimentado de 6 km, que inicia próximo a área da Universidade e se estende até o igarapé do Arsenal, e mais 4 canais laterais: Canal da Quintino Bocaiúva, Canal da Timbiras, Canal da Tamandaré e Canal de Val-de-Cans. A finalidade desses canais laterais seria de drenar a áreas sujeitas à inundação por causa das chuvas. Deve-se dizer que na época da inauguração desses canais, apenas o de Val-de-Cans não era pavimentado e todos foram

equipados com comportas de funcionamento automático para evitar a entrada da água das marés altas, entretanto, atualmente esta condição não é observada.

Os estudos a serem desenvolvidos no presente trabalho visam caracterizar a situação física da bacia do canal da Quintino Bocaiúva, como também, a construção de um banco de dados estruturado que possibilite correlacionar diversas variáveis através do uso de ferramentas de geotecnologia, tais como, Geoprocessamento, Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica.

Os dados coletados permitirão fazer um diagnóstico do processo de ocupação da bacia que servirá de subsídio para o desenvolvimento do “Modelo Experimental de Avaliação de Risco para Belém”. Este modelo permitirá desenvolver e disponibilizar à Defesa Civil, um sistema de alerta capaz de auxiliar à tomada de decisão e permitir executar ações preventivas que mitiguem os danos e otimizem os recursos públicos investidos para este fim.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia experimental aplicada à simulação de alagamento e inundação para área urbana, capaz de gerar informação técnica ágil e eficaz à tomada de decisão preventiva.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Analisar o clima da cidade de Belém;
- ✓ Identificar e analisar os eventos pluviométricos extremos e as conseqüências à população que vive na área urbana de Belém;
- ✓ Avaliar o processo de ocupação urbana e sua influência sobre as condições térmicas e o ciclo hidrológico da cidade de Belém;
- ✓ Desenvolver e testar um modelo experimental de avaliação de risco de alagamento e inundação;

- ✓ Desenvolver um sistema computacional que simule situações de alagamento e inundação para a bacia do projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

Nos últimos anos a população humana cresceu de forma bastante acentuada, e já nos anos 50 algumas concentrações urbanas como a de Nova York, Londres, La Ruhr, Tokio, Shanghai, Paris, Buenos Aires e Moscou já haviam atingido a marca de cinco milhões de habitantes, o que constituía cerca de 7% da população urbana do mundo. Até 2015 segundo dados da UNESCO, aproximadamente 54% da população estará concentrada em áreas urbanas (tabela 1).

Tabela 1. Evolução da população urbana entre 1955 a 2015.

Ano	1955	1975	1995	2015
% Total	32	38	45	54

Fonte: Fundo das Nações Unidas de Assistência de População (FNUAP/2007).

Na década de 70 a população mundial teve um considerável aumento, alcançando a marca de 3,6 bilhões. Em 1980 somavam 4,5 bilhões de pessoas e no ano 2.000 cerca de 6 bilhões de habitantes.

No dia 05 de agosto de 2008, a ONU (Organização das Nações Unidas) divulgou um relatório que apresentava as perspectivas de crescimento da população mundial para o futuro. De acordo com o estudo realizado, a população mundial, em julho de 2008, é de 6,7 bilhões de pessoas, e a expectativa de crescimento da população mundial, no ano de 2050 deverá alcançar o preocupante contingente de 9,2 bilhões de habitantes.

“Entre 1940 e 1980, dá-se verdadeira inversão quanto ao lugar de residência da população brasileira. Há meio século atrás (1940), a taxa de urbanização era de 26,35%, em 1980 alcança 68,86%. Nesses quarenta anos, triplica a população do Brasil, ao passo que a população urbana se multiplica por sete vezes e meio” (SANTOS, 1996, p. 29).

Nas últimas décadas o crescimento da população urbana no Brasil teve um aumento significativo (tabela 2), e foi responsável pela geração de grandes metrópoles formadas por cidades satélites e núcleos urbanos, resultado da expansão e o do crescimento descontrolado.

Tabela 2. Crescimento da população brasileira e taxa de urbanização.

Ano	População (milhões por habitantes)	População Urbana (%)
1970	93,1	55,9
1980	118,0	68,2
1991	146,8	75,6
1996	157,1	78,4
2005	175,1	79,0
2015	192,7	80,0

Fonte: IBGE, 1998, apud FGV, 1998.

O crescimento urbano também é responsável pela expansão irregular da periferia, não levando em consideração as regulamentações urbanas definida em seu Plano Diretor Urbano, ocasionando a ocupação irregular das áreas públicas pela população de baixa renda.

Com freqüência, o processo de urbanização observado nos países em desenvolvimento encontra-se concentrado em pequenos espaços territoriais, apresentando sérios problemas relacionados o transporte, abastecimento e saneamento, problemas de poluição do ar da água e inundações. Segundo Bertoni e Tucci (1993), estas condições ambientais inadequadas reduzem as condições de saúde e afetam a qualidade de vida da população.

Atualmente das 12 metrópoles mais populosas do País, duas se encontram na região norte: Manaus e Belém. Na tabela 3, observa-se o crescimento destas 12 metrópoles desde o ano de 2000 até o ano de 2007.

Tabela 3. População das 12 maiores metrópoles brasileiras com mais de 1 milhão de habitantes em 2000, 2005 e 2007.

Município	Taxa de crescimento 2000 (%)	População 2000	População 2005 (estimativa)	Taxa Cresc. (estimativa) (%)	População 2007
São Paulo	0,88	10.434.252	10.927.985	0,90	10.886.518
Rio de Janeiro	0,75	5.857.904	6.094.183	0,77	6.093.472
Salvador	1,85	2.443.107	2.673.560	1,72	2.892.625
Brasília	2,82	2.051.146	2.333.108	2,42	2.455.903
Fortaleza	2,17	2.141.402	2.374.944	1,97	2.431.415
Belo Horizonte	1,16	2.258.526	2.375.329	0,98	2.412.937
Curitiba	2,13	1.587.315	1.757.904	1,94	1.797.408
Manaus	3,76	1.405.835	1.644.690	2,90	1.646.602
Recife	1,03	1.422.905	1.501.008	1,04	1.533.580
Porto Alegre	0,94	1.360.590	1.428.696	0,95	1.420.667
Belém	1,92	1.280.614	1.405.871	1,78	1.408.847
Goiânia	1,94	1.093.007	1.201.006	1,80	1.244.645

Fonte: Censo 2000, estimativa para 2005 do IBGE e censo 2007, com base nos índices de crescimento do IBGE.

Belém, atualmente ocupa a 11^a colocação segundo os dados do último censo demográfico de 2007, sendo que as projeções indicam que já em 2010 ultrapassará a Metrópole de Porto Alegre, e contará com aproximadamente 1.500.000 de habitantes, ocupando assim a 10^a posição e posteriormente também deverá ultrapassar Recife.

3.2 EFEITO DA OCUPAÇÃO URBANA SOBRE O CLIMA

Os espaços urbanizados cada vez mais sofrem com as alterações causadas a partir de intervenções provocadas pelo homem, principalmente pela falta de planejamento da ocupação urbana adequada e ausência de áreas verdes. Grande parte desse problema ocorre pela substituição das áreas verdes por casas e prédios, ruas e avenidas e uma série de outras construções, que é tanto maior quanto mais se aproxima do centro das grandes cidades, fazendo aumentar significativamente a irradiação de calor para a atmosfera em comparação com as zonas periféricas ou rurais, onde, em geral, é maior a cobertura vegetal. Além desse problema, nas áreas mais centrais da cidade, se registra também, uma maior concentração de gases e

materiais particulados suspensos no ar, lançados principalmente pelos automóveis e pelas fábricas, proporcionando o aparecimento do “efeito estufa” localizado, colaborando para a formação de ilhas de calor urbanas. Este fenômeno é considerado o exemplo mais evidente de mudança climática provocada pelo homem, e que tem sido um dos temas mais abordados nos últimos anos, devido sua ocorrência em praticamente todas as cidades do mundo. Segundo LOMBARDO (1985), essas mudanças climáticas elevam a temperatura, provocando uma baixa na pressão atmosférica, gerando uma circulação local, contribuindo para a concentração da massa úmida existente no entorno e provocando anomalias na precipitação sobre estas áreas.

Desta forma, a expansão das áreas urbanas proporciona a formação de diferentes microclimas no interior e ao redor dos espaços urbanos, conforme observado em diversos estudos realizados (LOMBARDO, 1985; MENDONÇA, 2003).

A cidade de Belém pela sua localização geográfica, circundada pela baía do Guajará e pelo Rio Guamá, tem reflexos por conta do problema da ocupação urbana desordenada, influenciada principalmente pela perda dos seus últimos remanescentes de vegetação e pela impermeabilização do solo.

Oke (1978) desenvolveu um estudo sobre ilhas de calor no qual define um modelo de clima urbano que retrata como este fenômeno ocorre nos centros urbanos (figura 1). Este fenômeno é conhecido como sendo um aumento maior da temperatura do ar ou da superfície no centro urbano da cidade em relação às áreas vizinhas. Este fato ocasiona um desconforto para a população podendo ocorrer tanto de dia quanto a noite, sendo que, a diferença de temperatura entre a área rural e urbana é sempre maior ao anoitecer de dias claros e sem brisas. O resfriamento das áreas urbanas durante a noite é mais lento em relação às áreas rurais, devido o calor retido por diversos materiais como asfalto, calçadas, edifícios, etc., que têm diferentes padrões de reflectividade, ou de albedos (figura 2). Observa-se também que na cidade, o calor sensível, se dissipa com muito mais dificuldade do que na área rural devido aos obstáculos a esta dissipação relacionado à geometria da cidade e ao efeito estufa causado pela re-emissão da energia térmica absorvida pelas partículas em suspensão na atmosfera urbana. Este tipo de situação em que o processo de impermeabilização do solo e o baixo índice de áreas verdes observados nos

grandes centros urbanos, proporciona a redução da umidade do solo e impede a evaporação, aumentando desta forma a quantidade de calor disponível para o aquecimento do ambiente.

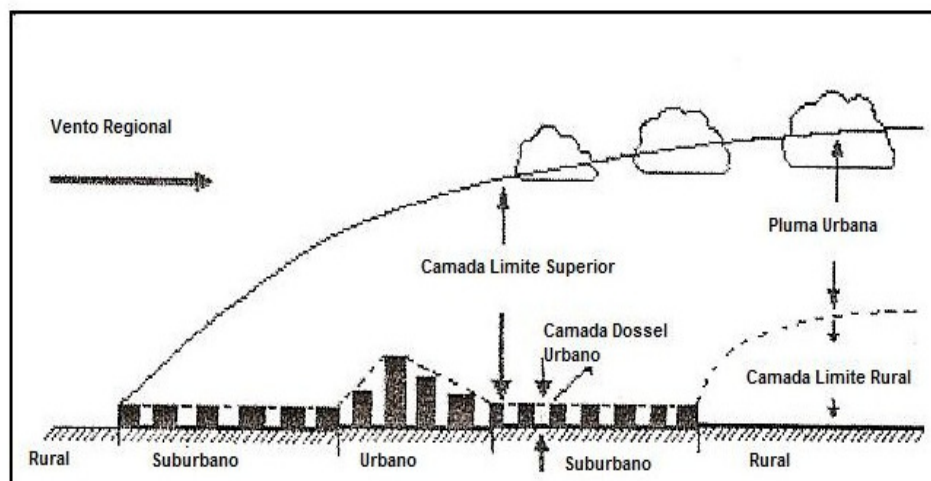


Figura 1. Representação esquemática da atmosfera urbana comparada com a suburbana e rural.

Fonte: OKE, 1978.



Figura 2. Quantitativos dos albedos de materiais urbanos.

Fonte: OKE, 1978.

3.3 BACIA HIDROGRÁFICA

Conceitualmente uma bacia hidrográfica ou bacia de drenagem é uma área de captação natural da água da chuva que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída. A formação das bacias hidrográficas ocorre devido aos desníveis do

terreno que orientam a drenagem das águas numa determinada direção. Todas as bacias hidrográficas de uma determinada região estão separadas topograficamente entre si pelos chamados divisores de águas, sendo possível dividir, através desses divisores, todo o território em bacias hidrográficas. Segundo Tucci (2001), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume que escoar pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente.

O papel hidrológico da bacia hidrográfica consiste em transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento), de forma mais distribuída no tempo.

3.4 PRECIPITAÇÃO INTENSA

Normalmente se considera como precipitação intensa, aquela originada de uma mesma perturbação meteorológica, cuja intensidade ultrapasse certo valor em milímetro (mm). Geralmente a variação dessa perturbação vai desde alguns minutos até uma dezena de horas e a área atingida pela mesma pode variar desde alguns poucos quilômetros até milhares de quilômetros quadrados (GARCEZ, 1974).

O conhecimento das características das precipitações intensas de curta duração é de grande interesse do ponto de vista hidrológico quando se trabalha com bacias urbanas para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como: dimensionamento de galerias de obras pluviais.

3.5 ENCHENTE, ALAGAMENTO E INUNDAÇÃO

Os problemas de enchentes, inundações e alagamentos que muito atingem as populações que estão localizadas em áreas urbanas e rurais são decorrentes de fenômenos naturais de caráter hidrometeorológico ou hidrológico. Esses desastres são quase sempre deflagrados por chuvas rápidas e fortes ou intensas de longa duração. Geralmente esses tipos de fenômenos são intensificados pelas alterações provocadas pelo homem ao meio ambiente, como por exemplo, a impermeabilização do solo e as retificações dos cursos d'água decorrente das intervenções urbanas.

Os problemas de enchentes, inundações e alagamentos são freqüentes nas maiores das cidades brasileiras, entretanto, se tornam mais intensos e graves nas regiões metropolitanas devido às ocupações irregulares dos terrenos marginais de cursos d'água feitas pelas populações de baixo poder aquisitivo.

Por muitas vezes os termos “enchente”, “inundação” e “alagamento” são tratadas como sinônimos tanto em trabalhos científicos quanto em dicionários da língua portuguesa, entretanto, aqui iremos considerar que as mesmas têm significados diferentes (figura 3). A palavra “enchente” procede do latim “*plenus*” que significa “cheio”, e segundo Aurélio (2008), sua definição é “ocupar o vão, a capacidade ou a superfície de; tornar cheio ou repleto”. Este fenômeno é conhecido pela elevação temporária do nível d'água ao longo de um canal de drenagem decorrente ao aumento da vazão ou descarga. Já “inundação” deriva do verbo inundar, que tem como significado “ação ou efeito de inundar; transbordamento da águas, cobrindo certa extensão do terreno” (AURÉLIO, 2008).



Figura 3. Perfil esquemático do processo de enchente e inundação.

Fonte: Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisa Tecnológica, 2007.

Já a terminologia “Alagamento” é utilizada para definir os processos decorrentes ou não dos problemas de natureza fluvial, causando o acúmulo momentâneo de águas em um dado local por problemas de deficiência no sistema de drenagem devido a seu baixo coeficiente de escoamento superficial.

Desta maneira, as terminologias inundação e alagamento, consistem nas palavras mais adequadas para se descrever o fenômeno abordado nesse estudo, pois, trata-se das águas que transpõe os limites dos canais, invadindo ruas, terrenos, áreas públicas e edificações.

Coelho (2001, p.28) menciona que “...A incidência das inundações motivou as classes média e alta a se afastarem das áreas urbanas delimitadas como áreas de risco. As inundações continuam a vitimar as classes baixa”. Isto evidencia que as inundações não estão associadas somente com os aspectos do meio físico, mas também, com a questão socioeconômica da população (MONTEIRO,1991).

As inundações e os impactos em áreas urbanas, segundo TUCCI (2000) podem ser produzidos por dois processos que ocorrem de forma isolada ou combinada que são: Inundações de áreas ribeirinhas e inundações devido a urbanização.

Os rios geralmente possuem dois leitos, o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior que é inundado com uma periodicidade que varia entre 1,5 a 2 anos (figura 4). Os impactos das inundações estão justamente associados quando a população passa a ocupar o leito maior do rio.

Estas inundações ocorrem, principalmente, pelo processo natural do ciclo hidrológico, ou seja, quando o rio escoar pelo seu leito maior. Isto significa dizer que o leito maior dos rios é considerado áreas de risco, onde justamente os impactos são mais frequentes.

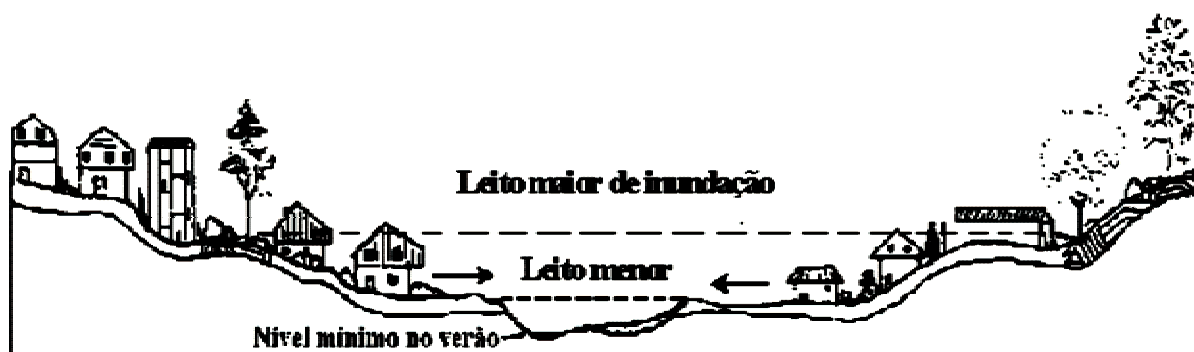


Figura 4. Características dos leitos do rio.

Fonte: SCHUELLER, 1987.

A inundação urbana é uma ocorrência tão antiga quanto às cidades ou qualquer aglomerado urbano (TUCCI, 2000). Este problema ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido a falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupa áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros. Estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios ou

ampliados pelo efeito de alteração produzida pelo homem na urbanização pela impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios.

Devido à impermeabilização do solo decorrente da ocupação urbana, o escoamento passa a ser feito por condutos e canais, aumentando a quantidade de água que chega ao mesmo tempo ao sistema de drenagem provocando uma com maior frequência de inundações.

3.6 NÍVEL DA MARÉ

Maré refere-se ao fenômeno da alteração da altura das marés e oceanos, causado pela interferência da Lua e do Sol sobre o campo gravitacional da Terra (GARRISON,1998). Quando a maré atinge sua cota máxima a mesma é denominada de maré alta, maré cheia ou preamar. Quando atinge o seu menor nível chama-se maré baixa ou baixa-mar. Em média, as marés oscilam em um período de 12 horas e 24 minutos. Doze horas devido à rotação da terra e 24 minutos devido à órbita lunar.

A altura da maré alta e baixa, também sofre variações influenciadas pelas fases da Lua. Na Lua nova e cheia, a força gravitacional do Sol está na mesma direção que as da Lua (figura 5), produzindo marés mais altas, chamadas marés de sizígia. Na Lua minguante e crescente a forças gravitacional do Sol está em direção diferente da Lua, anulando parte dela, produzindo marés mais baixas chamadas marés de quadratura.

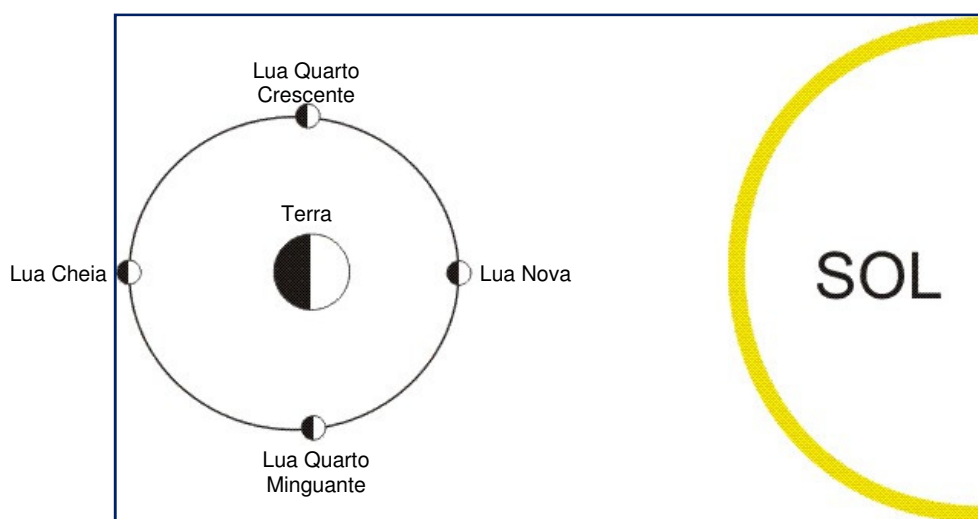


Figura 5. Ilustração das fases da Lua em relação a posição da Terra e do Sol.

Fonte: Mar da Bahia (2009).

Com outras palavras, diz-se que as marés são mudanças periódicas na altura da superfície oceânica em um determinado lugar, causado pela combinação da força gravitacional da Lua, do Sol e do movimento da Terra (GARRISON, 1998).

O nível de maré tem como referência para sua determinação o zero hidrográfico, que comumente é utilizado em hidrografia costeira e na medição de profundidade dos portos. O zero hidrográfico varia de local para local, e é normalmente definido pelo nível da mais baixa das baixa-mares registradas durante um dado período de observação, sendo que, na maior parte dos casos o zero hidrográfico é feito coincidir com o nível médio do mar ou tem com ele uma relação simples e constante.

3.7 NÍVEL MÉDIO DO MAR

O Nível Médio do Mar é por sua vez a altitude média da superfície do mar medida em relação a uma superfície terrestre de referência, sendo utilizado como ponto de referência a partir do qual são medidas as altitudes dos acidentes topográficos e marcadas as curvas de nível e as altitudes nos mapas e plantas. Tradicionalmente a medição do nível médio do mar é feita com base nas leituras dos marégrafos, instrumentos que permitem medir a variação do nível das águas num determinado local (MESQUITA, 1986).

3.8 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelos hidrológicos vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de prever impactos que possam ocasionar transtornos à população, através de aplicações de modelos que possibilite o estudo de cenários diferentes de forma rápida e de baixo custo. Uma das propriedades mais importantes de um modelo hidrológico é o grau de representação das variáveis espaciais e temporais nos parâmetros de entrada e saída.

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

Segundo Maidment (1993), um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo. De fato, o modelo hidrológico pode ser considerado como uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras e/ou simular situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos de alterações (TUCCI, 1998).

Cada vez mais os modelos matemáticos estão sendo utilizados em estudos ambientais, contribuindo para o entendimento dos impactos das mudanças no uso e cobertura do solo e na prevenção de alterações futuras nos ecossistemas. De um modo geral, os processos ambientais no mundo real são bastante complexos e são tipicamente de dimensão tridimensionais e dependentes do tempo. No entanto, a possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complexas, exigindo simplificações para seu uso (STEYAERT, 1993). Daí que, um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade, ou seja, o modelo de simulação, de um modo geral, consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real.

Outros aspectos são extremamente importantes de serem observados como dificuldade na representação dos processos físicos, como as limitações computacionais ou a maneira pela qual as equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, que leva à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Entretanto, esse conjunto de equações parametrizadas representa a melhor aproximação do modelador para explicar esses processos, considerando todas essas restrições. De um modo geral, um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Assim, não existe um modelo único que seja o melhor e sim, pode existir aquele que melhor descreve um determinado fenômeno.

Vários aspectos são importantes para serem abordados visando à modelagem hidrológica, que está diretamente associada ao conhecimento dos processos

relacionados com meio físico, como por exemplo, a infiltração e o escoamento superficial da água, a capacidade de armazenamento de água do solo, a evaporação e a vazão dos meios de drenagem (rios, igarapés e canais).

A infiltração da água de uma precipitação no solo nada mais é do que a passagem de água da superfície para o interior do solo. A infiltração também pode ser definida como sendo o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através de vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte que a retém, formando então a água do solo (PINTO ET AL, 1976).

Entender o processo de infiltração que ocorre durante um evento pluviométrico em um determinado intervalo de tempo é de grande importância para o desenho de um modelo de simulação para inundação. TUCCI (1979) afirma que a infiltração da água no solo tem sido estudada por muitos pesquisadores de diferentes áreas, isto porque, para que se possa calcular o volume que escoar superficialmente, é necessário conhecer o volume infiltrado em função do tempo. A infiltração é importante nos primeiros minutos do evento sendo constante e pequena após a saturação do solo. Para solos impermeabilizados ela é aproximadamente zero e toda chuva é escoada aumentando o risco de inundação da bacia de drenagem.

Vários pesquisadores trabalharam no desenvolvimento de equações matemáticas para determinar o cálculo de infiltração e a percolação de água no solo. Berthelot (1970 apud SILVEIRA et al, 1997) apresentou um algoritmo para calcular a infiltração e a percolação de água na camada superior do solo, admitindo que a capacidade de infiltração (potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície) é menor do que a precipitação. Segundo SILVEIRA et al (1997), o algoritmo de Berthelot calcula a capacidade de infiltração a qualquer tempo, inclusive podendo definir o instante de tempo no qual a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração.

Das fases básicas do ciclo hidrológico, talvez uma das mais importantes seja exatamente o escoamento superficial, que é a fase que trata da ocorrência e do transporte da água na superfície terrestre. Diversos são os fatores que influenciam o escoamento superficial, dentre os quais podem-se destacar os de natureza climática

e fisiográfica. Os fatores de natureza climática, que mais se destacam são a intensidade, a duração da chuva e a precipitação antecedente, ou seja, a condição de umidificação da bacia. Como fatores de natureza fisiográfica, ou seja, aqueles ligados às características físicas da bacia são apontados: a área da bacia de contribuição, a conformação topográfica da bacia (declividades, depressões acumuladoras e retentoras de água, forma da bacia), condições da superfície do solo e constituição geológica do subsolo (existência de vegetação, capacidade de infiltração, permeabilidade do solo e a natureza e disposição das camadas geológicas) e a forma da bacia – circular a velocidade de escoamento baseado na declividade média da bacia.

Outro aspecto importante a ser considerado é a capacidade de armazenamento de água do solo. O solo é o local responsável pelo armazenamento de água, a sua boa condição para isso está relacionada principalmente a uma boa permeabilidade, a qual depende, em grande parte, da concentração de matéria orgânica, tanto para solos argilosos como para arenosos. A matéria orgânica por ser porosa funciona com uma esponja, retendo grande quantidade da água precipitada, diminuindo o escoamento superficial. Em área urbanizada, uma parte do solo encontra-se impermeabilizado pela substituição das áreas verdes por casas e prédios, ruas e avenidas e uma série de outras construções, aumentando desta forma o escoamento superficial da água pluvial.

Segundo Devantier & Feldman (1993) “quando um modelo usa um elemento menor do que o tamanho da escala do processo físico, o modelo é descrito como distribuído, e quando a escala do modelo é a mesma da escala do processo (a bacia completa), ele é chamado de modelo agregado”. Os modelos distribuídos normalmente apresentam melhores resultados, porém exigem a manipulação de uma grande quantidade de dados a fim de prepará-los em arquivos de entrada (RAFAELI NETO, 2000).

A crescente demanda no uso e validação de modelos matemáticos e simuladores, cada vez mais próximos da realidade, reside nas vantagens obtidas com o emprego dessas técnicas, como o baixo custo, a velocidade, informação completa, criação de cenários diversificados, e proposição de cenários ideais (PESSOA et.1997).

Segundo Velez et al. (1998), o modelo hidrológico é uma ferramenta da ciência usada para melhor entender e representar o comportamento de uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Esses tipos de modelos requerem informações sobre outros fatores ambientais como: clima, relevo, solo, geologia, cobertura vegetal, entre outros. Essas variáveis são usadas como entradas numéricas em algoritmos baseados no comportamento físico da precipitação, do escoamento superficial e da vazão do canal de drenagem da bacia hidrográfica.

A maioria dos modelos busca uma representação mais detalhada nos processos dominantes como: infiltração, escoamento superficial em rios e escoamento subterrâneo (TUCCI, 1998). Por outro lado, o uso de Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto vêm compondo a estrutura de alguns modelos visando a obtenção de informações físicas e climáticas das bacias levando em consideração a variabilidade espacial desses parâmetros (TUCCI, 1998).

3.9 MODELO DIGITAL DO TERRENO

Os modelos em perspectiva são conhecidos como Modelos Digitais do Terreno ("Digital Terrain Model, DTM), ou Modelos Digitais da Superfície ("Digital Ground Model", DGM). O termo Modelo Digital do Terreno é o mais utilizado. Segundo Doyle (1978), ele parece ter origem num trabalho de Charles L. Miller e colaboradores, no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, entre 1955 a 1960. Todas as expressões acima fazem referência à aquisição, processamento e utilização de dados digitais para a elaboração de modelos que representem, graficamente, o relevo da superfície terrestre. Doyle (1978) os definiu como arranjos ordenados de números, que reproduzem a distribuição espacial das características do terreno. Na maioria das vezes, essa distribuição é representada por um sistema de coordenadas retangulares ou pela latitude e longitude. A característica do terreno, geralmente referenciada, é o relevo estimado pela sua cota ou altitude. Além da elevação, podem ser incluídas, nos modelos, muitas outras feições do terreno. Essas referem-se a tipo de solo, posse, valor da propriedade, profundidade do leito da rocha matriz, uso da terra e outros. Daí surgiu a expressão Modelo Digital de Elevação ("Digital Elevation Model", DEM), para se referir aos modelos que consideram, como característica do terreno, somente a elevação. Mikrail et al. (1978) consideram os modelos de elevação como subconjuntos dos modelos digitais do terreno.

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

A partir do MDE pode-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais. Sua visualização é feita gerando-se imagens em níveis de cinza, considerando o intervalo de espaço de cores entre 0 e 256. A visualização de um MDE em níveis de cinza consiste em distribuir os valores mínimos e máximos das cotas em níveis de cinza entre 0 e 256 linearmente. Assim, cada célula da grade corresponderá a um pixel na imagem de saída e os valores mínimos de cota serão representados por pixels escuros e os valores máximos, por pixels claros.

O MDE também pode ser utilizado para o delineamento de bacias hidrográficas e sua rede de drenagem com a utilização de um modelo de ponto d'água em oito direções, no qual cada célula é conectada a uma de suas oito células vizinhas (quatro nas laterais principais, quatro nas diagonais) e a água flui apenas em direção à célula vizinha, cuja descida seja mais íngreme (JENSON e DOMINGUE, 1988).

3.10 MORFOMETRIA DE BACIA

Desde a mais remota antigüidade, o homem vem desenvolvendo a sua habilidade para reproduzir as formas encontradas na natureza. Para isso, ele teve que desenvolver a capacidade de efetuar medidas relativamente seguras para ter sucesso em suas construções.

A palavra Morfometria é formada pelo radical grego - *morphé*, que significa a forma, associado ao radical grego - *metrikós*, ou do latim - *metricu*, que significa ato de medir ou processo de estabelecer dimensões.

Segundo Villela & Mattos (1975), uma bacia hidrográfica é definida por uma área de contribuição, delimitada por divisores topográficos e drenada por um sistema

interconectado de cursos d'água, ou seja, uma bacia hidrográfica compreende toda a área de captação natural da água da chuva que proporciona escoamento superficial para o canal principal e seus tributários. O limite superior da bacia hidrográfica é conhecido como o divisor de águas (divisor topográfico), e a delimitação inferior é a saída da bacia (confluência).

As características físicas de uma bacia são elementos de grande importância em seu comportamento hidrológico, devido à existência de uma estreita correspondência entre o regime hidrológico e os seus elementos. Para tanto, é preciso expressar, quantitativamente, todas as características de forma, de processos e de suas inter-relações. Cabe ressaltar que nenhum desses índices, isoladamente, deve ser entendido como capaz de simplificar a complexa dinâmica da bacia, a qual inclusive tem magnitude temporal.

3.11 MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição da velocidade em cada ponto de coleta foi realizada com auxílio de um molinete, devidamente calibrado de fábrica, onde a leitura da velocidade do fluxo medida é expressa diretamente em m/s.

Em um trabalho de campo, normalmente efetuar-se a tomada da medida, colocando-se o molinete em uma determinada seção do curso d'água, variando as posições, não só ao longo da seção, mas também ao longo da profundidade. Este procedimento é devido à velocidade da corrente de um fluxo fluvial, ser, normalmente, maior na parte central de um rio ou canal do que em suas margens (figura 11). Considerando essa variação da velocidade da corrente em diferentes pontos da seção transversal, devem-se obter medidas em diversos pontos tanto na superfície da seção transversal como em diversos níveis em cada seção vertical (figura 12).

Segundo Santos et al. (2001), a distância recomendada entre os pontos de uma seção transversal é calculado em função da largura do canal de drenagem principal, e o número de pontos recomendados a serem obtidos sobre cada seção vertical é determinado de acordo com a profundidade do canal drenagem principal (tabela 6 e 7).

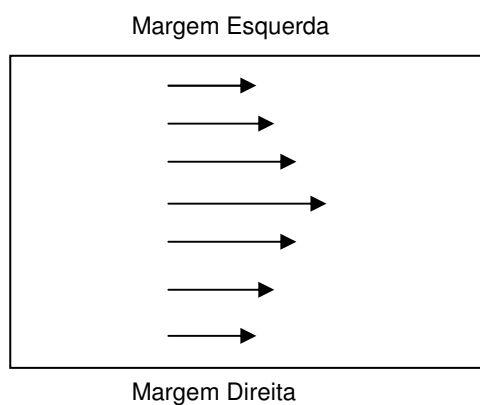


Figura 6. Esquema básico da variação do fluxo de água representado pelas setas, as quais indicam a direção e velocidade do fluxo na forma transversal ao canal.

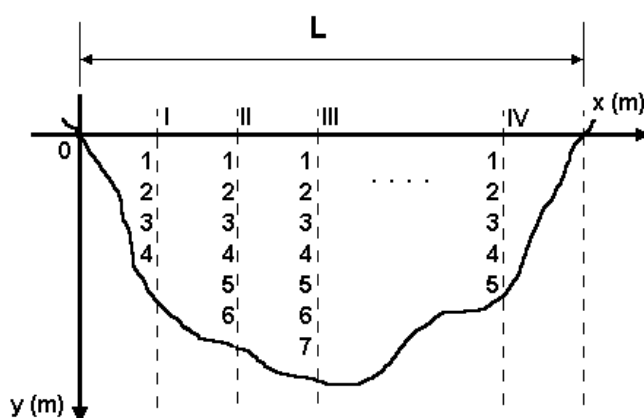


Figura 7. Distribuição dos pontos de medidas.

Tabela 4. Distância recomendada entre cada seção vertical, de acordo com a largura do canal drenagem principal.

Largura do canal (m)	Distância entre as seções verticais (m)
<3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1,0
15 a 30	2,0
30 a 50	3,0
50 a 80	4,0
80 a 150	6,0
150 a 250	8,0
> 250	12,0

Fonte: Santos et al (2001).

Tabela 5. Número e profundidade recomendada em cada seção vertical de acordo com a profundidade do rio. S=superfície do canal; F= fundo do canal; p=profundidade do canal.

Profundidade (m)	Número de Pontos	Profundidade dos Pontos
0,15 a 0,60	1	0,6p
0,61 a 1,20	2	0,2p e 0,8p
1,21 a 2,00	3	0,2p; 0,6p e 0,8p
2,01 a 4,00	4	0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p
> 4,01	6	S; 0,2p; 0,4p; 0,6p; 0,8p e F

Fonte: Santos et al. (op.cit.).

3.12 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta computacional (software) criada para armazenamento e manipulação de dados e informações espacialmente distribuídas em um computador. Mais do que um sistema de apresentação e processamento de dados, ele possui módulos para a realização de operações analíticas, sobreposição e cruzamento de informações. Possuindo um poderoso banco de dados, permite a associação de atributos e a realização de consultas, possibilitando a análise e modelagem de informações espacialmente distribuídas (FERRAZ, 1996).

De uma forma abrangente pode-se dizer que um SIG é composto de dos seguintes componentes: interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de consulta e análise espacial; visualização e plotagem; e, armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

4 ASPECTOS GERAIS DO RELEVO DE BELÉM

O relevo de Belém é constituído por uma topografia plana denominado de Planície Amazônica, que engloba: Pediplano Pliocênico, Pediplano Neo-Pleistocênico e Planície de Inundação (COSTA, 2001). A primeira forma de relevo está restrita às feições do topo da Unidade Barreira (cota 10-25m), enquanto a segunda modela-se

em terrenos da Cobertura Detrítica Pleistocênica (cota 5-15m) e a última representada pela Planície de Inundação que margeia os cursos d'água (cotas < 5m) (figura 6).

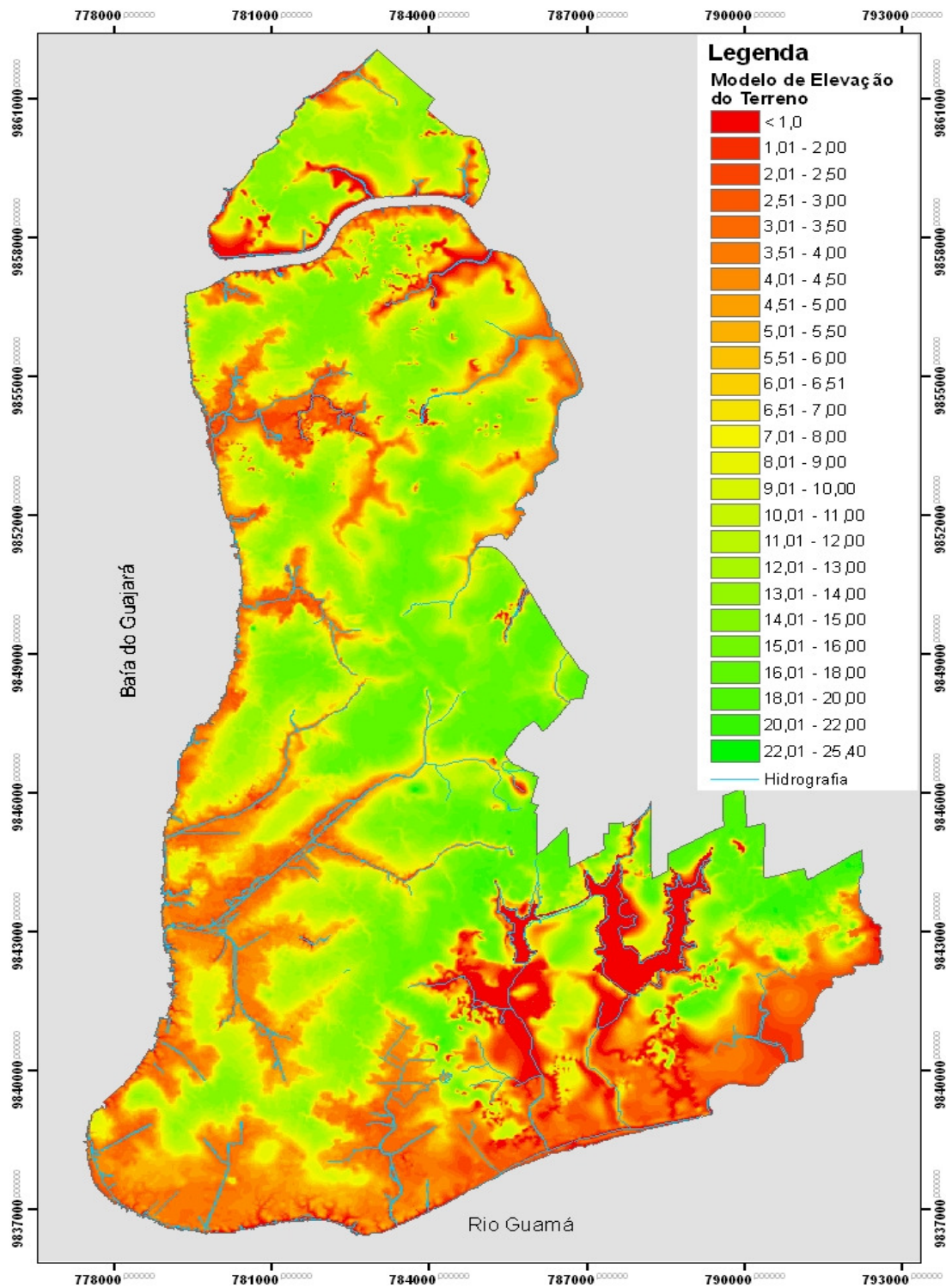


Figura 8. Modelo de elevação do terreno de Belém gerado através da interpolação de cotas altimétricas.

Fonte: (CODEM, 1998).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia definida para o estudo proposto compreendeu a avaliação de elementos físicos, incluindo os de caráter morfológico (topografia e drenagem), climatológico (distribuição da precipitação, temperatura do ar e direção do vento) e hidrológico, integrados a elementos sociais (estrutura e concentração da população, relacionadas à ocupação). Para a criação e interpretação dos mapas e modelo apresentados, foram utilizados dados meteorológicos horários, diários e mensais obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para período 1923 a 2009, dados horários de maré gerados pelo aplicativo WXTidde32 para as datas em que ocorreu o registro dos eventos extremos selecionados para análise, base cartográfica gerada pela Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM) a partir do voo aerofotogramétrico realizado em 1998, contendo os limites de bairros, quadras, edificações, eixo de ruas e cotas altimétricas; imagens de sensoriamento remoto coletadas por sensores do tipo MSS, TM (LANDSAT) e GEOEYE, coordenadas de GPS coletadas em campo, dados de vazão do canal obtidos a partir de levantamentos em *in loco* realizados em dois momentos distintos (mais chuvoso e menos chuvoso) durante um período que variou entre 5 a 8 horas, e fonte jornalística relacionada aos alagamentos e inundações na cidade.

A determinação do padrão climático de distribuição das precipitações no município de Belém, em escala anual, mensal e diária, foi utilizada de modo a categorizar totais extremos por um período superior a 30 anos, conforme recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM), para obter-se um parâmetro confiável de comparação entre os eventos registrados e o comportamento padrão do lugar.

Após executado o levantamento da distribuição da precipitação, foram determinados os principais eventos e suas datas de ocorrência, e realizada pesquisa nos jornais de circulação na época, para identificar os alagamentos e inundações e respectivos danos causados à população. Através da análise da distribuição desses episódios e áreas atingidas, é possível avaliar o impacto da expansão urbana sobre as zonas consideradas passíveis de inundação, e determinar como a impermeabilização do solo urbano de Belém, influenciou no aumento da incidência de alagamentos e inundações nas últimas décadas.

Para verificar o processo da expansão urbana na Região Metropolitana de Belém, assim como, o seu efeito sobre a temperatura de superfície, foi realizado uma análise multitemporal com base nas imagens do satélite Landsat MSS-2 e TM-5, órbitas-ponto 240-061 e 223-061, respectivamente, referente aos anos de 1979 e 2006. Na análise das imagens foi aplicado a correção geométrica utilizando o modelo polinomial 1º grau e o interpolador vizinho mais próximo, que teve como base as imagens Geocover, compostas de dados da série de satélites Landsat (MSS, TM e ETM+). O erro médio quadrático (RMS) da correção aplicada foi de 0.91 pixel, ou seja, menor que 30 metros. O processamento foi feito no software ENVI. O procedimento técnico utilizado para a interpretação das cenas do satélite Landsat foi o de classificação supervisionada e aplicado o classificador Máxima Verossimilhança - Iterated Conditional Modes (Maxver-ICM). Ao final do processamento foram extraídas três classes: vegetação, urbano/solo exposto e hidrografia.

Após a fase de pesquisa e coleta de dados, os arquivos digitais referentes à cartografia da área de estudo, foram sistematizados e convertidos para um mesmo sistema de projeção (UTM, zona 22 sul) e utilizado o SAD69 como datum de referência. Em sequência, os dados foram armazenados e organizados em diretórios específicos para facilitar o acesso através de um sistema de informação geográfica, e também customizado por meio de programação com base na linguagem de Avenue do aplicativo ArcView®, versão 3.3.

Para gerar o modelo digital de elevação do terreno (MDE) da área de estudo, foram utilizados os dados das cotas altimétricas disponibilizado pela CODEM, gerado no último vôo aerofotogramétrico executado no ano de 1998. Posteriormente, passou por uma série de testes de interpolação, aonde foi aplicada análise geoestatística por Krigagem Ordinária, incluída no aplicativo ArcGIS®/ArcToolbox, mais precisamente na extensão “Geostatistical Analyst”. O resultado foi comparado com as próprias cotas altimétricas.

A krigagem (Kriging) é um método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados. Pode ser entendido como uma predição linear ou uma forma da inferência bayesiana. Este método parte do princípio de que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. A técnica de Kriging assume que os dados recolhidos de uma

determinada população se encontram correlacionados no espaço (STURARO; LANDIM; RIEDEL, 2000). Considera-se o método de Kriging do tipo BLUE (Best Linear Unbiased Estimator - Melhor Estimador Linear não-Viciado) como sendo linear, pois suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados existentes, e consideradas nula a média dos erros do valor estimado em relação ao real. Teoricamente é a melhor porque os erros de estimativa apresentam baixa variância (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

A análise do comportamento do canal principal da bacia hidrográfica foi realizada a partir da determinação da sua vazão do canal e sua relação com o nível da maré no Rio Guamá, monitorados em campo. As campanhas de campo foram realizadas sob duas condições distintas: i) chuva intensa; 2) sem ocorrência de chuva intensa.

Como forma de entender as relações de vivência da população afetada direta ou indiretamente por esses eventos, foi realizada pesquisa de matérias jornalísticas a respeito de alagamentos e inundações ocorridos em Belém, sobretudo, aqueles relacionados com a precipitação concentrada em curto espaço de tempo e de precipitação intensa associada ao nível da maré alta. Esta pesquisa foi realizada na Biblioteca da Fundação Cultural do Pará Tancredo Neves (CENTUR).

Finalmente, objetivando gerar uma ferramenta de avaliação de risco, para o auxílio da tomada de decisão, foi aplicado um modelo matemático de células de escoamento para a bacia, onde se procurou estimar as cotas de inundações e as respectivas áreas de alagamento para uma precipitação real, considerando o cálculo do escoamento superficial e as condições de vazão do canal em relação ao nível da maré do Rio Guamá.

5.1 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do projeto está localizada no município de Belém, às margens do Rio Guamá, entre as coordenadas UTM Norte 778.842 e 781.525, UTM Este 9.839.587 e 9.836.473 (48° 29' 38" W e 48° 28' 11" W, 1° 27' 00" S e 1° 28' 40"), a uma altitude média de 6 m em relação ao nível do mar. A área de recorte para o desenvolvimento da modelo experimental de avaliação de risco de alagamento e inundação, contempla a bacia hidrográfica relacionada com os canais da Travessa 14 de Março, Rua Doutor Morais, Avenida Generalíssimo Deodoro, Rua Caripunas e

da Travessa Quintino Bocaiúva, que situam-se os bairros da Batista Campos, Jurunas, Cremação e Condor (figura 7).

5.2 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

O objetivo do estudo compreende a obtenção e análise das características morfométricas da bacia hidrográfica do canal da Trav. Quintino Bocaiúva, de forma a melhorar o entendimento do comportamento dos alagamentos e inundações que ocorrem nesta área. Desta forma, foi realizado o cálculo das características morfométricas contidas no quadro 1.

Quadro 1. Características morfométrica estudadas.

Características geométricas	
Área de drenagem	Fator de forma (F)
Perímetro	Coefficiente de compacidade (kc)
Características do relevo	
Orientação	Altitude mínima
Declividade mínima	Altitude média
Declividade média	Altitude máxima
Declividade máxima	
Características da rede de drenagem	
Comprimento do curso d'água principal	Densidade de drenagem (Dd)
Comprimento total dos cursos d'água	

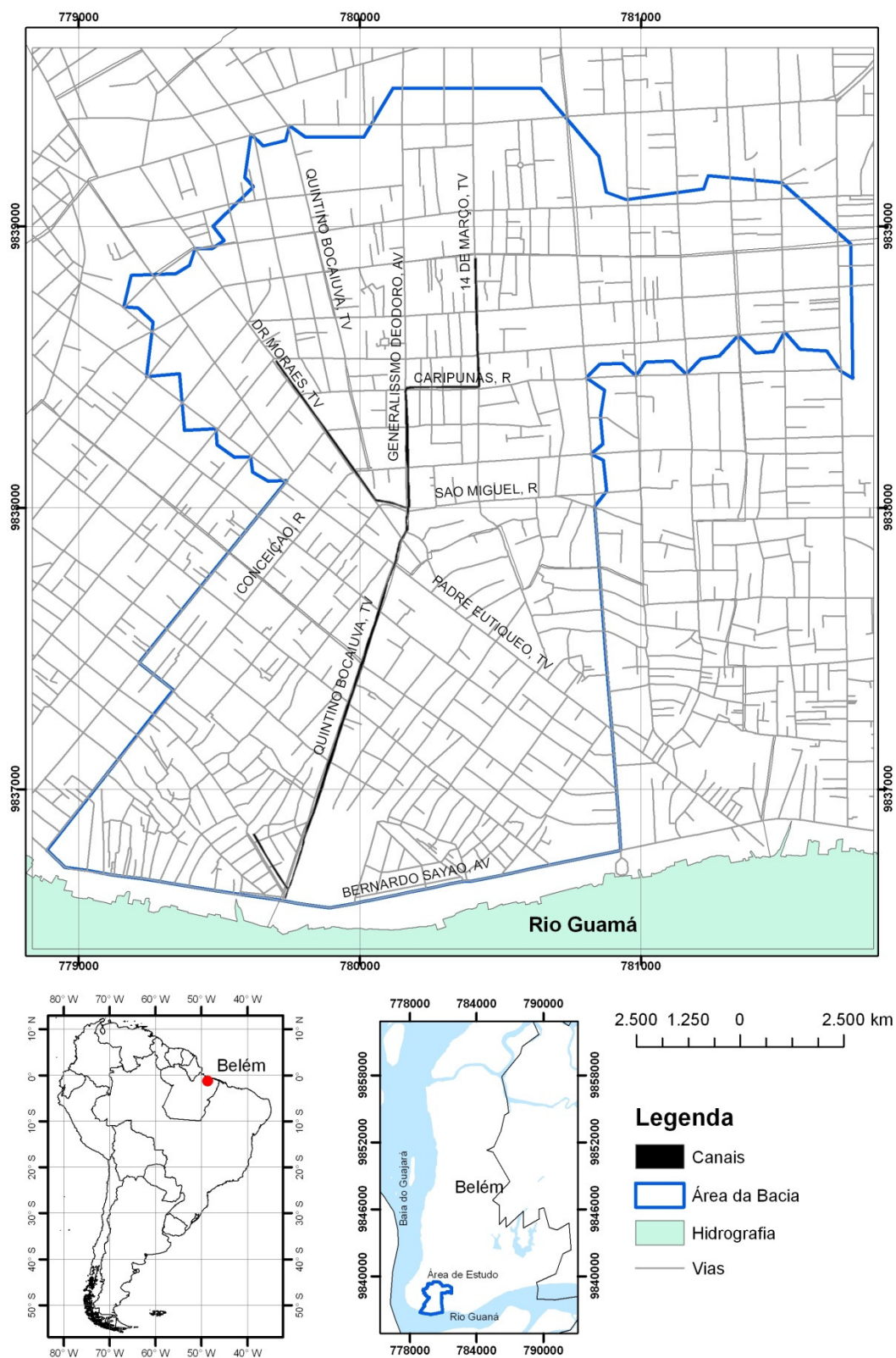


Figura 9. Mapa de localização da área de estudo deste trabalho.

5.2.1 Características geométricas

5.2.1.1 Área de drenagem e perímetro

Neste estudo, por se tratar de uma bacia urbana, a área foi delimitada a partir de dados fornecidos pela CODEM, sendo que, para a determinação dos divisores de água da bacia foram considerados não só as cotas altimétricas, como também, a rede de drenagem pluvial existente. Como suporte a esta informação, foi gerado um modelo digital de elevação do terreno com base nas cotas altimétricas extraídas de levantamentos de campo contratados pela CODEM, as quais foram submetidas a um processo de interpolação com auxílio de processamento computacional (ferramentas de geoprocessamento e de análise espacial do software ArcGis). O resultado desse processamento foi confrontado aos limites da bacia fornecido pela CODEM a fim avaliar e validar o mesmo.

A área total da bacia hidrográfica está relacionada ao comprimento do canal principal (Trav. Quintino Bocaiúva), que compreende a distância entre o ponto situado na parte mais elevada bacia e a sua saída. A determinação da área e perímetro é importante na composição do cálculo das demais variáveis, as quais influenciam no aumento ou diminuição do risco de alagamento e inundação na área do projeto.

5.2.1.2 Forma da bacia

A determinação da forma superficial de uma bacia hidrográfica é de grande importância para o cálculo do tempo em que toda a bacia leva para contribuir na seção em estudo, ou seja, tempo que leva a água contida na bacia para chegar à saída da mesma.

a) Fator de forma (F)

Inúmeros métodos de descrição da forma da bacia foram propostos, a de HORTON (1932) define que o fator de forma, seja determinado a partir da equação 1.

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

sendo:

F – fator de forma

A – área da bacia

L – comprimento do eixo da bacia (da foz ao ponto extremo mais longínquo no espigão).

O fator de forma é um elemento importante a ser avaliado. Ele indica a tendência a alagamento e inundação como exemplificado na figura 8-A, onde o escoamento direto de uma dada chuva na bacia (A) tem um tempo de concentração mais lento do que na bacia (B), devido ao fato de que as bacias de formas longas e estreitas, como a (A) são mais dificilmente atingidas integralmente por chuvas intensas (SCHWAB ET al.,1966). Isto significa dizer que, bacias de fator de forma maior têm mais chances de sofrer inundações do que bacias de fator de forma menor.

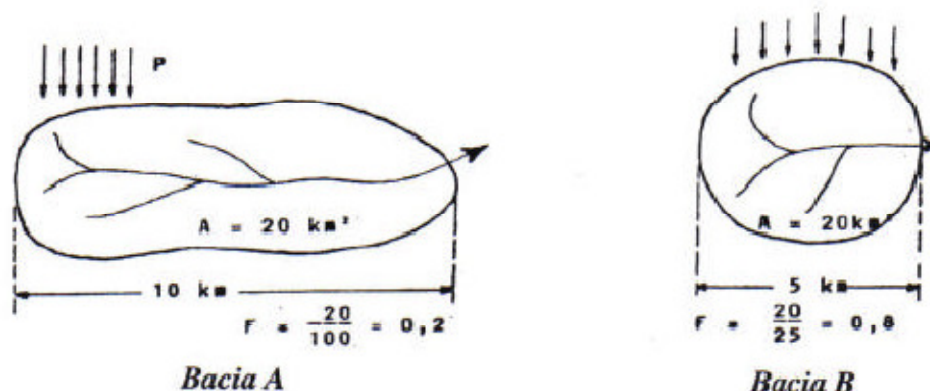


Figura 10. Exemplo comparativo entre formas de bacia hidrográfica.

b) Coeficiente de compactidade (Kc)

É definido pela relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. A determinação do Kc é feita pela equação 2, e quanto mais próximo for o coeficiente da unidade corresponde a uma bacia circular, ou seja, quanto mais próximo de um círculo uma bacia se assemelhar, maior será a sua capacidade de proporcionar grandes inundações.

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

sendo:

K_c = coeficiente de compacidade

P = perímetro da bacia

A = área da bacia

Assim, pode-se resumir a classificação da forma da bacia conforme a tabela 4.

Tabela 6. Classificação das formas de uma bacia.

Descrição da forma	Valor
Bacia com alta propensão a grandes inundações	1,00 – 1,25
Bacia com tendência mediana a grandes inundações	1,25 – 1,50
Bacia não sujeita a grandes inundações	> 1,50

5.2.1.3 Características do relevo

Para este estudo foi utilizado o modelo digital de elevação do terreno como base para a geração do mapa de declividade. As classes de declividades geradas foram reclassificadas conforme as recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados, do INSTITUTO GEOLÓGICO (1993) (quadro 2). Ainda com base no modelo digital de elevação do terreno foi gerado o mapa de orientação do terreno, sendo que a grade de exposição foi classificada em 8 classes conforme figura 9, e reclassificado de acordo com as faixas estabelecidas no quadro 3. Estas operações foram realizadas utilizando as ferramentas da extensão *Spatial Analyst* do ArcGIS® 9.1.

Quadro 2. Classes de declividade definidas em função das recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados.

CLASSES DE DECLIVIDADE	RECOMENDAÇÕES DE USO E RESTRIÇÕES E/OU PROBLEMAS ESPERADOS
<p><2%</p> <p>Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento.</p>	<p>-Favorável a implantação de aeroportos internacionais.</p> <p>-Favorável a atividade agrícola intensiva e ao uso de máquinas agrícolas.</p> <p>-Áreas impróprias às instalações de saneamento e canalizações subterrâneas de água.</p> <p>-Áreas sujeitas a inundação.</p>
<p>2-5%</p> <p>Terrenos com declividades suaves nos quais o escoamento superficial é lento ou médio e os problemas de erosão requerem práticas simples de conservação.</p>	<p>-Favorável ao uso agrícola mecanizado.</p> <p>-Favorável a implantação de aeroportos locais, rodovias e ferrovias principais.</p>
<p>5-10%</p> <p>Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial.</p>	<p>-Exige práticas simples de conservação, exceto no caso de utilização agrícola intensiva, onde medidas mais complexas devem ser adotadas.</p> <p>-Corresponde ao limite máximo para a implantação de saneamento, ferrovias e indústrias.</p> <p>-Favorável ao uso de máquinas agrícolas.</p>
<p>10-15%</p> <p>Terrenos muito inclinados ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam problemas de erosão superficial, exceto quando ocorrem solos permeáveis e pouco arenosos.</p>	<p>-Propício para o uso de máquinas agrícolas, ainda que com dificuldade.</p> <p>-Áreas recomendadas para culturas perenes, pastagens ou reflorestamentos.</p> <p>-Limite de vias principais e loteamentos perpendiculares às curvas de nível.</p> <p>-Limite máximo para a implantação de projeto de engenharia simples e pouco complexos.</p>

Fonte: (INSTITUTO GEOLÓGICO, 1993)

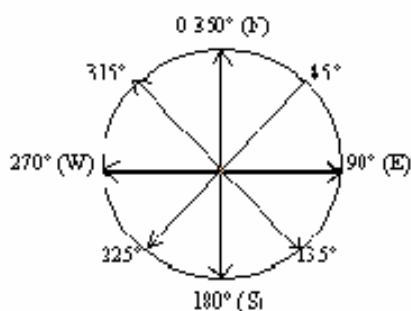


Figura 11. Representação das classes de exposição do terreno.

Fonte: (SANTOS, 2001).

Quadro 3. Classes de exposição do terreno.

Ordem	Exposição	Classes
1	N – NE	0° – 45°
2	NE – E	45° - 90°
3	E – SE	90° - 135°
4	SE – S	135° - 180°
5	S – SW	180° - 225°
6	SW – W	225° - 270°
7	W – NW	270° - 315°
8	NW – N	315° - 360°

Fonte: (SANTOS, 2001).

5.2.1.4 Características de rede de drenagem

c) Comprimento do curso d'água principal

O curso d'água principal da bacia é formado pelo canal da Travessa Quintino Bocaiúva que se inicia a partir da Travessa Dr. Moraes até a sua desembocadura que acontece no canal da Av. Bernardo Sayão (Figura 7).

d) Comprimento total dos cursos d'água

Além do canal principal, a bacia dispõe de mais 4 (quatro) canais de drenagem que são: da Travessa 14 de Março, da Rua dos Caripunas, da Av. Generalíssimo Deodoro e da Travessa Dr. Moraes (Figura 7).

e) Densidade de drenagem (Dd)

Este elemento expressa a relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia e a sua área total, determinado através da equação 3. Seu estudo indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da rede de drenagem. Conforme Sthraler (1957), as bacias segundo esse critério podem ser classificadas de baixa, média, alta ou muito alta conforme a tabela 5.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (3)$$

sendo:

Dd – Densidade de drenagem

L – comprimento total dos cursos d'água da bacia

A – Área da bacia

Tabela 7. Classificação das bacias quanto à densidade de drenagem.

Classe	Faixa (km/km²)
Baixa	≤ 5
Média	5 - 13,5
Alta	13,5 – 115,5
Muito alta	$> 115,5$

Fonte: (STHRALER, 1957).

5.3 MEDIÇÃO HIDROLÓGICA

5.3.1 Medição de vazão e nível do canal

As medições de campo foram programadas para acontecer em duas etapas, uma primeira realizada durante o período mais chuvoso, objetivando avaliar o comportamento da vazão, o tempo de concentração da bacia e o nível do canal em condições que a maré do Rio Guamá estivesse ascendendo até atingir sua cota máxima (preamar), e o posteriormente, até uma cota inferior a do nível do canal. Esta primeira medição aconteceu no dia 27/04/09 e a coleta dos dados ocorreu durante um tempo de aproximadamente 7 (sete) horas contínuas de observações. A coleta dos dados teve início às 11:00 h e término às 18:00 h.

A segunda etapa de campo foi programada para ser realizada durante o período menos chuvoso, escolhida uma data em que as condições do nível da maré fossem a mais semelhante possível ao da primeira etapa, a fim de avaliar o comportamento hidrológico do canal sob influência exclusiva do nível da maré do Rio Guamá. A data selecionada foi o dia 22/08/09, e a coleta dos dados ocorreu durante um tempo aproximado de 8 (oito) horas contínuas de observações, tendo início às 10:00 h e término às 17:00 h.

O registro da velocidade do fluxo fluvial do canal para a determinação da vazão foi realizado no canal da Quintino Bocaiúva, em um ponto selecionado o mais próximo de seu exutório, onde fosse possível obter uma seção transversal que oferecesse as melhores condições para efetuar as medições necessárias (figura 10).



Figura 12. Local da seção transversal definida para realização das medições, localizado na Trav. Quintino Bocaiúva próximo a Pass. Carlos de Carvalho.

5.3.2 Morfologia, vertical da seção e vertical da seção molhada do canal

Anteriormente a coleta da velocidade do fluxo fluvial do canal, foi estabelecido procedimentos para o mapeamento da morfologia do fundo do canal da seção transversal, a fim de determinar as distâncias entre os perfis verticais e suas respectivas profundidades.

Primeiramente, definiu-se que a margem direita e esquerda da seção seriam os pontos mais extremos da borda do canal que estivesse no mesmo nível das ruas laterais que margeiam o mesmo. A medida da largura da seção do canal foi realizada com o uso de fita métrica (trena) obtendo-se um valor de 13,5 metros entre uma margem e outra.

5.3.3 Vazão do canal

Neste trabalho, a metodologia aplicada para o cálculo da vazão do canal foi à utilização de um molinete, que consiste num aparelho que possui uma hélice a qual converte o movimento de translação do fluxo de água em um movimento de rotação da hélice, que com o auxílio de um contador é determinado num intervalo de tempo o número de voltas que a hélice realizou. Após saber o número de voltas num dado intervalo de tempo, é determinado a velocidade do fluxo com a equação do molinete (4).

$$v = a + b \times n \quad (4)$$

Onde a velocidade, v , é dada em (m/s), o número de rotações da hélice, n , em (rps). As constantes a e b são obtidas através da calibração do molinete. Um molinete bem calibrado em laboratório especializado pode atingir um erro máximo de $\pm 1\%$, (ABNT NB 288, 1974). O molinete utilizado no trabalho de campo já disponibiliza os dados coletados em m^3/s , tendo sido calibrado de fábrica. Este método de medida de vazão através de molinete é bastante utilizado devido a sua versatilidade e precisão.

Devido às condições de excesso de lixo tanto na superfície do canal quanto na camada abaixo, dificultando a coleta dos dados, ficou estabelecido que as medições fossem realizadas em uma única profundidade de cada sub-seção transversal, há 60% da profundidade da secção molhada.

O cálculo da vazão de cada perfil vertical da secção molhada foi obtido a partir da equação (5).

$$Q_{pi} = \frac{V_{pi}}{A_{pi}} \quad (5)$$

Onde:

Q_{pi} é a vazão principal do perfil considerado;

V_{pi} é a velocidade média do perfil considerado;

A_{pi} é a área de abrangência da velocidade média para o perfil considerado.

Conhecendo-se a vazão parcial de cada perfil vertical (Q_{pi}) da seção transversal do canal, foi calculado a Vazão Total (Q_t) para o perfil transversal através da equação (6).

$$Q_t = \sum_i^n Q_{pi} \quad (6)$$

Onde:

Q_t é a vazão total da seção transversal do canal;

Q_{pi} é a vazão parcial da subseção da vertical “i”;

i é o perfil vertical considerado

5.3.4 Elementos geométricos da seção

Os elementos geométricos de uma seção foram calculados com base nos dados de profundidade do canal, tanto em relação à seção transversal quanto da seção molha, e aplicados a equação (7). São eles: Área da seção molhada – área da seção reta do escoamento, normal à direção do fluxo; Profundidade – distância medida na vertical, do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre; e o Perímetro molhado – comprimento da linha de contato entre a seção molhada e a seção transversal,.

$$A = \left(\frac{B_1+b_1}{2}\right) \times h_1 + \left(\frac{B_2+b_2}{2}\right) \times h_2 + \dots + \left(\frac{B_n+b_n}{2}\right) \times h_n \quad (7)$$

Onde:

A - área da seção

B - altura do perfil vertical

h - distância entre os pontos sobre o perfil da seção transversal.

5.3.5 Medição do nível de água no canal

Para a modelagem de inundação proposta neste trabalho, é necessário conhecer e avaliar o comportamento do nível d'água no canal principal da bacia, sob influência de dois fatores importantes: o primeiro diz respeito ao nível da maré do Rio Guamá durante um determinado período do processo de enchente e vazante; e o segundo, relacionado com o comportamento do canal diante a ocorrência de uma precipitação.

Com este propósito, foi instalada uma régua linimétrica graduada com variações de centímetros, localizada na secção do canal, em posição vertical, fixada a uma estrutura de apoio suficientemente sólida e estável da passarela existente sobre o canal. O "zero" da régua ficou abaixo do nível mínimo que poderia chegar a água do canal, a fim de se evitarem leituras negativas.

A cota altimétrica do "zero" da escala foi determinada posteriormente por transporte topográfico de um ponto de referencia de nível (RN) instalado pela CODEM, de cota igual a 3,65 m, localizado nas proximidades da área da secção do canal. As leituras do nível da régua foram realizadas a cada intervalo de 15 minutos.

A morfologia do fundo do canal, a vertical da secção e a vertical da secção molhada foram obtidas com base na medição da profundidade realizadas a cada 0,5 m de distancia a partir de uma margem a outra, através do uso de uma régua centimétrica.

A compatibilização entre os níveis de referências (nível médio do mar e zero hidrográfico), utilizados respectivamente para a determinação de cotas topográficas do terreno e dos níveis de marés, é um aspecto determinante para o desenvolvimento de um modelo capaz de simular o processo de inundação na área da bacia deste trabalho.

O comportamento da maré do Rio Guamá referente às datas definidas para a realização do trabalho de campo foi obtido através da aplicação do software WXTide32, disponibilizado no site <http://www.wxtide32.com> (figura 13), o qual foi devidamente calibrado em relação às variações das marés do Rio Guamá, e comparado com os dados da tábua de maré calculados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil, e disponibilizados no site <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm>.

Os níveis de maré foram gerados para intervalos de tempo de 15 minutos, visando coincidir com os mesmos intervalos programados para a leitura da régua instalada no canal.

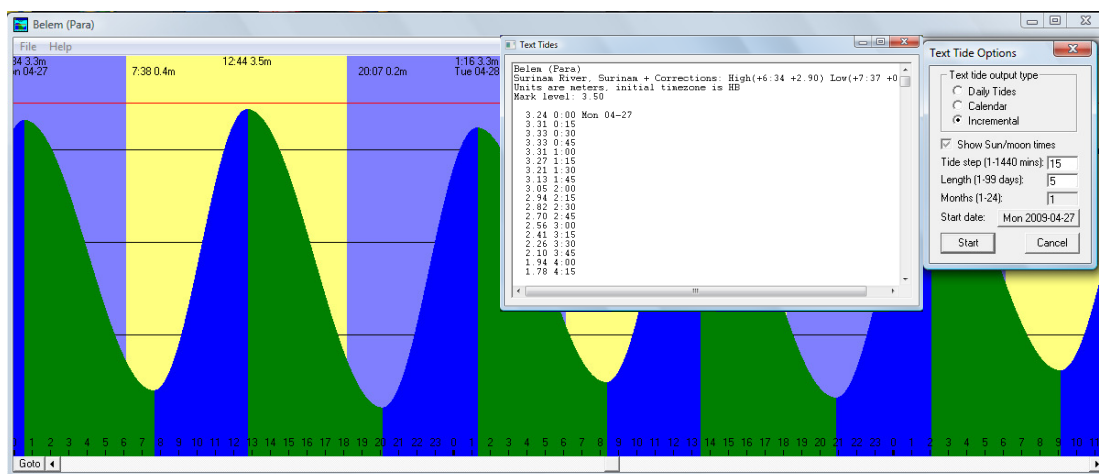


Figura 13. Interface de visualização do software wxTide32.

5.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

As bacias em áreas urbanas, de rios naturais ou canalizados, em áreas de topografia plana, têm potencial para formar grandes áreas alagáveis. Ao sair da rede de drenagem, o caminho da água pode ser qualquer um, sendo ditado pelos padrões de urbanização. Calçadas marginais tornam-se vertedouros para os rios, cujas águas extravasadas ao chegarem às ruas fazem destas verdadeiros canais, podendo alagar residências, que então passam a funcionar como reservatórios, concentrando águas que em geral não retornarão à rede de drenagem.

Nessa situação, as águas extravasadas podem ter comportamento independente da rede de drenagem, gerando seus próprios padrões de escoamento, especialmente, quando o sistema de drenagem não corresponde a sua função. Em um caso extremo, em que a drenagem não funcione, por falhas de manutenção e entupimentos por resíduos diversos e muito comumente por lixo, por exemplo, ou onde ela estiver sub-dimensionada, alagamentos em áreas urbanas poderão ocorrer, gerando também um padrão de escoamento particular e distinto daquele dos canais.

Para o desenvolvimento de um modelo capaz de simular previsões de curto prazo para alagamento e inundação urbana, é necessário desenvolver modelos automáticos que sejam capazes de contemplar a maioria dos comportamentos das diferentes fases do ciclo hidrológico, ou seja, conhecer, por exemplo, como se comporta a

pluviometria, a capacidade de infiltração da água no solo, a vazão dos canais de drenagem durante a ocorrência do evento, tudo isto, referente à área da bacia hidrográfica. A integração dessas variáveis e as relações existentes entre elas durante um processo de alagamento e inundação requerem para simulação de um evento o uso de ferramentas computacionais para adquirir, armazenar e processar os dados necessários e disponíveis.

Nesse contexto, existem condições para o uso de um modelo matemático de características sistêmicas, capaz de representar a hidrologia, de forma distribuída, na superfície da bacia. A representação do espaço urbano através de células, as quais atuam como compartimentos homogêneos que integram o espaço da bacia e interagem com o escoamento que sobre ela ocorre, permite atender aos objetivos da modelação matemática das enchentes urbanas.

Considerando o processo de urbanização de Belém, e das relações existentes entre os eventos pluviométricos, fluviométricos e as inundações e alagamentos, foi criado um modelo experimental de gerenciamento de risco de alagamento e inundação com base nos dados do meio físico e uso de ferramentas de geotecnologia, tais como: geoprocessamento, sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto.

O modelo que foi desenvolvido consiste em realizar a simulação em ambiente computacional dos eventos naturais que influenciam as inundações. Desta maneira, é de grande importância o entendimento das componentes do balanço de água que ocorrem na sub-bacia hidrográfica: precipitação, infiltração, capacidade de armazenamento de água no solo, evaporação/evapotranspiração e o escoamento superficial (figura 14).

A discretização temporal da equação 8 representativa da conservação da massa, é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, simplificando o modelo numérico chuva-vazão.

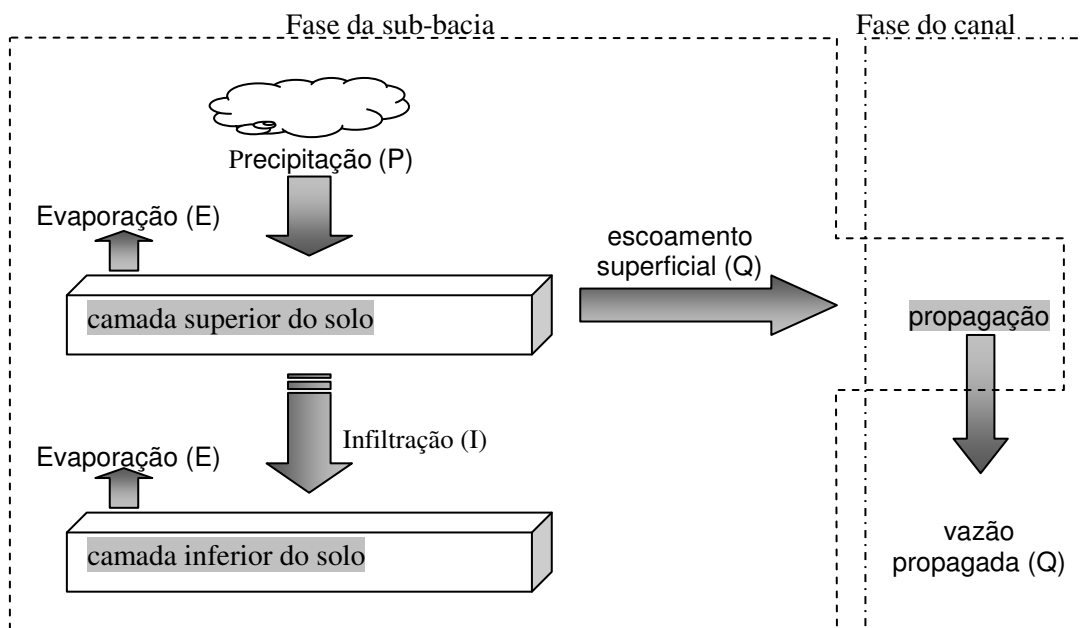


Figura 14. Representação do modelo de balanço de água.

$$P = E + I + Q \quad (8)$$

onde:

P = Precipitação

E = Evaporação/Evapotranspiração

I = Infiltração /Armazenamento de água no solo

Q = Escoamento superficial

Primeiramente foram discretizadas as equações que representam os fenômenos hidrológicos em um ambiente SIG, de maneira a trabalhar espacialmente, possibilitando a divisão da sub-bacia em células e o cálculo de parâmetros hidrológicos para cada uma destas, que posteriormente foram reintegradas. Os resultados obtidos neste tipo de processo são muito mais precisos que os realizados por métodos hidrológicos convencionais.

A formulação do processo de transformação da chuva em vazão no modelo que será desenvolvido consiste na representação dos seguintes fenômenos:

Precipitação

Nas áreas urbanas a principal causa das inundações das ruas são as chuvas de grande intensidade, que não são devidamente escoadas em função de deficiência nos projetos de drenagem. Dessa maneira, problemas surgem quando a precipitação ocorre em situações extremas de intensidade, maior freqüência, ou quando as precipitações são excessivamente longas. Por conseguinte, a determinação da intensidade da precipitação devido seu potencial para produzir escoamento, é importante para o controle de inundação.

As principais características da precipitação são o seu total, duração e distribuição temporal e espacial. O total precipitado não tem significado se não estiver ligado a uma duração. Por exemplo, 100 mm pode ser pouco em um mês, mas é muito em um dia ou, ainda mais, numa hora. No entanto, a ocorrência da precipitação é um processo aleatório que não permite previsão determinística com grande antecedência.

Do total de chuva precipitada apenas uma parte gera escoamento superficial, esta parte é denominada de Precipitação Efetiva.

A precipitação efetiva corresponde à diferença entre o total precipitado e as parcelas relativas aos volumes evaporados e retidos ou infiltrados (equação 9).

$$Pf = P - E - I \quad (9)$$

onde:

Pf = Precipitação efetiva

P = Precipitação

E – Evaporação

I – Infiltração

Substituindo a equação (9) na (8), conclui-se que a variação do escoamento superficial da sub-bacia será igual à variação da precipitação efetiva (equação 10).

$$Q = Pf \quad (10)$$

Evaporação

Os métodos mais utilizados para determinar a evaporação são: Transferência de massa; Balanço de energia; Equações empíricas; Balanço hídrico; e, Evaporímetros.

Para a modelagem pretendida, a evaporação não terá papel importante no cálculo do balanço de água na sub-bacia durante a ocorrência de uma precipitação intensa. De certa forma, a influência deste fenômeno em parte estará sendo absorvida pelo amortecimento da chuva calculado no coeficiente de deflúvio.

Infiltração

A Infiltração é definida como sendo o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através de vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte que a retém, formando então a água do solo (Pinto et. al., 1976). Este fenômeno depende da quantidade de água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior. Conforme a água infiltra pela superfície, a camada superior do solo vai umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade.

Enquanto existir aporte de água ao solo, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Quando o aporte de água à superfície cessa, isto é, deixa de haver infiltração, a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inversa, com menores teores de umidade próxima à superfície e maiores nas camadas mais profundas. Observa-se na figura 15 a evolução do perfil de umidade em um solo. Nem toda a umidade é drenada para as camadas mais profundas do solo, já que parte é transferida para a atmosfera por evaporação.

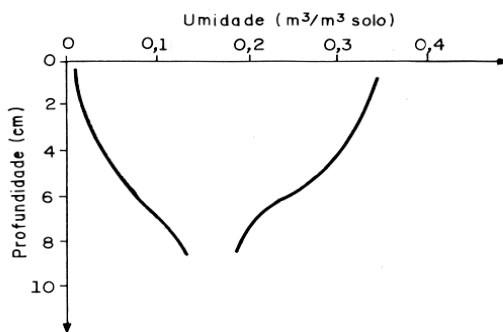


Figura 15. Perfil de umidade em um solo.

(Fonte: TUCCI, 2001).

Quando uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, já que o solo está se umedecendo. À medida que a precipitação continua a capacidade de infiltração do solo passa a decrescer a ponto da parcela que não é mais infiltrada escoar superficialmente (figura 16).

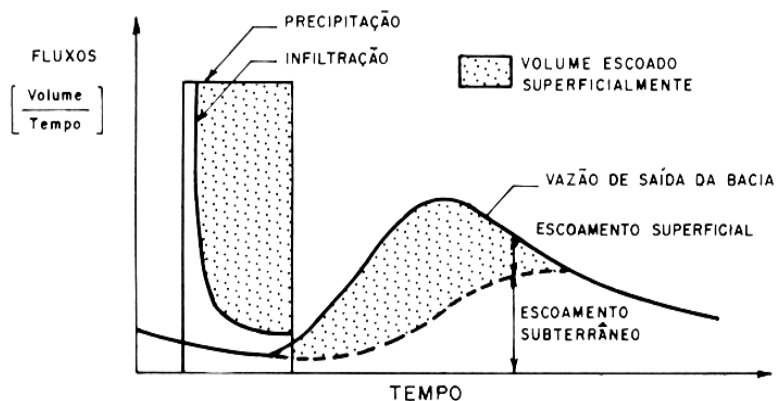


Figura 16. Resposta hidrológica da bacia hidrográfica.

Fonte: TUCCI, 2001).

Escoamento Superficial

O escoamento superficial sofre influência de diversos fatores que aumentam ou diminuem a sua ocorrência. Os fatores considerados nesta modelagem são: intensidade da precipitação, vazão do canal principal de drenagem, topografia do terreno, nível do Rio Guamá e as características do uso e ocupação do solo (tipo de moradia, construção e número de pavimentos).

Existem vários métodos para estimativa do escoamento superficial, entre eles dois são mais utilizados: Método Racional e o do Hidrograma Unitário.

Para efeito desse trabalho será trabalhado um método misto envolvendo parte dos cálculos dos dois métodos citados acima, onde no estudo da determinação da vazão de pico será utilizado a equação definida pelo método racional, devido as características da bacia que são: precipitação sobre toda a bacia e na duração da chuva; intensidade de chuva constante; coeficiente de escoamento superficial constante; e, a vazão máxima só ocorre quando toda a bacia estiver contribuindo. Este método se baseia na equação 11 que corresponde ao coeficiente de escoamento superficial.

$$q_p = 0,278 \times C \times I \times A \quad (11)$$

onde:

q_p – Vazão de pico (m^3/s)

C – Coeficiente de escoamento superficial

I – Intensidade máxima média de precipitação (mm/h) para uma duração t (mm/h);

A – Área da bacia (km^2)

O Coeficiente de deflúvio (C), ou coeficiente de escoamento superficial, ou coeficiente runoff é definido como a razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado (equação 12). Este coeficiente pode ser relativo a uma chuva isolada ou relativo a um intervalo de tempo onde várias chuvas ocorreram. Para efeito de aplicação no modelo o coeficiente de escoamento superficial foi calculado a partir da equação 13 de Horner (*apud*: PINTO et al., 1975). A escolha da equação é devido o fato de que a bacia será dividida em células de tamanho compatíveis ao detalhamento dos dados referente a situação atual de uso e ocupação do solo, o que permite uma melhor acurácia no cálculo desse coeficiente.

$$C = \frac{V_{esc}}{V_{prec}} \quad (12)$$

$$c = 0,364 \times \log(t_{ch}) + 0,0042 \times p - 0,145 \quad (13)$$

onde:

t_{ch} – Tempo de duração da chuva em minuto;

p – Percentagem impermeabilizada da área.

Para a quantificação do escoamento superficial, será aplicado o método do hidrograma unitário instantâneo (HUI), representado pela equação 14, desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS, 1957), onde o hidrograma unitário é considerado um triângulo (figura 17).

A área do triângulo corresponde ao volume do escoamento superficial, ou seja:

$$V_{escoado} = \frac{q_p \cdot t'_p}{2} + \frac{q_p \cdot t_e}{2}$$

Sendo $t_b = t'_p + t_e$, então a equação acima fica:

$$V_{escoado} = q_p \cdot \frac{t_b}{2} \quad (14)$$

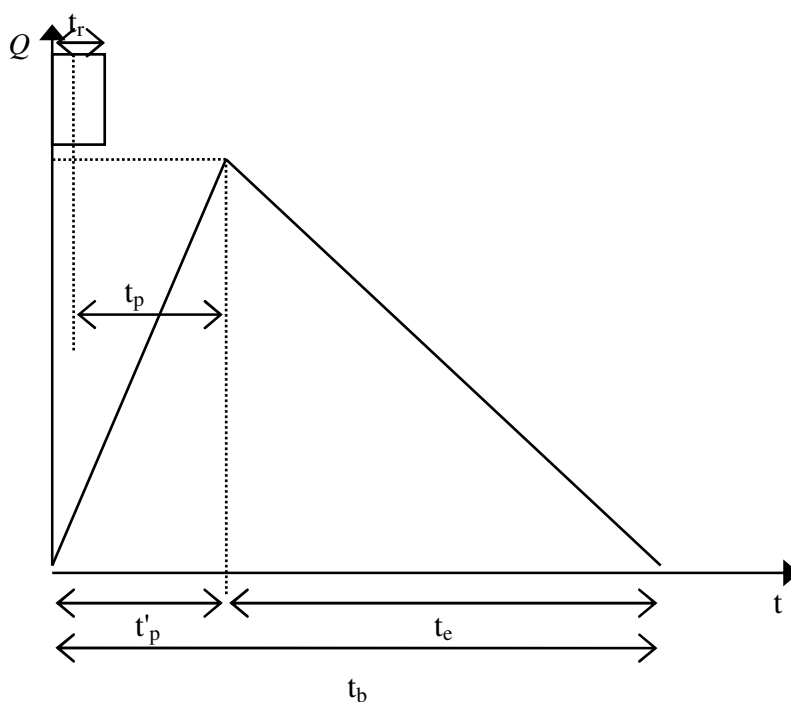


Figura 17. Hidrograma triangular SCS.

Fonte: (Soil Conservation Service, 2008).

onde:

q_p = pico da vazão máxima;

t_r = tempo de duração da chuva;

t_p = tempo de pico da vazão contado do tempo de pico da chuva;

t'_p = tempo de pico da vazão contado do início da precipitação;

t_e = tempo de recessão, é o tempo necessário para a vazão baixar até sua condição normal;

t_b – tempo de base do hidrograma.

Tempo de concentração (t_c) - é definido como o tempo necessário para uma partícula de água escoar do ponto mais distante da bacia para a seção exutório, também é definido como o intervalo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (final do escoamento superficial). O cálculo de t_c será com base na fórmula do Califórnia Culvert Practice (equação 15).

$$t_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad (15)$$

onde:

t_c – Tempo de Concentração em minutos;

L – Comprimento do talvegue em km;

H – Diferença de nível entre o ponto mais afastado da bacia e o ponto considerado, em metros.

A equação acima traduz a concepção básica de que a máxima vazão, provocada por uma chuva de intensidade uniforme, ocorre quando todas as partes da bacia passam a contribuir para a seção de drenagem. O tempo necessário para que isto aconteça, medido a partir do início da chuva, é o que se denomina de tempo de concentração da bacia. O tempo de duração da chuva deve ser igual ao tempo de concentração da bacia, ou seja, ao tempo necessário para que toda área de drenagem passe a contribuir para a vazão na seção estudada.

Tempo do pico (t_p) - é definido como o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo de pico e será calculado com base na equação 16.

$$t_p = 0,5 \times t_r + 0,6 \times t_c \text{ (hora)} \quad (16)$$

Tempo de duração da chuva (t_r) - Teoricamente deveria se determinar, para cada bacia hidrográfica, uma série unitária de hidrográficas, uma para cada duração de chuva. Na prática, entretanto costuma-se estabelecer o hidrograma unitário para uma duração t_r compreendida entre 1/4 e 1/5 do tempo de concentração t_c , expresso em hora (WILKEN, 1978).

Tempo de base (t_b) - é o tempo entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da secção principal, ou seja, aquele em que o canal já voltou a sua condição anterior ao da precipitação. O t_b será calculado com base na equação 17.

$$t_b = 2,67 \times t_p \text{ (hora)} \quad (17)$$

5.5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O sistema de avaliação de risco de alagamento e inundação que será desenvolvido para rodar o modelo hidrológico consiste na integração dos modelos de elevação digital do terreno, chuva vazão, vazão da chuva através do canal e emissão de boletins de alertas. Estes vários ambientes serão integrados e testados através de uma simulação em ambiente computacional, tendo como base o uso e aplicação de um SIG, capaz de realizar a manipulação e análise dos dados geográficos e informações espacialmente distribuídas. O objetivo principal do uso dessa ferramenta é a determinação de parâmetros hidrológicos por meio da análise topográfica do terreno, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) que contemple as variáveis mais importantes para este tipo de estudo como, por exemplo, a elevação do terreno e o tipo de uso do solo.

O crescente desenvolvimento tecnológico tanto na área de SIG quanto de hardware, possibilitou aumentar a capacidade de manipulação de grandes bases de dados e descrever detalhadamente características espaciais da superfície da terra. Os dados manipulados em uma plataforma SIG, podem ser expresso em formato raster

(matricial) ou vetorial, permitindo o armazenamento das características da superfície da terra com valores de parâmetros digitais em elementos de “grid” quadrados.

A área da bacia do projeto em estudo foi dividida em células quadradas com tamanho específico (grid), e um valor único representa a característica dos elementos mais importantes que irão compor o modelo hidrológico que se pretende representar. O grid será gerado através de ferramenta específica usualmente encontrado nos software de geoprocessamento.

A escolha do tamanho da célula apropriada para as simulações do modelo hidrológico terá que buscar o equilíbrio entre precisão, disponibilidade de dados e esforço computacional, assim como, deve também ser considerada a precisão dos dados usados para calibração e verificação. Tamanhos de “grid” menores são geralmente utilizados quando a variabilidade espacial dos parâmetros relevantes é conhecida em detalhes.

Cada célula foi identificada por uma linha i , coluna j e atributo z , onde a linha e a coluna correspondem a posição geográfica da célula em relação a superfície terrestre e o atributo z refere-se à característica da base de dados da bacia que está sendo representada. Caso o atributo z represente uma área fora da bacia o seu valor será considerado igual a 0.

Para efeito de preparação da base de dados que foi utilizada no modelo de gerenciamento de risco de alagamento e inundação, a bacia foi discretizada em células de 5 m x 5 m (25 m²), totalizando 188.876 células (figura 18). A definição do tamanho das células foi feita em razão da precisão dos dados utilizados e do esforço computacional para o processamento dos mesmos. O tamanho da célula utilizada é compatível com a escala do trabalho, e permite avaliar a variabilidade espacial dos parâmetros relevantes.

Cada célula recebeu um identificador único e cada coluna contém o atributo correspondente as variáveis utilizadas na modelagem hidrológica conforme mostrado na figura 19.

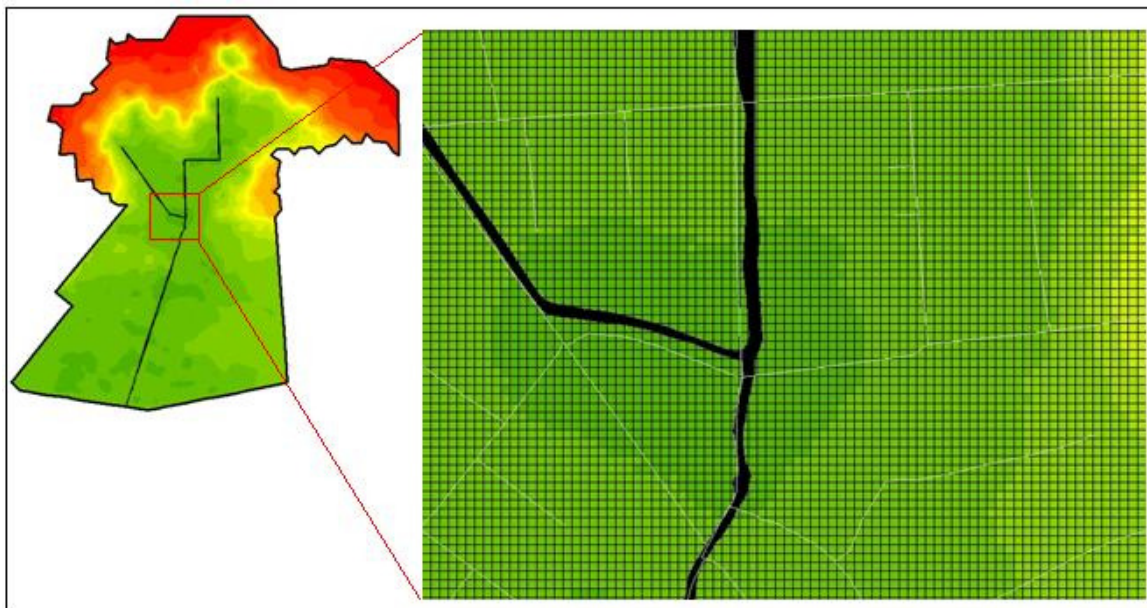


Figura 18. Representação da divisão da bacia para aplicação do modelo.

Attributes of GRID_5m									
FID	Shape	IUMMER	AREA CEL M	AREA CEL K	ELEVACAO	AREA IMP M	PER IMPR	C DEFLUV	
56	Polygon	17683	13,8	0,000014	13,77	5,43	39,35	0,68	
57	Polygon	17684	13,7	0,000014	13,68	13,7	100	0,935	
58	Polygon	17685	13,61	0,000014	13,6	13,61	100	0,935	
59	Polygon	17686	13,51	0,000014	13,57	6,32	46,78	0,711	
60	Polygon	17687	13,42	0,000013	13,56	13,42	100	0,935	
61	Polygon	17688	13,32	0,000013	13,56	13,32	100	0,935	
62	Polygon	17689	13,23	0,000013	13,59	13,23	100	0,935	
63	Polygon	17690	13,13	0,000013	13,61	13,13	100	0,935	
64	Polygon	17691	13,04	0,000013	13,64	13,04	100	0,935	
65	Polygon	17692	12,94	0,000013	13,67	12,94	100	0,935	
66	Polygon	17693	12,84	0,000013	13,67	12,84	100	0,935	
67	Polygon	17694	12,75	0,000013	13,68	12,75	100	0,935	
68	Polygon	17695	12,65	0,000013	13,67	12,65	100	0,935	
69	Polygon	17696	12,56	0,000013	13,67	12,56	100	0,935	
70	Polygon	17697	12,46	0,000012	13,66	12,46	100	0,935	
71	Polygon	17698	12,37	0,000012	13,66	0	0	0,515	
72	Polygon	17699	12,27	0,000012	13,66	12,27	100	0,935	
73	Polygon	17700	12,18	0,000012	13,6	12,18	100	0,935	
74	Polygon	17701	12,08	0,000012	13,58	12,08	100	0,935	
75	Polygon	17702	11,99	0,000012	13,56	0	0	0,515	
76	Polygon	17703	11,89	0,000012	13,52	0	0	0,515	
77	Polygon	17704	11,8	0,000012	13,48	11,8	100	0,935	
78	Polygon	17705	11,7	0,000012	13,45	11,7	100	0,935	
79	Polygon	17706	11,61	0,000012	13,43	11,61	100	0,935	
80	Polygon	17707	11,51	0,000012	13,4	11,51	100	0,935	
81	Polygon	17708	11,42	0,000011	13,38	0	0	0,515	
82	Polygon	17709	11,32	0,000011	13,39	0	0	0,515	
83	Polygon	17710	11,23	0,000011	13,38	11,23	100	0,935	
84	Polygon	17711	11,13	0,000011	13,38	11,13	100	0,935	

Figura 19. Tabela de atributos do dado espacial (grid) que contém os campos necessários para a execução do modelo hidrológico.

O uso de um SIG é indispensável para a preparação dos dados de entrada onde boa parte do processamento foi executado. Entre as rotinas necessárias de entrada, processamento e cálculo dos dados, foi desenvolvido uma interface escrita na linguagem de programação Avenue dentro do próprio ambiente do software ArcView[®] 3.3, capaz de aplicar as equações do modelo hidrológico e definidas para o cálculo do escoamento superficial, da vazão do canal principal de drenagem da bacia, do volume de água resultante da precipitação, e da cota de alagamento e inundação para a bacia hidrográfica, além de uma posterior identificação e seleção das áreas atingidas.

5.6 PLATAFORMA DE TRABALHO E BASE DE DADOS

O processamento dos dados foi realizado em um microcomputador processador AMD Turion™ X2 Dual-Core, HD de 160 Gb, memória RAM de 2 GB.

A Base de dados utilizada da CODEM – Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém, foi toda consistida e convertida do formato **Computer-Aided Design (CAD)** para o **Shapefile (SHP)** do software ArcGis® e posteriormente convertida do sistema de projeção cartográfica Local Transverso de Mercator (LTM) para o Universal Transverso de Mercator (UTM). Na conversão foi utilizado o datum do Sistema de Coordenada Geodésico Brasileiro SAD69, zona 22 sul.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ASPECTOS CLIMÁTICOS DE BELÉM

6.1.1 Precipitação anual e sua variabilidade

Os totais anuais dos dados de pluviometria da série histórica de Belém, relativo ao período de 1923 a 2009 da estação meteorológica do INMET localizada na CEASA, revelam a ocorrência de mínima de 2.185,5 mm registrada no ano de 1958 (menos chuvoso) e de uma máxima 3786,9 mm ocorrida no ano de 1989 (mais chuvoso), entretanto, de um modo geral as diferenças não são tão evidentes. Observa-se uma regularidade da precipitação anual ao longo dos anos com pequeno aumento na década de 70 e 80 em relação às demais décadas conforme pode ser visualizado na figura 20.

Na análise da pluviometria a partir do agrupamento dos dados por década, observa-se que às décadas de 30, 50 e 60 foram as que registraram as menores médias anuais de precipitação, sendo que, as décadas de 70, 80, 90 e 2000 registraram as maiores médias anuais (tabela 8).

Tomando como base o período de 1923/30, observa-se que as médias decenais da precipitação total anual registraram um incremento percentual de 2,5% para o período de 1941/50, 5,2% para o período de 1971/80, de 8,4% para o período de

1981/90, de 6,2% para o período de 1991/00 e de 13,1% para o período de 2001/07. Para os demais períodos ocorreu uma redução (tabela 8). Entretanto, a frequência média de dias de precipitação da década de 30 (menos chuvoso) foi de 252 dias e o da década de 80 (segundo mais chuvoso) de 257 dias, portanto, uma diferença de apenas cinco dias.

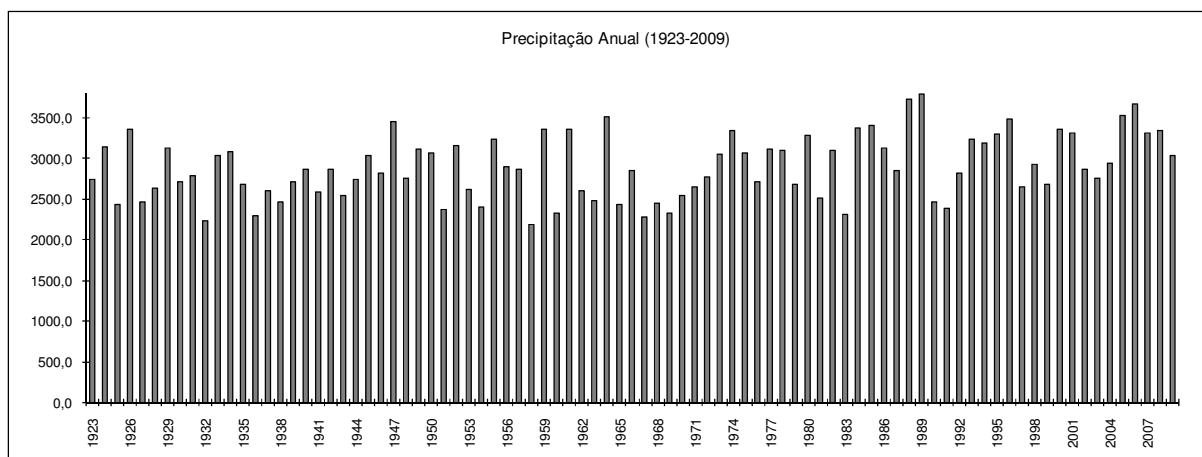


Figura 20. Distribuição Anual da Precipitação para o período de 1923 a 2009.

Fonte:(INMET, 2009).

Tabela 8. Variação Decenal das Chuvas (1923-2005)

Década	Média Decenal da Precipitação Total Anual (mm)	Frequência Média do n° de dias de chuva	Variação em % em relação ao primeiro período
1923-1930	2825,0	257	-
1931-1940	2674,1	252	-5,3
1941-1950	2894,6	247	2,5
1951-1960	2740,5	231	-3,0
1961-1970	2679,7	232	-5,1
1971-1980	2973,3	260	5,2
1981-1990	3062,2	257	8,4
1991-2000	2999,8	268	6,2
2001-2007	3195,0	269	13,1

Fonte:(INMET, 2009).

Na figura 21 é mostrado o comportamento da média decenal da precipitação total anual para o período de 1923/2007, e observa-se que a partir da década de 70 a média vem crescendo comparativamente com as das décadas anteriores, o que também pode ser visualizado através da linha de tendência plotada no gráfico. Provavelmente associada não somente a variabilidades decadais do clima, mas

também a fatores antrópicos decorrente da ocupação humana avaliada preliminarmente no item 6.2.

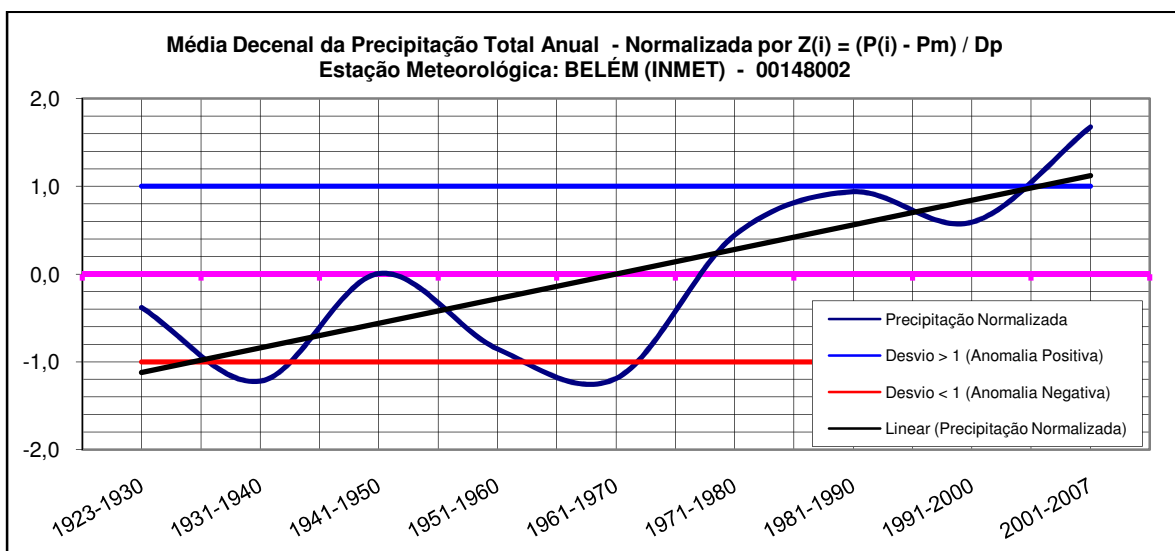


Figura 21. Gráfico da média decenal da precipitação total anual.

A oscilação da variabilidade dos totais anuais de precipitação em Belém é um fato evidente, entretanto na tabela 9, observa-se que os índices mais frequentes estão situados entre 2.250 a 3.500 mm anuais e ocorreram em 78 anos da série. No período analisado, em apenas 2 anos ocorreu precipitação inferior a 2.250 mm e em 5 anos superior a 3.500 mm.

Tabela 9. Distribuição Anual da Precipitação Total (mm).

Precipitação	N° de Anos	%
< 2.250	2	2,35
2.250 – 2.500	15	17,65
2.500 – 2.750	18	21,18
2.750 – 3.000	15	17,65
3.000 – 3.250	17	20,00
3.250 – 3.500	13	15,29
> 3500	5	5,88
Total	85	100

Fonte:(INMET, 2009).

6.1.2 Precipitação máxima em 24 horas

A análise da precipitação máxima em 24 horas foi realizada para a série histórica que compreende o período de 1923 a 1990, considerando-se a distribuição entre as classes menor que 20 mm, 20-40 mm, 40-60 mm, 60-80 mm, 80-100 mm e acima de 100 mm. O resultado obtido revela uma variabilidade bastante significativa com relação à distribuição entre essas classes (tabela 10). Considerando os totais de cada mês das precipitações máximas em 24 horas acima de 40 mm, observa-se uma variabilidade significativa entre os primeiros quatro meses do ano (período mais chuvoso), entretanto, o mês de fevereiro registra uma frequência um pouco maior em relação aos demais meses.

A maioria das precipitações máximas em 24 horas é registrada para a classe de 20-40 mm (336 ocorrências). Observa-se também, que as precipitações máximas acima de 100 mm acontecem com maior frequência entre os meses de fevereiro, março e abril.

Tabela 10. Frequência da precipitação diária.

Classe de Precipitação (mm)	Número de dias												Total
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
<20	1	0	0	0	0	10	5	10	11	23	24	4	88
20-40	16	9	7	16	30	38	43	40	45	33	32	27	336
40-60	23	27	19	21	23	14	14	15	7	7	7	23	200
60 - 80	18	14	15	16	7	3	1	1	2	3	1	8	89
80 - 100	7	7	5	8	3	1	2	0	0	0	2	3	38
> 100	1	5	6	5	1	0	0	0	0	1	0	1	20
Total > 40	49	53	45	50	34	18	17	16	9	11	10	35	347
Total	66	62	52	66	64	66	65	66	65	67	66	66	771

Fonte: Dados diários de precipitação da estação meteorológica de Belém – 1923 a 2009/INMET (2009).

Segundo Gonçalves (1992), embora seja bastante significativa na caracterização da intensidade, a precipitação máxima em 24 horas representa aspectos variados da pluviometria, sendo que as chuvas em sua descontinuidade específica podem ser fortes ou fracas, contínuas ou esparsas e ocorrem em espaço de tempo e duração variável ao longo do dia.

6.1.3 Caracterização de período seco e chuvoso

Os quantis utilizado no trabalho de PINKAYAN (1966), será aqui aplicado na série de 1923/2007 para a área urbana de Belém considerando as ordens quantílicas a fim de delimitar as categorias.

Na tabela 11, observa-se uma distribuição homogênea entre o número de anos secos e chuvosos, identifica-se também, 29,4% de anos sem anormalidade. Na figura 22 podemos visualizar que de 1923 a 1971, ocorreu um maior número de anos de característica seca, por outro lado, de 1972 a 2007 observa-se justamente o inverso, um maior número de anos de característica chuvosa.

Tabela 11. Distribuição das ordens quantílicas para delimitação das categorias.

Q(0 - 15)	Q(15 - 35)	Q(35 - 65)	Q(65 - 85)	Q(85 - 100)
MUITO SECO	SECO	NORMAL	CHUVOSO	MUITO CHUVOSO
15%	20%	30%	20%	15%

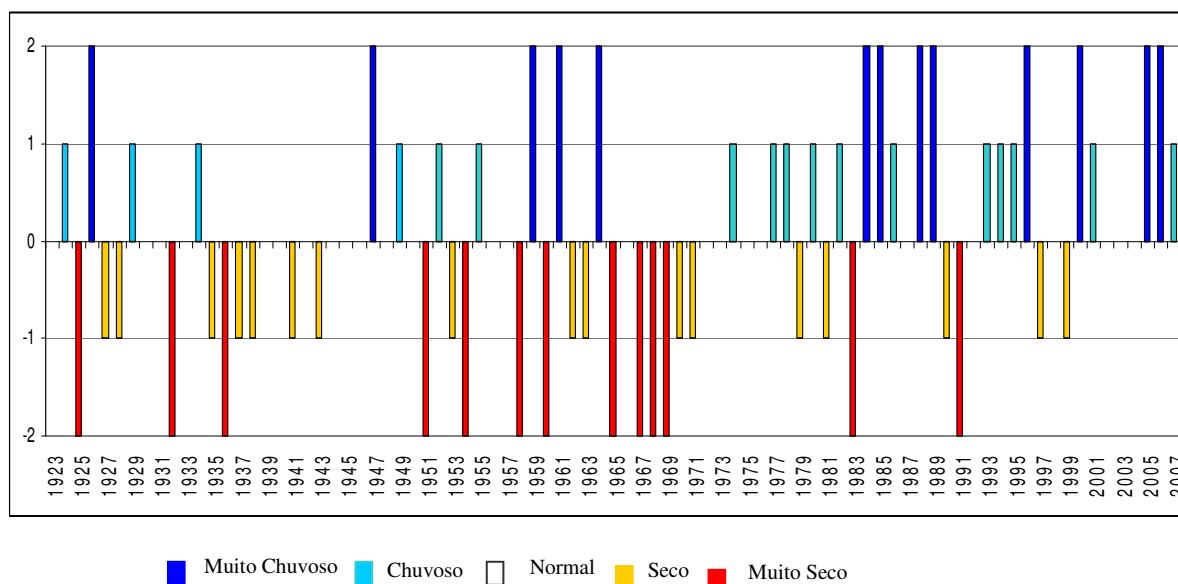


Figura 22. Distribuição do período seco e chuvoso referente ao período de 1923 a 2007.

As ocorrências dos eventos El Niño e La Niña poderiam justificar a tendência de alteração na temperatura do ar, entretanto, observando os dados do quadro 4, em que os eventos de El Niño (fenômeno relacionado com a redução de chuva) ocorreram em maior número de vezes (28) durante os anos de 1972 a 2007,

justamente no período onde foi registrado o maior número de anos chuvosos. Este fato leva a crer que o aumento dos anos chuvosos possa estar relacionado com outros eventos climáticos, inclusive com alterações antrópicas decorrente da ocupação urbana, conforme citado no item “3.1. Efeito da Ocupação Urbana Sobre o Clima” da revisão bibliográfica.

Quadro 4. Ocorrências dos eventos de El Niño e La Niña.

Ocorrência de El Niño		Ocorrência do La Niña	
1877 - 1878	1888 - 1889	1886	1903 - 1904
1896 - 1897	1899	1906 - 1908	1909 - 1910
1902 - 1903	1905 - 1906	1916 - 1918	1924 - 1925
1911 - 1912	1913 - 1914	1928 - 1929	1938 - 1939
1918 - 1919	1923	1949 - 1951	1954 - 1956
1925 - 1926	1932	1964 - 1965	1970 - 1971
1939 - 1941	1946 - 1947	1973 - 1976	1983 - 1984
1951	1953	1984 - 1985	1988 - 1989
1957 - 1959	1963	1995 - 1996	1998 - 2001
1965 - 1966	1968 - 1970	2007 - 2008	-
1972 - 1973	1976 - 1977	Legenda: Forte Moderada Fraco	
1977 - 1978	1979 - 1980		
1982 - 1983	1986 - 1988		
1990 - 1993	1994 - 1995		
1997 - 1998	2002 - 2003		
2004 - 2005	2006 - 2007		
2009 - 2010	-		
Legenda: Forte Moderada Fraco			

Fonte: (CPTEC, 2010).

Na tabela 12, onde as categorias estão agrupadas por décadas, devemos observar com maior atenção os anos considerados chuvosos (Chuvoso e Muito Chuvoso), por representarem anos de maior tendência de ocorrência de alagamento e inundação em Belém.

As categorias “muito seco” e “seco”, refere-se apenas a uma condição de deficiência na precipitação pluvial, isso não significa a condição de deficiência de água no solo, muito menos não diz respeito a ausência de chuva. Já a categoria “normal”, significa entender como sendo no entorno “da mediana”.

Tabela 12. Ocorrência das categorias por décadas.

Período	N° de Anos				
	Muito Seco	Seco	Normal	Chuvoso	Muito Chuvoso
1923-1930	1	2	2	2	1
1931-1940	2	3	4	1	0
1941-1950	0	2	6	1	1
1951-1960	4	1	2	2	1
1961-1970	4	3	1	0	2
1971-1980	0	2	4	4	0
1981-1990	1	2	1	2	4
1991-2000	1	2	2	3	2
2001-2007	0	0	3	2	2
TOTAL	13	17	25	17	13
Frequência	15,3%	20,0%	29,4%	20,0%	15,3%

6.1.4 Balanço hídrico

O cálculo do balanço hídrico para a cidade de Belém foi realizado com base no método de "TORNTHWAITE & MATHET (1955)". Os dados utilizados são os da estação meteorológica do INMET, sendo que, os dados de precipitação são referentes ao período de 1923/2007, e para a temperatura de 1961/2000.

Com base na tabela 13 e na figura 23, pode-se observar que durante os meses de janeiro a maio o balanço hídrico indica um grande excedente de água, conseqüência das intensas chuvas que ocorrem neste período em Belém, que ultrapassam a capacidade de armazenamento de água do solo, e por conta desse fato, as inundações durante este período se tornam mais freqüentes. Somente a partir do mês de agosto até novembro o solo apresenta uma deficiência de água.

Na figura 24, observa-se também, que o comportamento da evapotranspiração potencial pouco difere da evapotranspiração real ao longo do ano, com exceção das alterações registradas nos meses de agosto a novembro.

Tabela 13. Cálculo do Balanço Hídrico de Belém

Meses	Num de dias	T °C Atual	P mm	N horas	I	a	ETP Thornthwaite 1948	P-ETP mm	INÍCIO	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	30	25,8	355,1	12,1	12,0	3,6	123,33	231,7	Início	0,0	100,00	0,00	123,3	0,0	231,7
Fev	28	25,6	403,8	12,1	11,9	3,6	111,74	292,0		0,0	100,00	0,00	111,7	0,0	292,0
Mar	31	25,7	441,1	12,0	11,9	3,6	125,12	316,0		0,0	100,00	0,00	125,1	0,0	316,0
Abr	30	25,9	385,6	12,0	12,1	3,6	124,08	261,5		0,0	100,00	0,00	124,1	0,0	261,5
Mai	31	26,1	284,2	11,9	12,2	3,6	131,39	152,8		0,0	100,00	0,00	131,4	0,0	152,8
Jun	30	26,2	169,9	11,9	12,3	3,6	128,62	41,3		0,0	100,00	0,00	128,6	0,0	41,3
Jul	31	26,0	152,7	11,9	12,1	3,6	129,24	23,5		0,0	100,00	0,00	129,2	0,0	23,5
Ago	31	26,2	124,0	11,9	12,3	3,6	133,07	-9,1		-9,1	91,33	-8,67	132,7	0,4	0,0
Set	30	26,3	126,9	12,0	12,3	3,6	130,94	-4,1		-13,1	87,71	-3,63	130,5	0,4	0,0
Out	31	26,5	111,2	12,0	12,5	3,6	139,52	-28,3		-41,4	66,08	21,62	132,8	6,7	0,0
Nov	30	26,6	109,1	12,1	12,6	3,6	137,31	-28,2		-69,7	49,82	16,26	125,3	12,0	0,0
Dez	31	26,4	224,2	12,1	12,4	3,6	138,38	85,8		0,0	100,00	50,18	138,4	0,0	35,6
TOTAIS		313,3	2887,6	144,0	146,5	43,2	1552,73	1334,9			1095	0,00	1533,2	19,5	1354,4
MÉDIAS		26,1	240,6	12,0	12,2	3,6	129,39	111,2			91,2		127,8	1,6	112,9

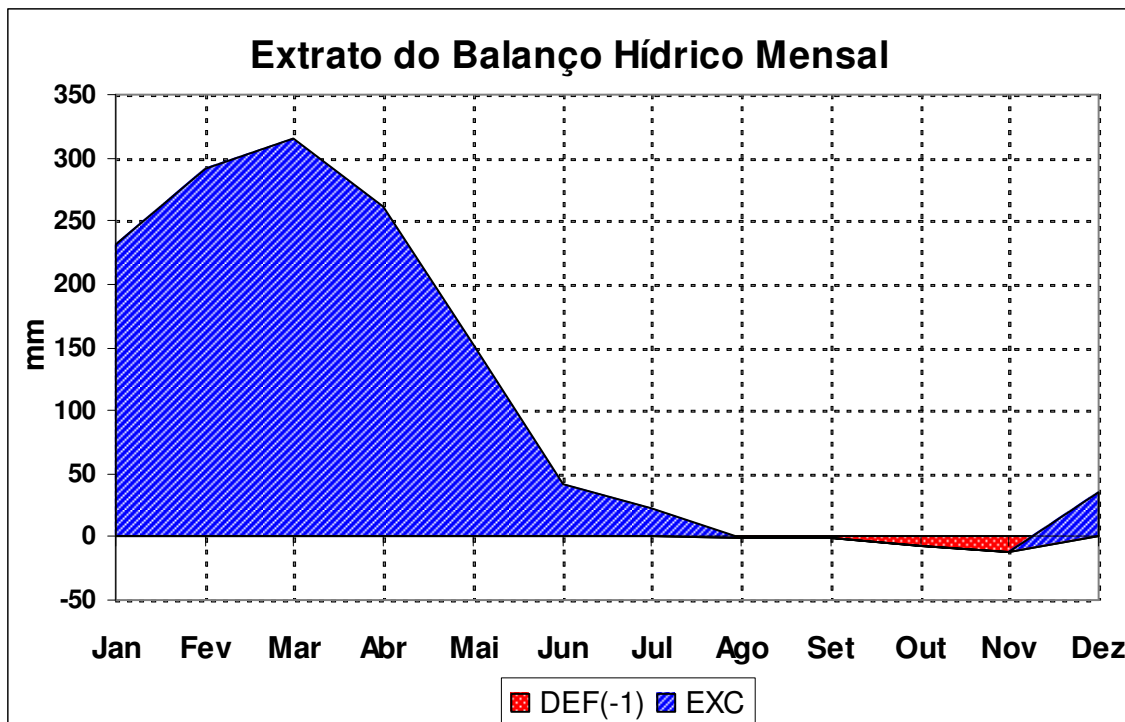


Figura 23. Distribuição mensal do excedente e deficiência de água no solo.

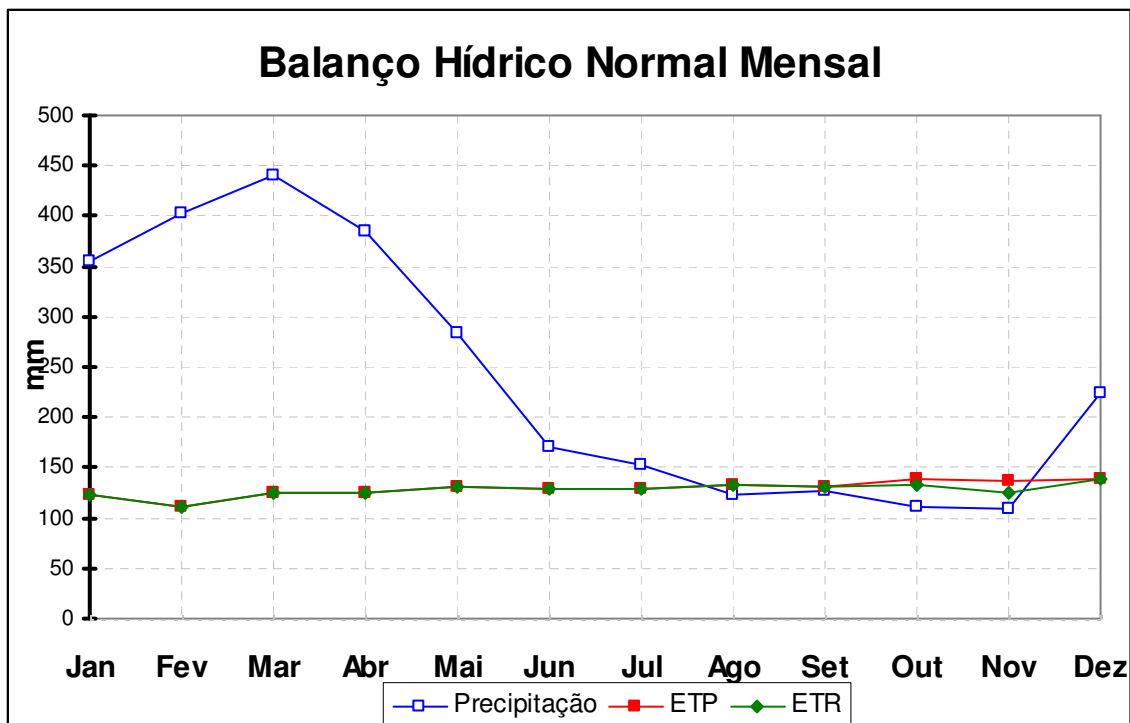


Figura 24. Distribuição mensal da evapotranspiração potencial e real.

6.1.5 Análise da temperatura do ar

A análise preliminar do comportamento da temperatura do ar referente à série histórica da estação meteorológica do INMET, possibilitou identificar a existência de um ponto de flexão na curva de tendência no ano de 1961 com um registro de anormalidade negativa. Em 1979, observa-se que a curva de tendência aproximase da normalidade (figura 25).

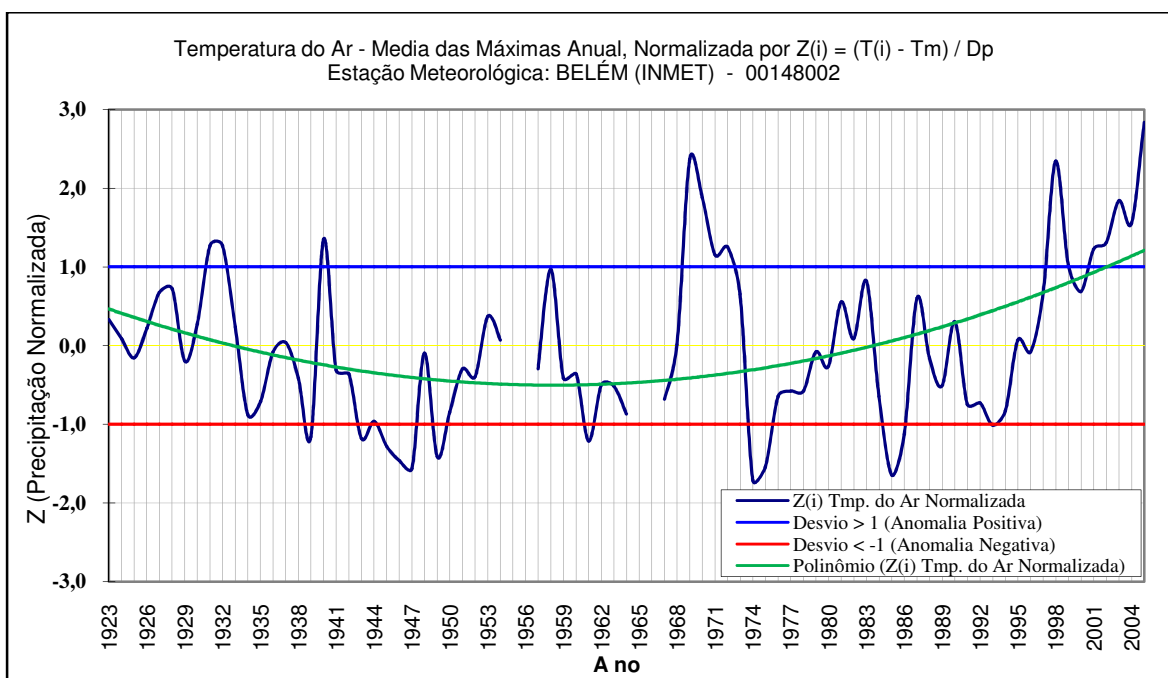


Figura 25. Temperatura do Ar - Média das Máximas Anual, Normalizada por $Z(i) = (T(i) - T_m) / D_p$ – 1923 a 2006.

A média anual da temperatura do ar máxima e mínima obtidas para o período de 1923 a 2006 da estação meteorológica do INMET, revela a ocorrência da maior média das máximas 33,0 °C registrada no ano de 2005 e da média das menor mínimas 21,1 °C relativa ao ano de 1976.

Para a análise dos dados da temperatura do ar (médias das máximas e mínimas) foram considerados dois períodos de 1953 a 1979 e de 1980 a 2006. O objetivo da análise compartimentada foi de avaliar a ocorrência de alterações no comportamento da temperatura observada na estação meteorológica do INMET, e sua relação com as modificações ocorridas no uso e ocupação do solo de Belém e adjacências até o ano de 1979, e posteriormente, com as alterações registradas entre os anos de 1980 a 2006.

No período de 1953 a 1979, observa-se no gráfico da figura 26 (a), que nos anos de 1969 e 1975 ocorreram duas grandes anomalias, segundo Santos et al (2006), as temperaturas em Belém nesses anos foram influenciadas pelas TSM do Atlântico Norte (AN). Entretanto, apesar da alta da temperatura da média das máximas registrada em decorrência dessas anomalias, não se identifica nenhuma tendência de aumento da temperatura média das máximas no período analisado. Já com relação à temperatura média das mínimas, fica bem evidente a existência de uma tendência de redução da mesma como observado no gráfico da figura 26 (b).

No período de 1980 a 2006, ocorreram dois fortes fenômenos de El Niños, um em 1982/1983 e outro em 1997/1998, porém, nem no período de 82/83 como no ano seguinte foram identificadas quaisquer anomalias na temperatura do ar em Belém, já o período de 97/98 atuou em conjunto com o aquecimento do AN e provocou grandes valores de temperaturas máximas (SANTOS et al., 2006). Pode ser observado também que a temperatura média das máximas ao longo desse período apresenta uma forte tendência de alta como mostra o gráfico da figura 26 (c).

Para a temperatura média das mínimas, observa-se que diferentemente do período anterior (1953 a 1979) que apresentou uma tendência de queda, no período de 1980 a 2006 acompanha a mesma tendência de elevação registrada para a temperatura média das máximas, conforme visualizado no gráfico da figura 3d.

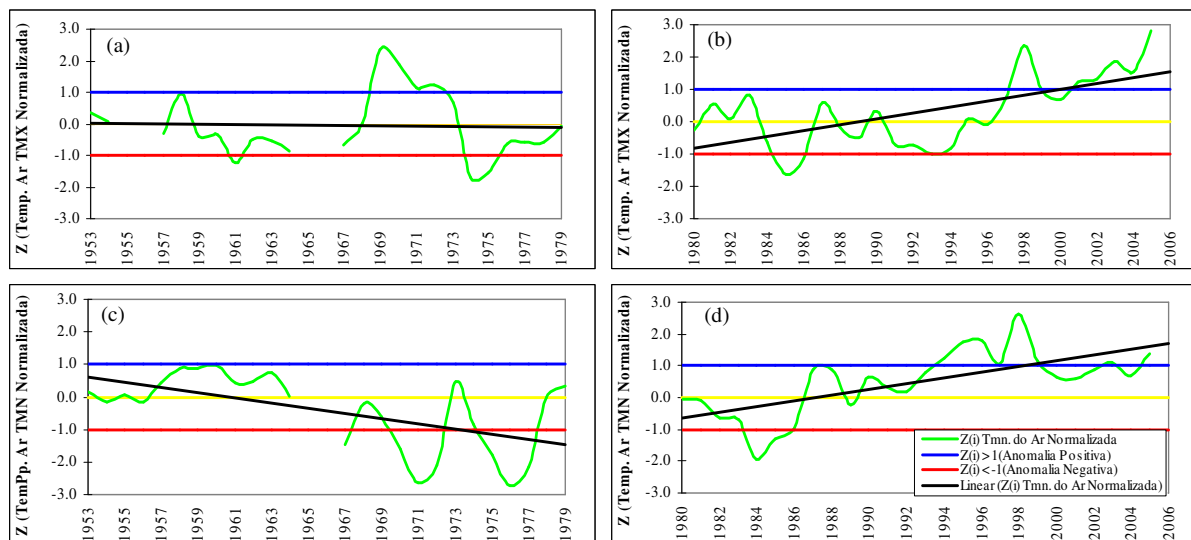


Figura 26. Temperatura do Ar - Média das Máximas e Mínimas Anual, Normalizada por $Z(i) = (T(i) - T_m) / D_p$.

6.1.6 Análise observacional do vento (Velocidade, Direção e Freqüência)

Considerando os dados consolidados mensalmente para a série histórica de 1923 A 1970 referente à esta análise, a média da velocidade anual do vento na estação meteorológica do INMET (CEASA) foi de 8,8 km/h, sendo que a média máxima calculada é referente aos meses de janeiro e setembro (9,5 km/h). A mínima correspondeu ao mês de julho (7,9 km/h), entretanto, observa-se que as variações da velocidade do vento ao longo do ano são bastante pequenas.

No gráfico da figura 27, percebe-se que a direção dos ventos na área de estudo ao longo do ano é predominantemente no sentido NE com uma freqüência anual entorno de 23,1%. Apesar de existir registro de vento em todas as direções, as freqüências nas direções S, SW e W são insignificantes.

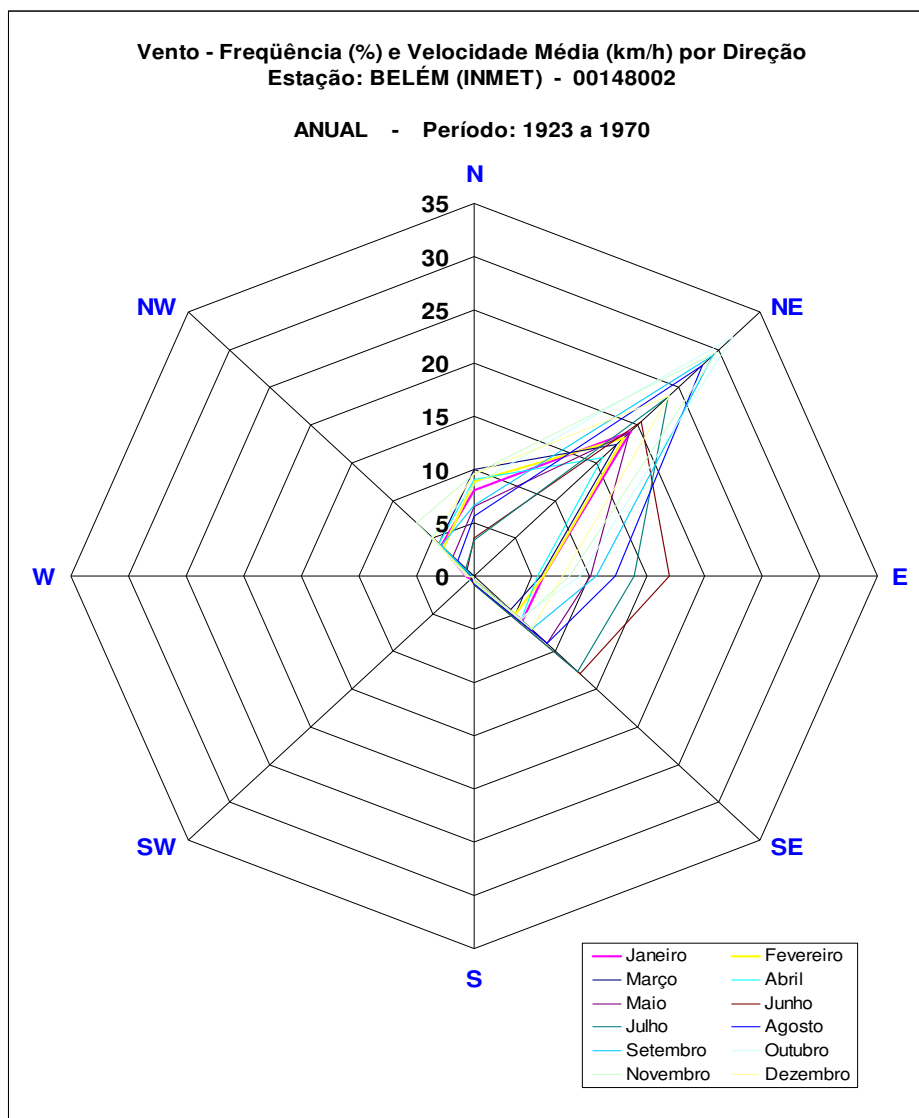


Figura 27. Gráfico representativo da média da velocidade e direção do vento registrado na área de estudo.

6.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO URBANA

A seleção das imagens para a análise e quantificação da expansão urbana, foi com base no critério aplicado na análise dos dados observacionais da temperatura do ar. Desta forma, foram selecionadas as datas de 25/06/1979 e de 09/08/2006 a fim de quantificar a ocupação ocorrida até 1979 e o incremento ocorrido ao longo do período de 1980-2006.

Os dados gerados correspondente as datas de 25/06/1979 (figura 28 - a) e 09/08/2006 (figura 28 - b), mostram que a classe vegetação teve uma redução ocasionada principalmente pelo avanço da ocupação humana, o que pode ser

confirmado através dos dados obtidos para a classe urbano/solo exposto que passou de 8,32% registrado em 1979 para 14,89% em 2006 (tabela 14). A maior perda de vegetação ocorreu na parte nordeste da Região Metropolitana de Belém.

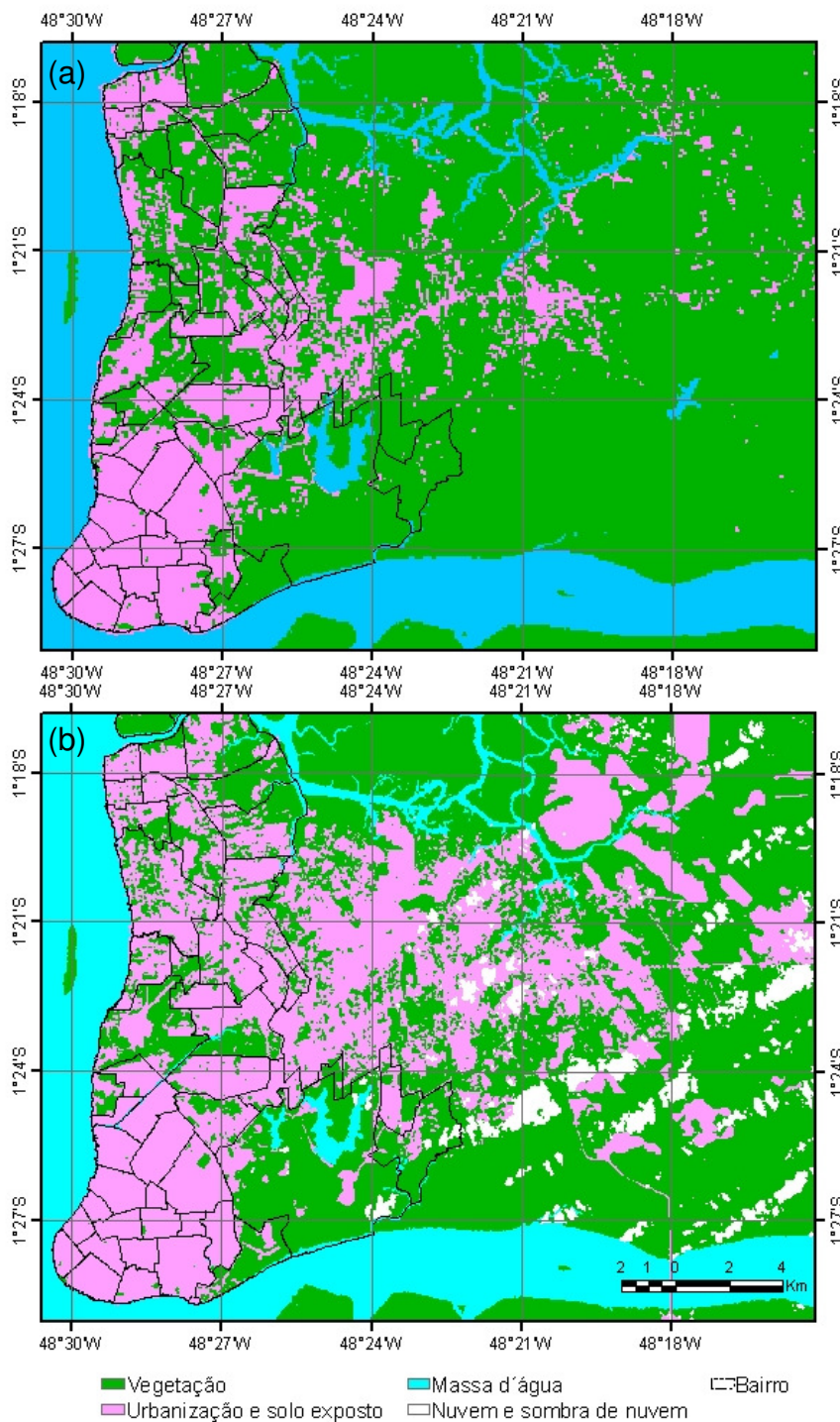


Figura 28. Mapa de uso e ocupação de 1979 (a) e de 2006 (b).

Tabela 14. Classes de cobertura do solo.

Ano	Vegetação (%)	Urbano / solo exposto (%)	Massa d'água (%)	Nuvem/sombra (%)	Total (%)
1979	68,30	8,32	23,38	0,00	100
2006	59,01	14,89	23,38	2,72	100

6.3 ANÁLISE DO GRADIENTE TÉRMICO

O mapeamento das ilhas de calor urbanas foi determinado a partir da análise da banda 6 do Landsat TM5, com a transformação o sinal digital infravermelho termal em radiância ($w.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$), através da equação 20.

$$L = \{[(L_{max} - L_{min}) \div (NC_{max} - NC_{min})] \times (N_c - NC_{min})\} + L_{min} \quad (20)$$

Onde L_{max} e L_{min} representam os valores de máxima e mínima radiância detectados pelo sensor, NC_{max} representa o nível de cinza máximo, dada a quantização, NC_{min} representa o nível de cinza mínimo e NC representa o nível de cinza de cada pixel da imagem. Posteriormente, foi realizada a conversão em temperatura através do inverso da lei de Planck (equação 21), onde K_1 e K_2 são constantes de calibração para a banda do infravermelho termal (10,4 – 12,5 μm). Todo o processamento foi realizado no software ENVI.

$$Temp_{(C)} = \{(K_1) \div \ln[(K_2 \div L) + 1]\} - 273,15 \quad (21)$$

Com base no gradiente térmico obtido foi possível identificar as diferenças de temperatura de superfície entre a área urbana e seu entorno. Este fato ocorre devido à substituição da cobertura natural da superfície por equipamentos urbanas constituídos por materiais do tipo concreto, asfalto, solo exposto, etc. Nas figuras 29 (a) e (b) pode ser visualizado o resultado da classificação das temperaturas de superfície para a área de estudo referente aos anos de 1984 e 2006. Observa-se que as ilhas de calor urbanas identificadas pelos tons de cor alaranjados mais escuros, coincidem com a área urbanizada. Conforme a expansão urbana se aproxima dos locais que ainda existe cobertura vegetal, as temperaturas superfície tendem a diminuir. Temperaturas abaixo de 21,6 °C

registradas pelo sensor do satélite na imagem do ano de 2006 foram descartadas por coincidirem com as ocorrências de nuvens.

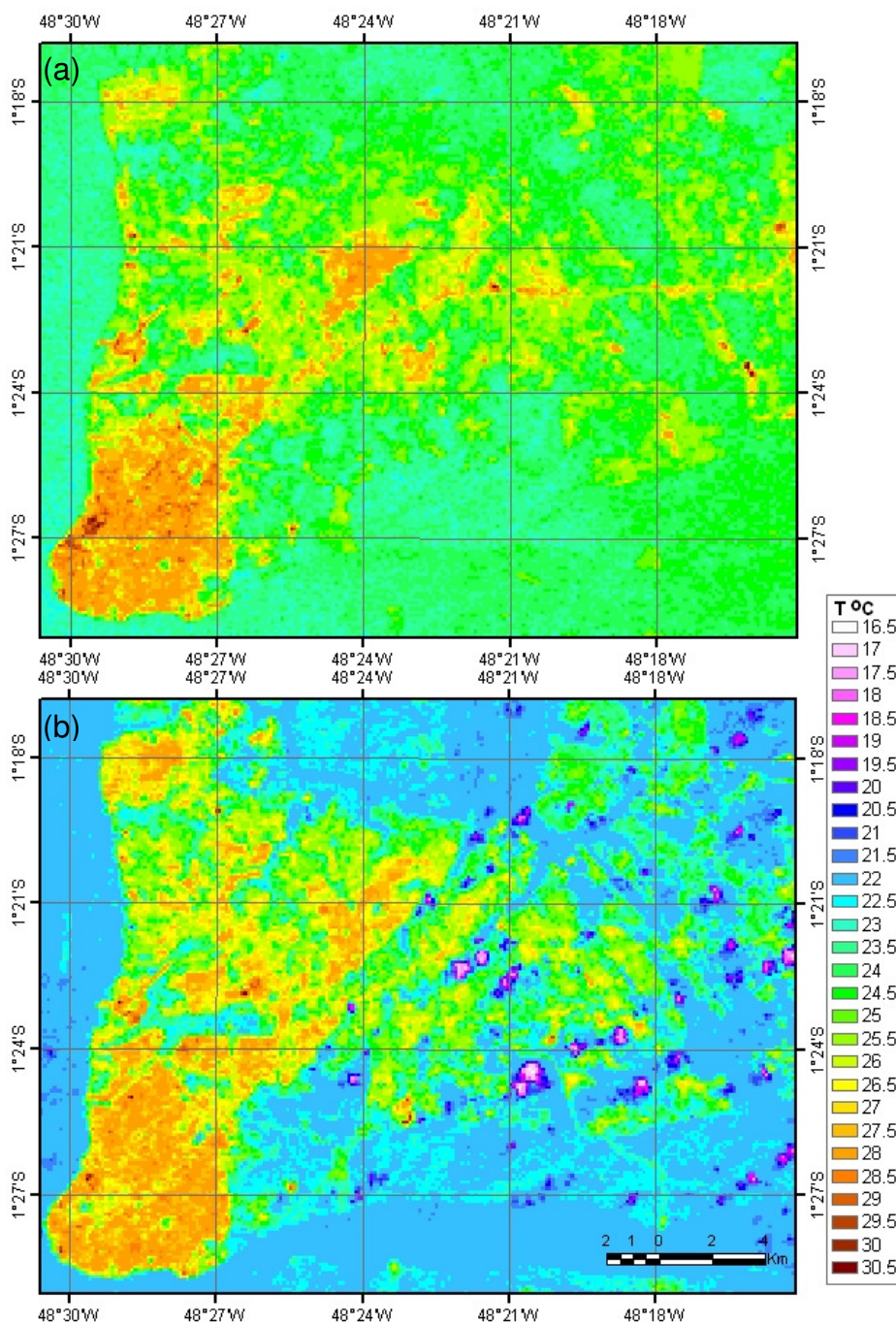


Figura 29. Ilhas de calor urbanas extraídas do sensor termal do Landsat TM5 de 27/07/84, 12h52min GMT (a) e de 09/08/06, 10h16min GMT (b).

Tem de se observar que o registro da temperatura de superfície mais elevada na imagem de 1979 em relação à de 2006, está associada com a hora de imageamento do satélite. A mais antiga ocorreu por volta das 12h, enquanto que

a mais recente por volta das 10h o que influenciou as condições térmicas da superfície.

O comportamento do campo térmico observado ao longo do perfil A-B (SO-NE) (figura 30), mostra que as temperaturas de superfície mais amenas registradas ao longo do perfil, identificados pelos pontos (1), (2) e (3), estão relacionadas às áreas com algum tipo de vegetação. O ponto (3) corresponde à área de vegetação do Jardim Botânico Bosque Rodrigues Alves. No perfil C-D (SO-NE) da figura 31, observa-se que no ponto (1) é registrada a temperatura de superfície mais elevada localizada no bairro do Reduto. Este bairro tem como característica a presença de grandes galpões com cobertura de fibro-cimento ou zinco, lotes residenciais pequenos, quase todo edificado e pouca arborização.

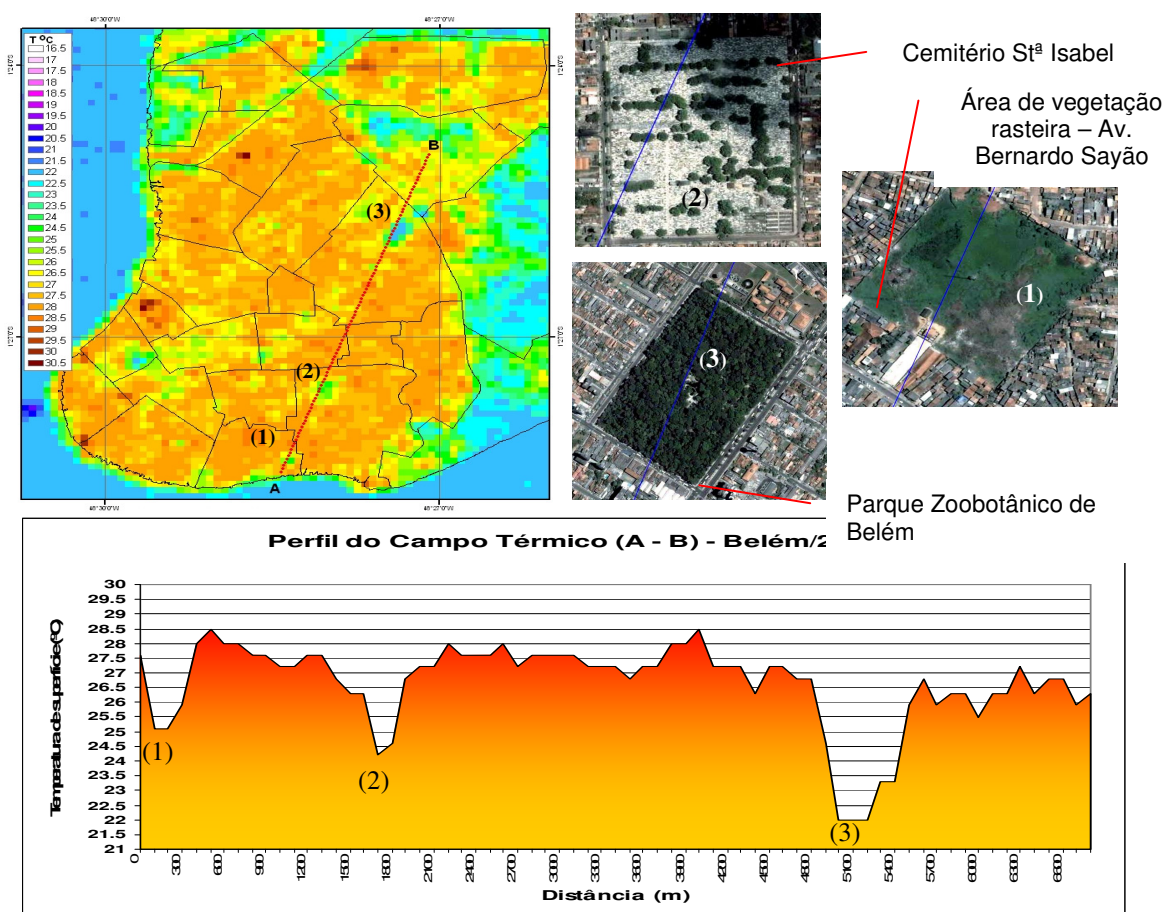


Figura 30. Perfil do campo térmico (AB) extraído da imagem Landsat TM5 (B6) de 09/08/06 (10h16min GMT).

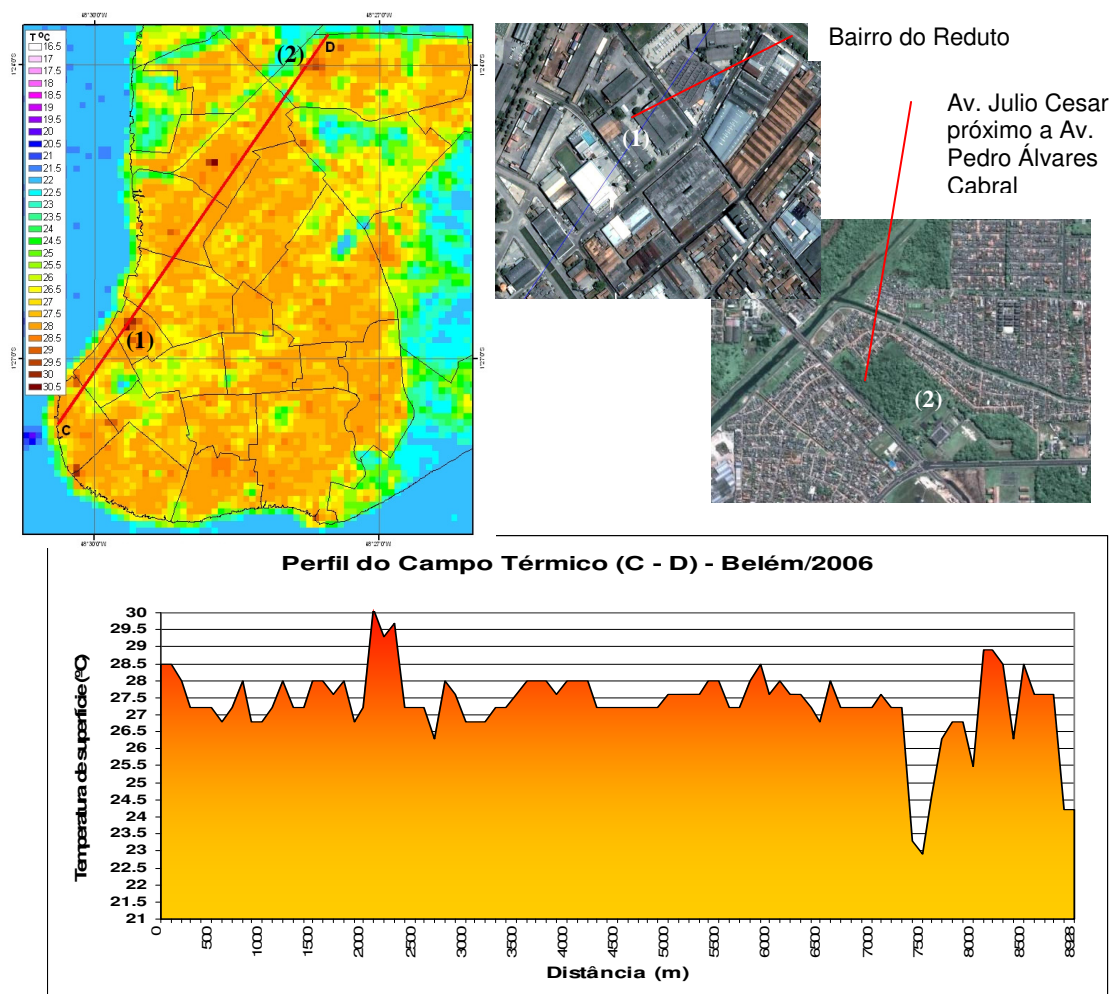


Figura 31. Perfil do campo térmico (CD) extraído da imagem Landsat TM5 (B6) de 09/08/06 (10h16min GMT).

Os resultados dos dados observados na estação meteorológica do INMET (CEASA) para o período de 1923 a 2006 mostram que a temperatura do ar (média das máximas e mínimas) registra uma tendência de aumento a partir do final da década de 70. Observa-se também, a partir das imagens do sensor termal do Landsat TM5, que a expansão urbana propicia a intensificação da formação de ilhas de calor urbanas na cidade de Belém, que se agravam a cada ano com o surgimento de novos equipamentos públicos responsáveis pela impermeabilização do solo. Este processo faz com que a água da chuva evapore com maior rapidez diminuindo a capacidade de resfriamento do ambiente e proporcionando um desconforto térmico à população. A diferença de temperatura registrada pelo sensor termal entre as áreas urbana e rural em alguns casos chega até 6 °C.

Com base nos dados da imagem do Landsat de 09/08/2006 (sensor termal), observou-se através das médias das temperaturas de superfície calculada por bairro (figura 32), que o Reduto com 27,5°C, seguido de Canudos e Fátima com 25,5°C cada, registraram as médias mais elevadas. Os bairros de Curió-Utinga com 22,8°C, da Guanabara e Aura com 23,5°C cada, registraram as médias mais baixas. As temperaturas de superfície mais elevadas foram localizadas nos bairros da Sacramento (30,5°C), Reduto (30,1°C) e Mangueirão (30,1°C).

Na área da bacia, onde estão inseridos os bairros do Jurunas, Nazaré, Batista Campos, Cremação e Condor, observa-se que todos estão acima da média (26 °C), com destaque para o bairro do Jurunas e Cremação ambos com 27,3°C.

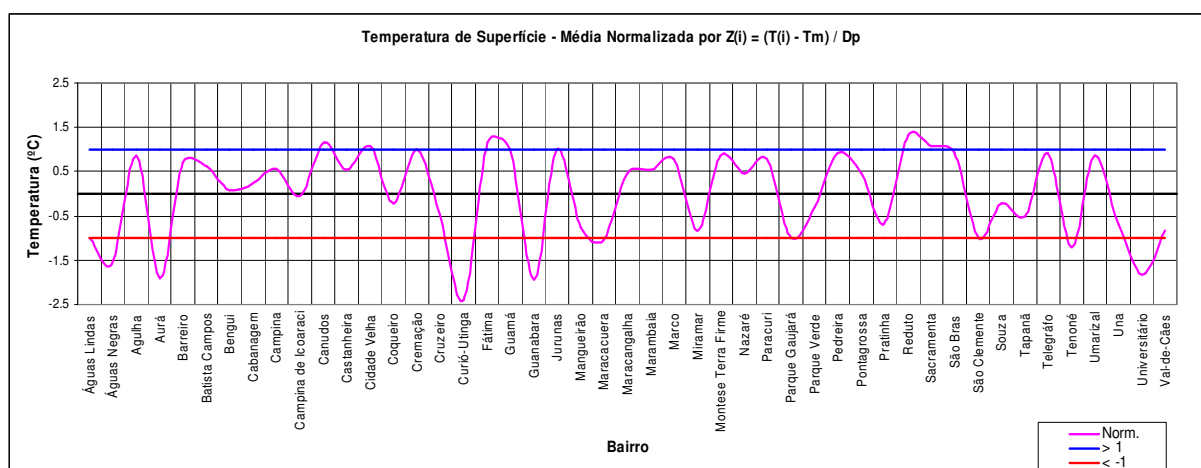


Figura 32. Comportamento da Temperatura do ar média por bairro.

O incremento do uso e ocupação do solo localizado a nordeste da estação meteorológica do INMET (CEASA) e inserido nos limites municipais da Região Metropolitana de Belém, provavelmente, pode estar influenciando as alterações no comportamento da temperatura do ar registradas pela estação meteorológica. A direção predominante dos ventos ao longo do ano segundo dados do INMET é de Nordeste (NE), ou seja, as ilhas de calor que se formam nessas áreas ocupadas são transportadas na direção da estação do INMET.

Os pontos observados ao longo do perfil térmico nas figuras 30 e 31 mostram que para reduzir o desconforto térmico causado pela formação das ilhas de calor é necessário evitar o avanço da ocupação urbana sobre os últimos remanescentes

de vegetação, e melhorar a arborização ao longo das áreas já urbanizadas visando amenizar a temperatura do ar.

6.4 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA

6.4.1 Drenagem

A bacia em estudo é composta por cinco canais de drenagens sendo eles: da Tv. da Quintino Bocaiúva, da Tv. 14 de Março, da Av. Generalíssimo Deodoro, da Tv Dr. Moraes e da Rua Conceição (figura 33). Todos os canais são retificados e em condições normais, apresentam uma profundidade em torno de 1,50 m. O canal da Quintino Bocaiúva é o canal principal da bacia e desemboca no canal da Estrada Nova que é perpendicular ao mesmo, sendo este último o responsável pelo deságue da água da bacia que ocorre a partir de uma galeria subterrânea até o Rio Guamá (foto 1).

A topografia plana da área com pequena declividade determina um regime de escoamento crítico. Através de observação visual de campo, foi constatado que os canais da 14 de Março, Dr. Moraes, Generalíssimo Deodoro, Caripunas e da Quintino Bocaiúva (a partir da Av. Roberto Camelier), não apresentavam nenhum fluxo de água na superfície dos mesmos, não sendo possível visualizar nenhum escoamento de água superficial em condições de ausência de chuva.

Para avaliar este fato constatado em campo, foi realizada uma análise do perfil topográfico da área correspondente ao canal principal da bacia hidrográfica com base no modelo digital de elevação (MDE).

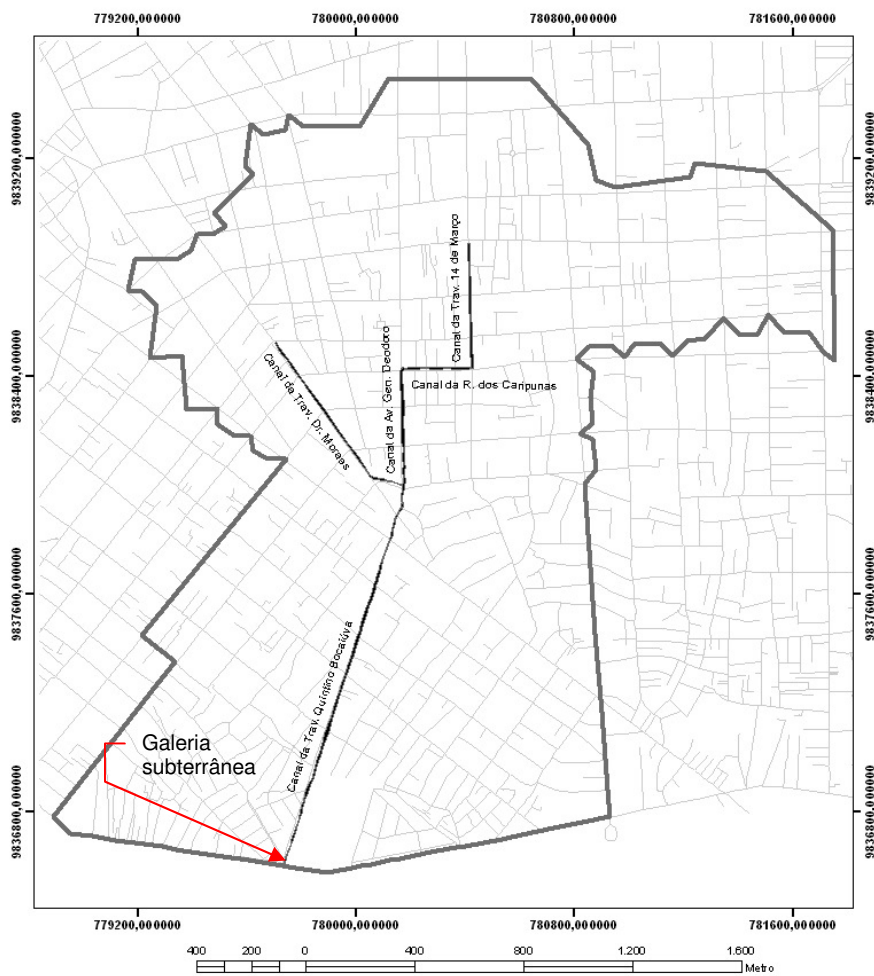


Figura 33. Forma geométrica da bacia hidrográfica do projeto.



Foto 1. Galeria subterrânea por onde desemboca a água do canal da Estrada Nova.

Perfil Canal Quintino Bocaiúva

Na figura 34 é mostrado o perfil terreno ao longo do canal, onde cada ponto assinalado de amarelo corresponde a uma referência no terreno conforme tabela 15. A linha em vermelho no gráfico assinala a profundidade de 1,50 m, a mesma determinada em campo na secção transversal. O perfil mostra que o nível do terreno ao longo do canal se eleva no sentido de seu exultório, sendo que no ponto 3, percebe-se um elevação de aproximadamente 0,5 m na cota do terreno, assim como, entre os pontos 6 e 7 uma nova elevação, desta vez de aproximadamente 0,30 m. Visualizando esses dados a partir do modelo digital de elevação do terreno em 3D (figura 35), constata-se que entre os pontos 1 e 3, e 3 e 6 são algumas dessas áreas onde ocorrem os alagamentos. O resultado dessa análise foi validado com base em observações de campo.

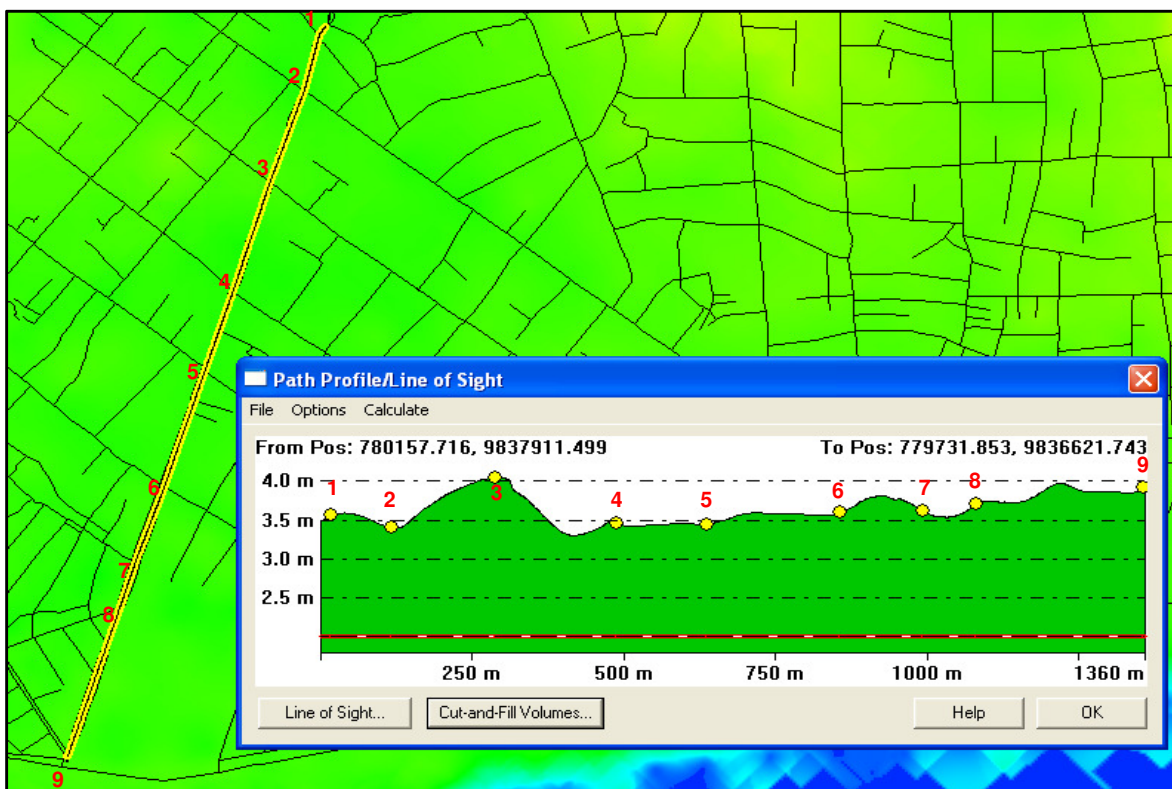


Figura 34. Perfil topográfico do terreno lateral ao canal da Quintino Bocaiúva.

Tabela 15. Pontos de referência sobre o perfil topográfico do MDE por onde passa o canal da Quintino Bocaiúva.

Ponto	Referência
1	Tv. Quintino Bocaiúva com Tv. Dr. Moraes
2	Tv. Quintino Bocaiúva com Tv. Padre Eutíquio
3	Tv. Quintino Bocaiúva com Tv. Apinages
4	Tv. Quintino Bocaiúva com Av. Tupinanbas
5	Tv. Quintino Bocaiúva com Av. Roberto Camelier
6	Tv. Quintino Bocaiúva com Tv. Honório José dos Santos
7	Tv. Quintino Bocaiúva com R. Carlos de Carvalho
8	Tv. Quintino Bocaiúva com Pass. Comunitária
9	Tv. Quintino Bocaiúva com Pass. Monte Alegre

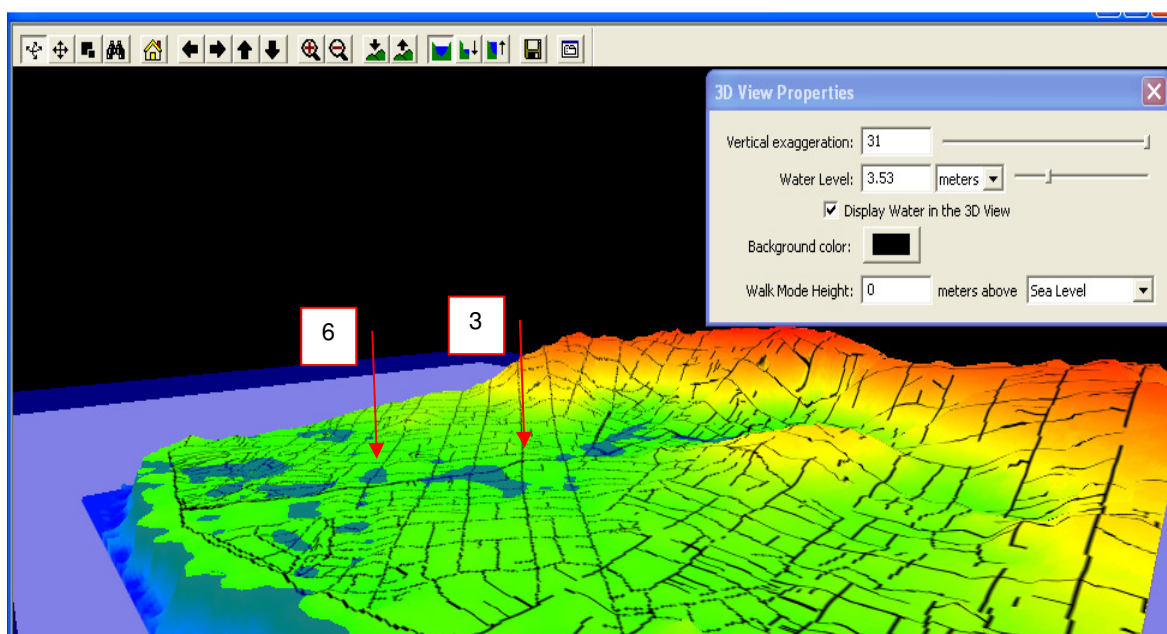


Figura 35. Modelo digital de elevação do terreno apresentado em 3D com alagamento das cotas inferior a 3,53 m de elevação.

Além da questão topográfica comentada anteriormente, outros fatores contribuem para agravar o problema de drenagem da bacia através do canal principal, como por exemplo, as construções habitacionais que surgiram sobre o canal na sua porção mais extrema e que afeta sua vazão (foto 2).



Foto 2. Construções habitacionais construídas sobre o canal (Imagem GeoEye-2010/Google).

Outro aspecto problemático se refere à condição de limpeza e dragagem desses canais. Durante a visita a campo, observou-se um grande acúmulo de lixo despejado no leito dos mesmos, prejudicando a vazão do canal principal conforme retratado na foto 3.



Foto 3. Acúmulo de lixo registrado no leito do canal, próximo a sua foz, represado pelas moradias construídas indevidamente sobre o canal.

6.4.2 Mudanças do uso do solo

As características do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica foram realizadas com base nos dados obtidos da CODEM e complementadas através da imagem do satélite Geoeye de julho de 2009 disponibilizado no site da Google[®]. Segundo esses dados, aproximadamente 79,26% da área encontra-se impermeabilizada com uso destinado a ocupação urbana, e o restante são áreas não edificadas, porém, que já perderam sua vegetação original (figura 36). Segundo o cadastro imobiliário, cerca de 1.967 dessas habitações estão localizadas em áreas sujeitas a alagamentos e 1.008 em áreas alagadas, sendo que, aproximadamente 947 dessas habitações são de construção de madeira.

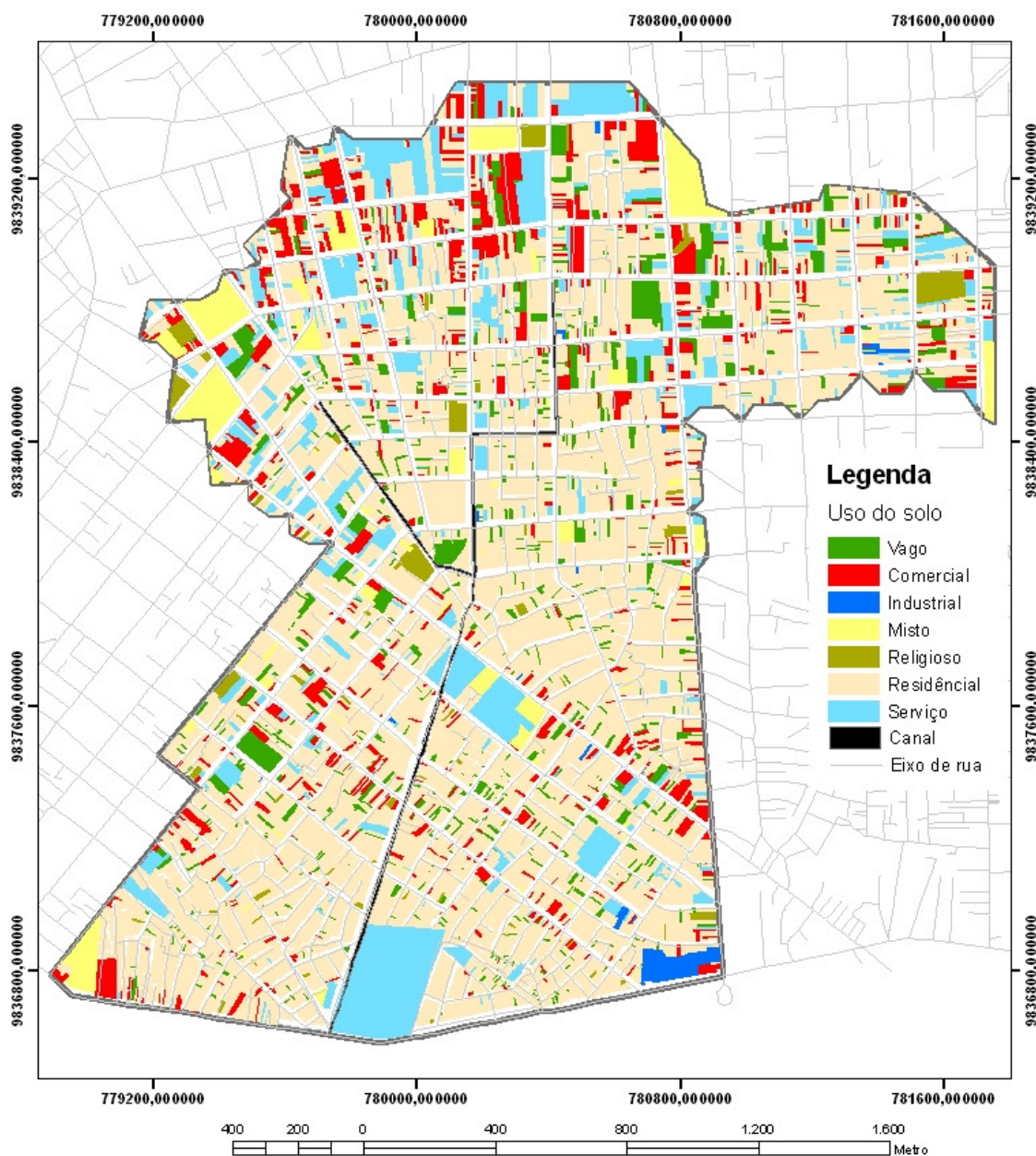


Figura 36. Mapa da distribuição espacial do uso e ocupação do solo na área do projeto.

Fonte: (CODEM, 1988).

Um resumo das informações extraídas da base de dados do cadastro imobiliário da CODEM, utilizada para cobrança do Imposto Territorial Urbano (IPTU), podem ser vistos nas tabelas 16 e 17 e figuras 37 e 38 respectivamente. Estes dados são importantes do ponto de vista da análise das ocorrências dos alagamentos e inundações, pois, dependendo do tipo da ocupação e construção existente nas

áreas impactada, será possível estimar com maior precisão o número de moradias atingidas e os impactos que a população residente estará sujeita.

Segundo relatos dos jornais, a área mostrada na figura 38, constantemente sofre com problemas de alagamento e inundação durante o período chuvoso. Analisando os dados do cadastro da CODEM, observa-se que a maioria das construções é de madeira e de uso residencial, e por conta dessa situação pode-se deduzir o quanto as famílias que residem nestas áreas são afetadas pelas constantes ocorrências dos alagamentos e inundações comuns durante o período chuvoso.

Tabela 16. Percentual das áreas da bacia em relação aos uso e ocupação do solo na área do projeto.

	Tipo de Ocupação						
	Residencial	Comercial	Indústrial	Misto	Religiosa	Serviço	S/ uso
Área (%)	84,50	5,89	0,14	0,69	0,38	3,42	4,98

Tabela 17. Percentual das áreas da bacia em relação aos tipos de construção na área do projeto.

	Tipo de Construção						
	Concreto	Alvenaria	Concreto/ Alvenaria	Madeira	Madeira/ Alvenaria.	Metálica	Taipa
Área (%)	0,21	58,62	2,25	25,37	8,41	0,06	0,54

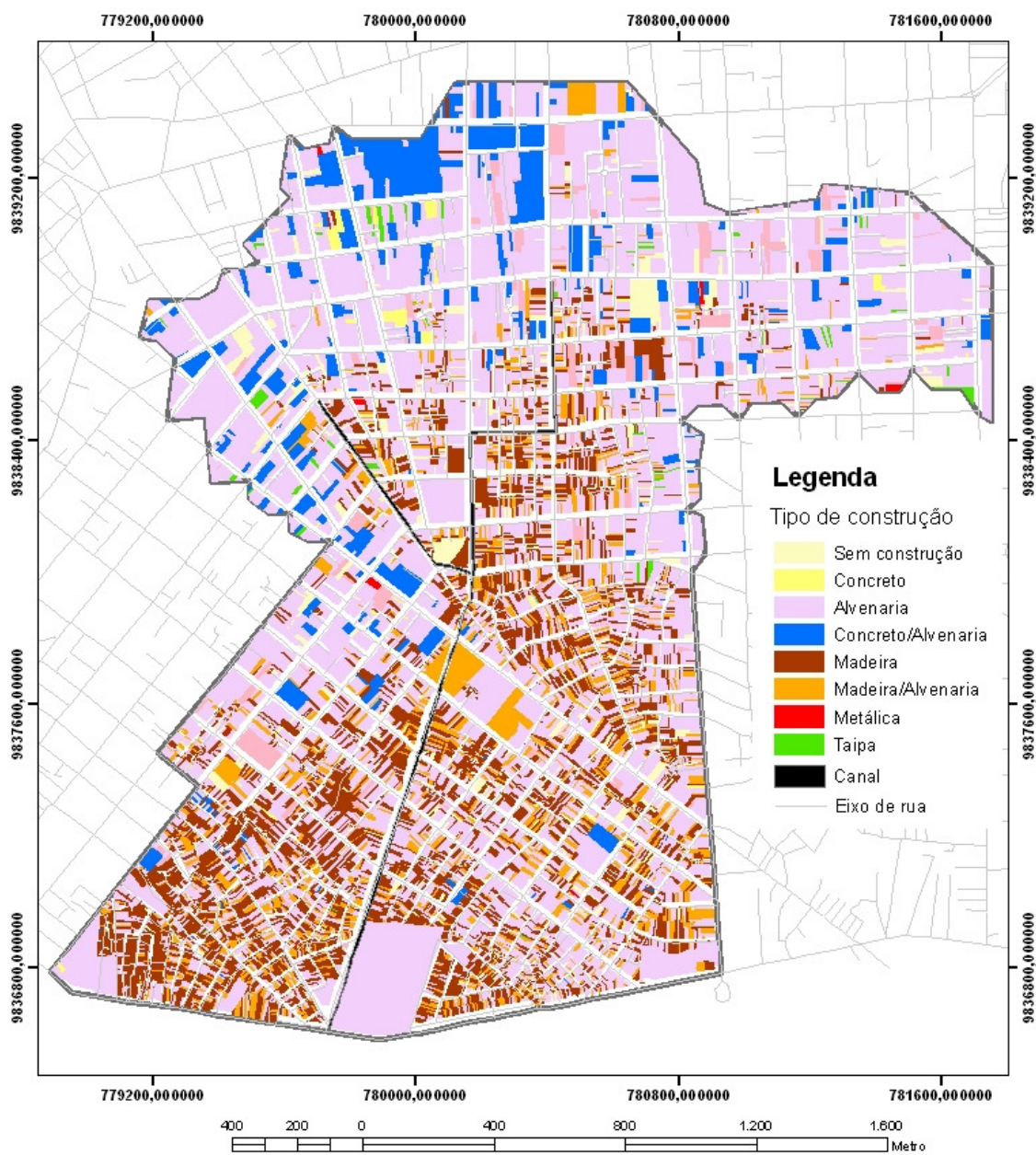


Figura 37. Mapa da distribuição espacial do tipo de construção existente na área do projeto.

Fonte: (CODEM, 1988).

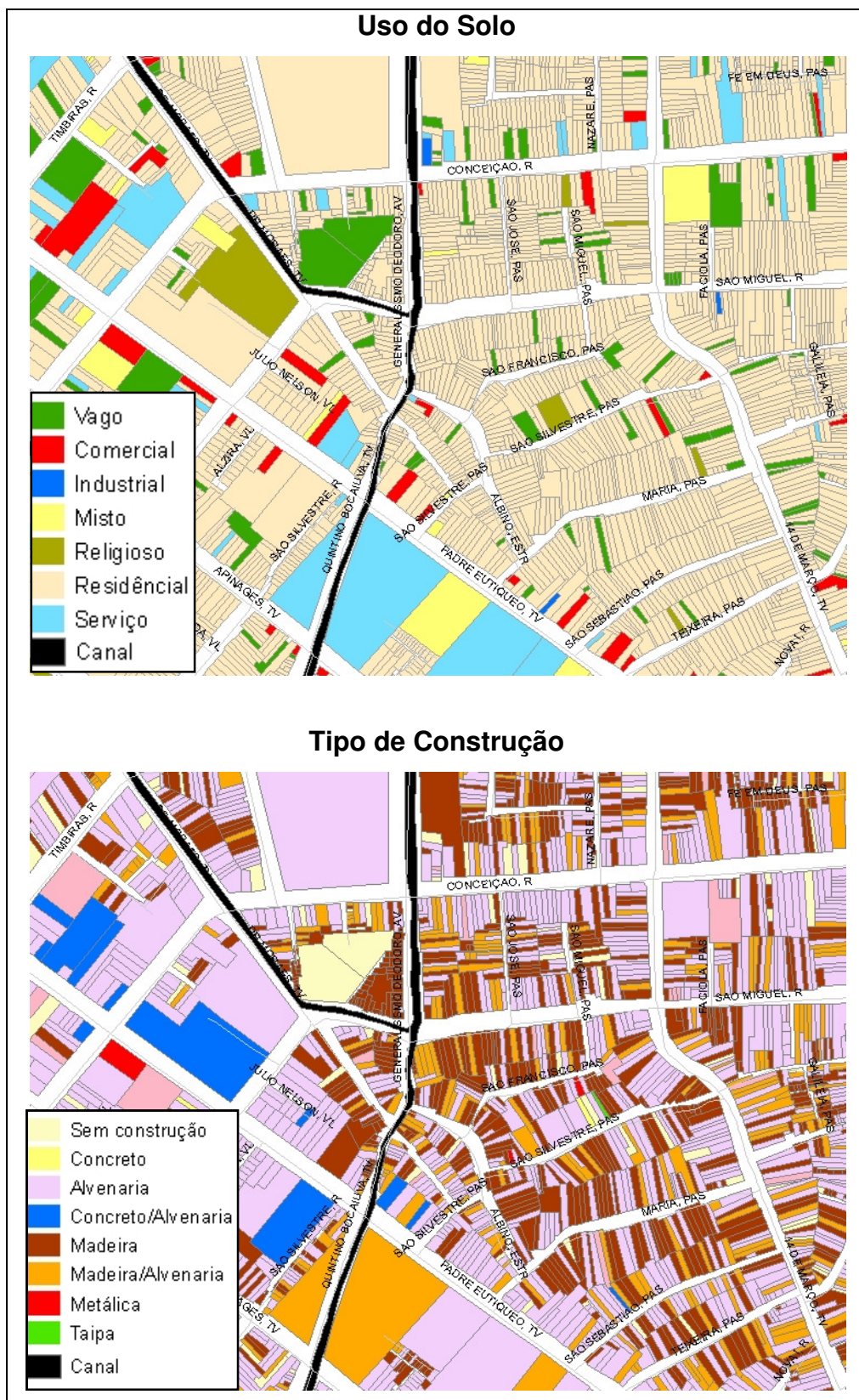


Figura 38. Visualização da distribuição espacial do tipo de uso do solo e de construção das moradias localizadas em uma área considerada crítica em relação a alagamento e inundação.

Por ser tratar de uma bacia urbana, o nível de ocupação é bastante alto, onde aproximadamente 80% do solo se encontra impermeabilizado pelas edificações construídas e pavimentações das vias de acesso. As poucas manchas de vegetação existentes são provenientes de alguns poucos lotes ainda não edificadas e por vegetações plantadas de forma isolada como parte integrante da arborização da cidade como mostra a figura 39.



Figura 39. Mapa de localização de árvores isoladas que compõem a arborização da bacia estudada.

Fonte: (CODEM, 1988).

6.4.3 Morfometria da Bacia

A morfometria da bacia hidrográfica em estudo está representada pelas características e pelos índices apresentados na tabela 18.

Tabela 18. Resultado do cálculo das características morfométricas da bacia hidrográfica.

Características Morfométricas	Valores
Área de Drenagem (km ²)	4,69
Perímetro (km)	12,04
Fator de Forma (F)	0,48
Coeficiente de compacidade (Kc)	1,56
Orientação	Sul
Declividade mínima (%)	0,00
Declividade média (%)	0,67
Declividade máxima (%)	10,38
Altitude mínima (m)	2,98
Altitude média (m)	6,52
Altitude máxima (m)	15,76
Comprimento do curso d'água principal (km)	1,34
Comprimento total dos cursos d'água (km)	3,34
Densidade de drenagem (Dd)	0,71
Tempo de concentração (minuto)	30,88
Tempo de pico (hora)	0,36
Tempo de base (hora)	0,96

A bacia abrange uma área de drenagem de 4,69 km² delimitada por um perímetro de 12,04 km. O curso d'água principal apresenta uma extensão de 1,34 km, que consiste no canal da Trav. Quintino Bocaiúva o qual deságua no canal da Av. Bernardo Sayão e este no Rio Guamá.

A bacia possui um total de 3,34 km de cursos d'água (canais retificados), o que equivale a uma densidade de drenagem igual a 0,71 km/km², caracterizando-a segundo a classificação de Sthraler (1957) como uma bacia de baixa densidade

de drenagem, estando assim mais suscetível à ocorrência de inundações, uma vez que um menor número de canais deverá receber toda a água advinda do escoamento superficial.

Os cálculos efetuados para a bacia em estudo determinou que o fator de forma é de 0,48, onde o formato é algo intermediário entre uma bacia arredondada e uma alongada, conforme verificado na figura 40. Este fato reflete no valor do tempo de concentração calculado com base na equação 15, que foi de 30,88 minutos, ou seja, é o tempo que leva após o início de uma precipitação para ocorrer o pico de vazão máxima da bacia.

O coeficiente de compacidade (K_c) de 1,56 calculado, caracteriza que a bacia hidrográfica em condições normais de precipitação não apresenta risco de inundação, entretanto, em situações de chuvas convectivas intensas associada com a baixa densidade de drenagem, pode provocar grandes inundações.

A figura 41 apresenta as variações altimétricas a cada 1 metro, para toda a área da bacia hidrográfica. A altitude varia entre 2,98 a 15,76 metro, sendo que 56,67% das variações altimétricas se concentram nas cotas abaixo de 4,50 metros.

Uma elevada declividade média de uma bacia hidrográfica, dentre outros fatores tem importante papel no escoamento superficial, promovendo maior velocidade, o que resulta em inundações mais acentuadas. Assim, a magnitude dos picos de inundações depende da rapidez com que ocorre o escoamento superficial, o qual está fortemente relacionado com o relevo.

No entanto, a bacia hidrográfica em estudo está localizada em uma área plana, com uma variação de declividade muito pequena, sendo que grande parte da área (53,97%) apresenta declividade abaixo de 0,5%, conforme observado na figura 42. As áreas mais altas encontram-se no extremo oposto ao exutório da bacia, fato que ajuda reduzir o tempo de concentração, ou seja, o tempo em que leva para que toda a água proveniente da chuva sobre a bacia chegue ao seu ponto de saída, aumentando o risco de alagamento e inundação.

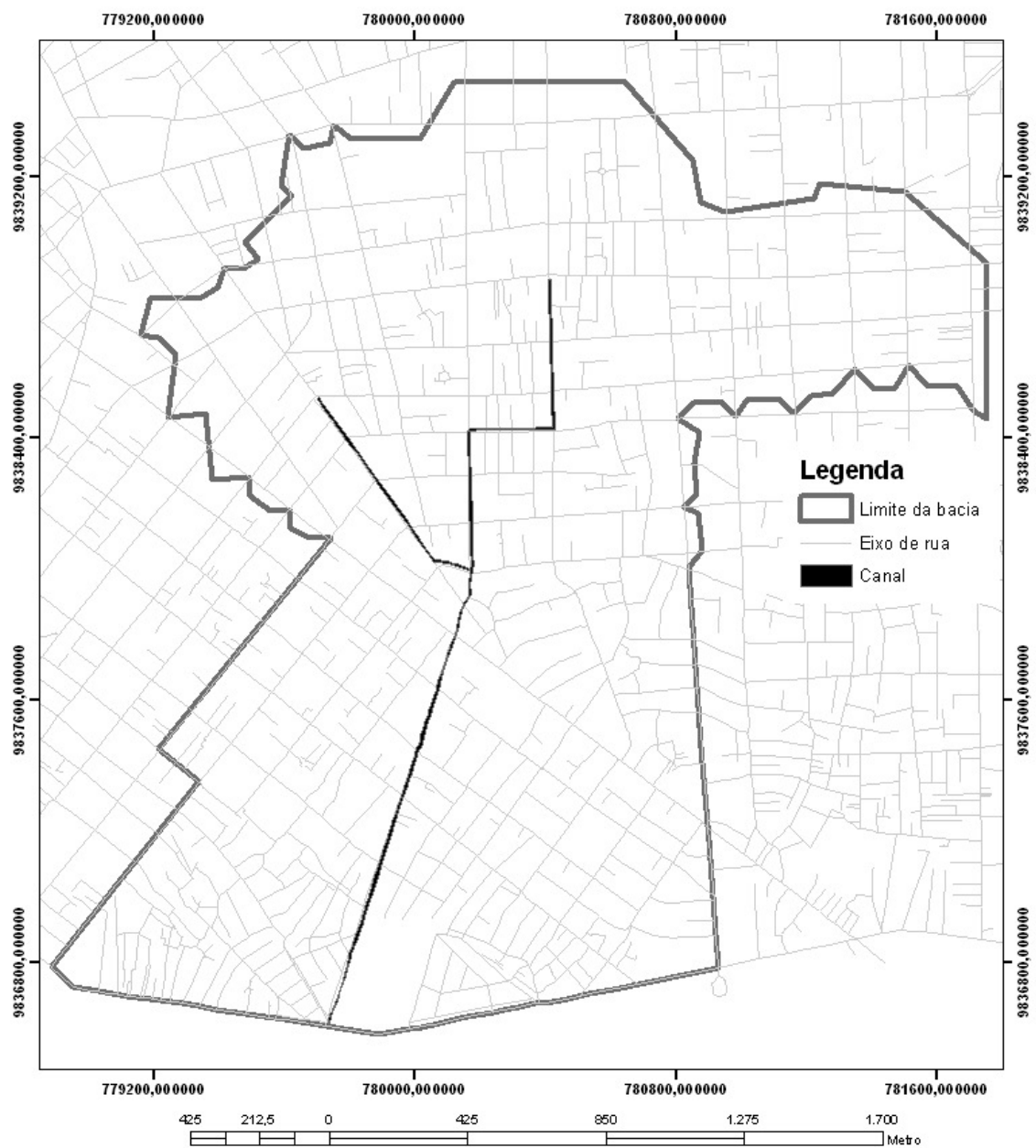


Figura 40. Forma geométrica da bacia hidrográfica do projeto.

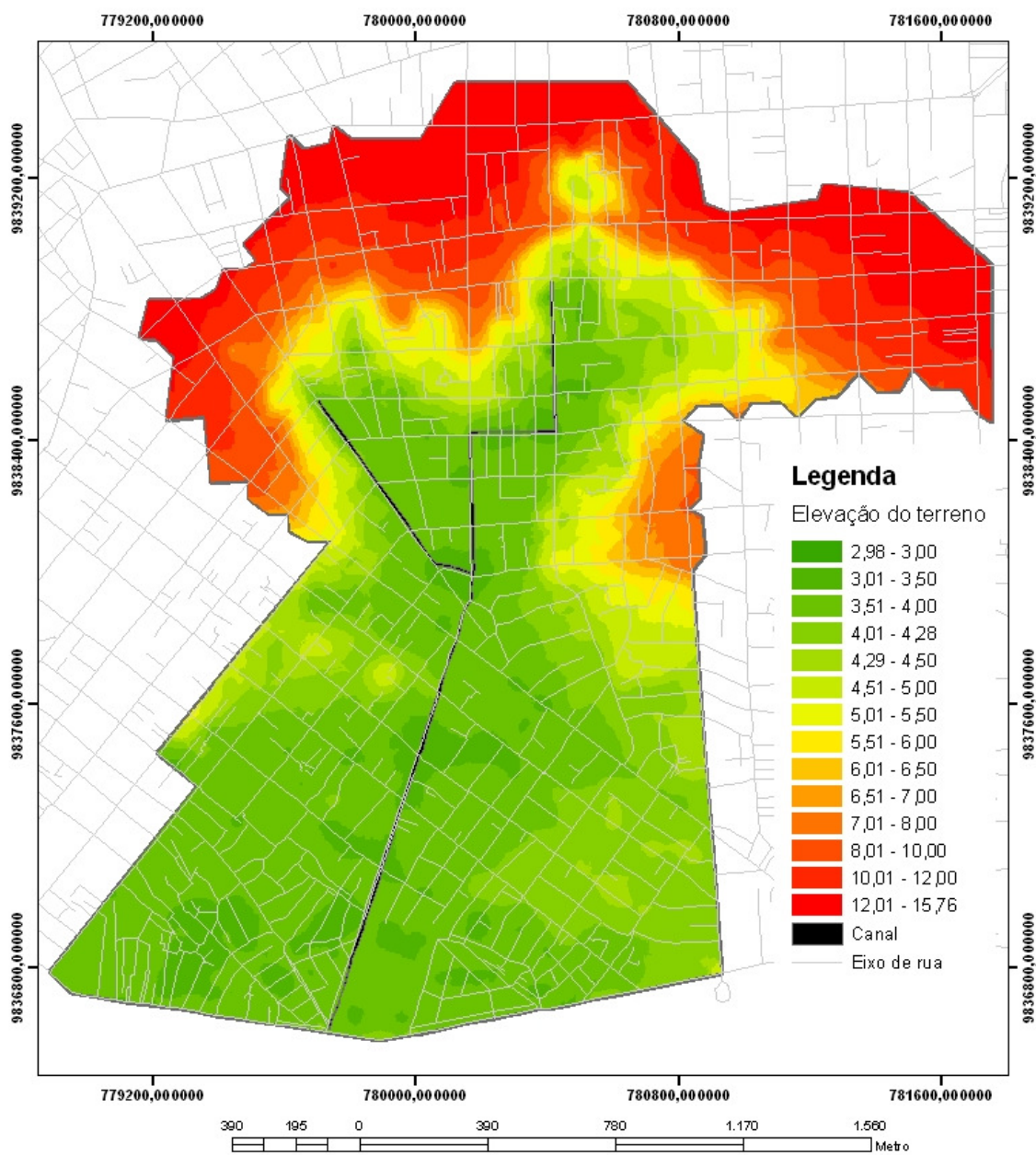


Figura 41. Variação altimétrica determinada pelo modelo digital de elevação do terreno, classificado em intervalo de 1 metro.

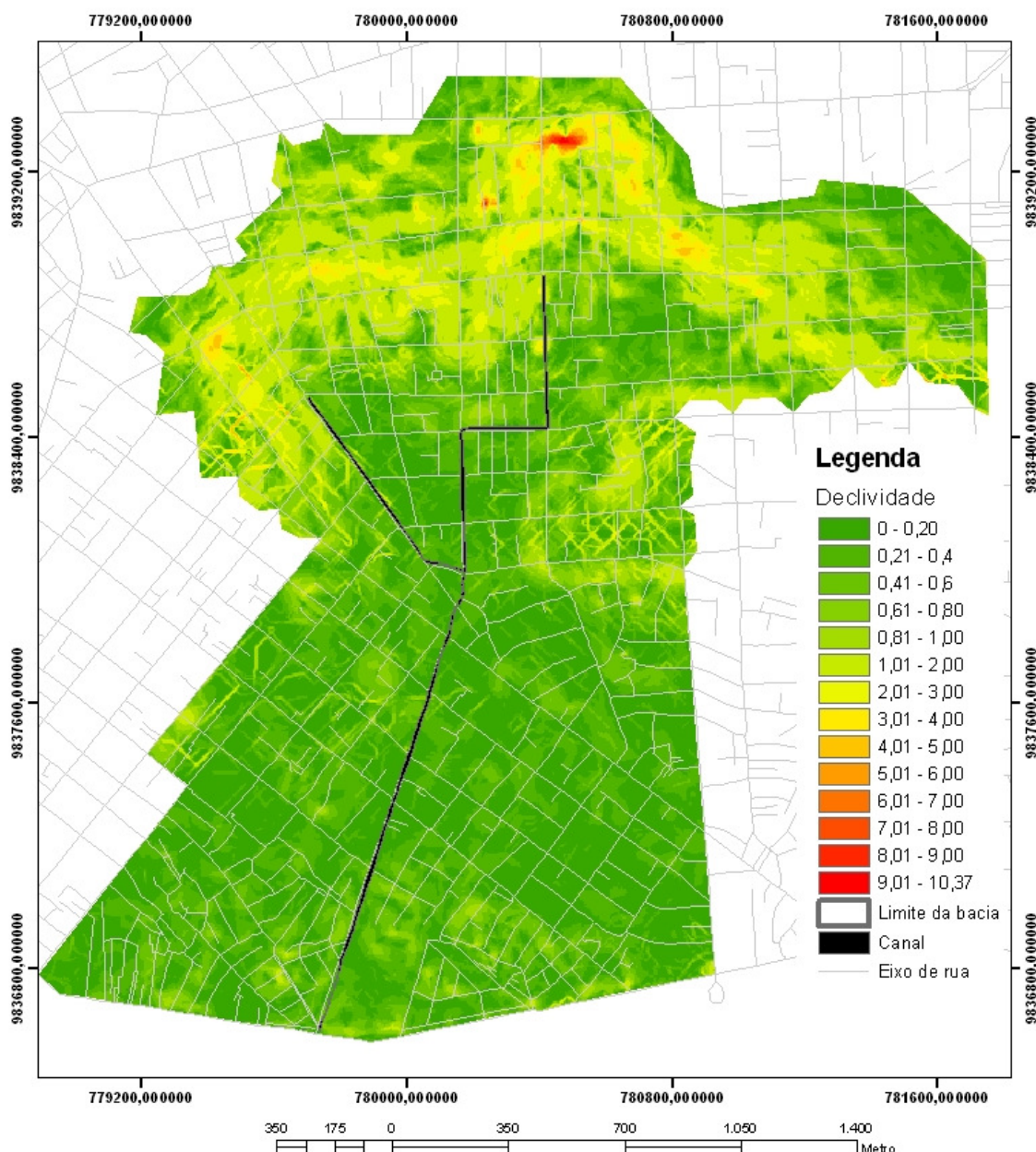


Figura 42. Mapa de declividade da bacia hidrográfica estudada.

Na figura 43 é possível observar a orientação do terreno da bacia em valores agrupados com as oito principais direções cardinais. No quadro 5 pode ser observado o percentual de cada superfície ocupada por classe de exposição do terreno na bacia. Aproximadamente 52,66 % da área total da bacia apresenta exposição do terreno para a direção Sul, no sentido do Rio Guamá.

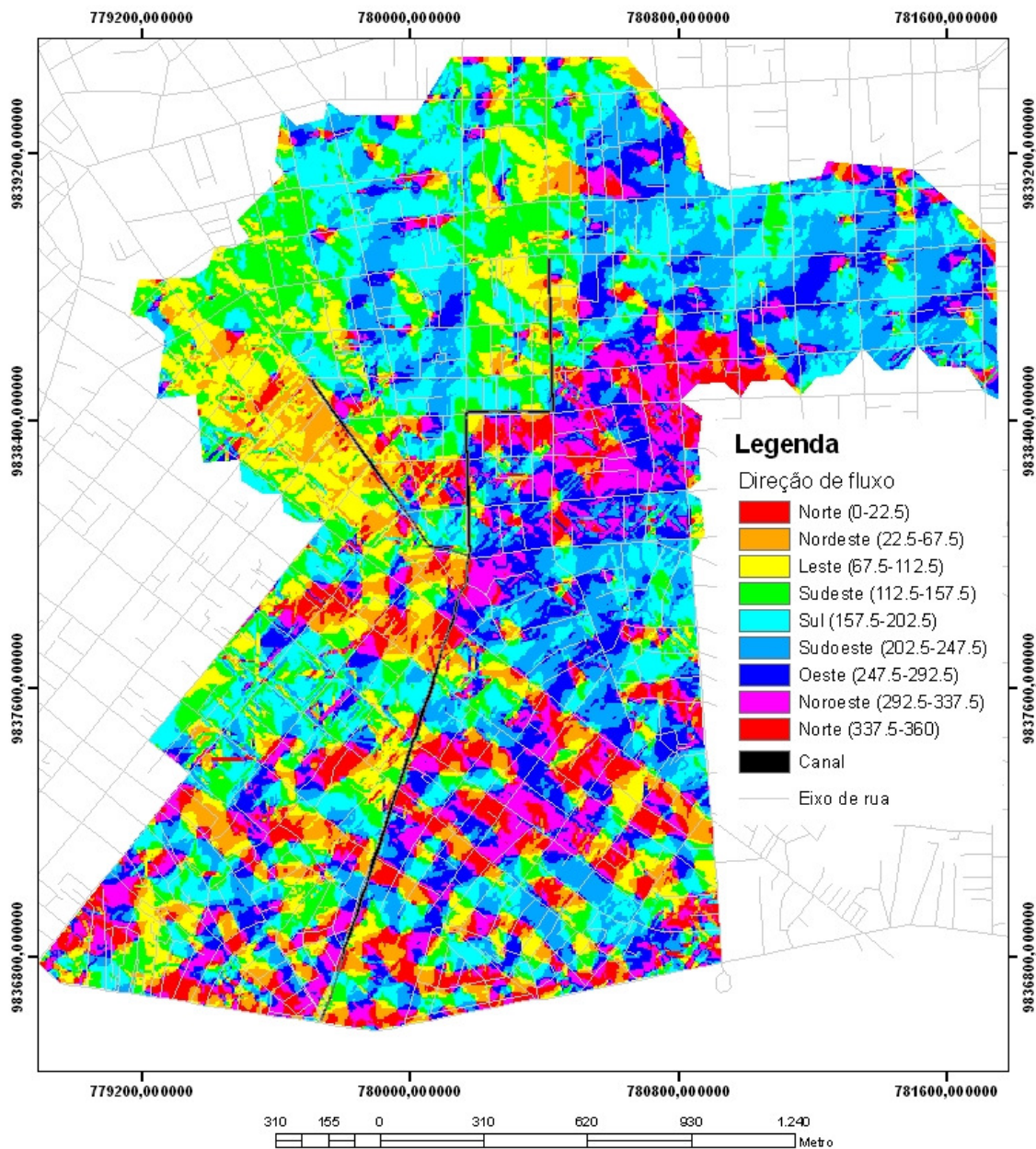


Figura 43. Mapa de exposição do terreno da bacia hidrográfica estudada.

6.5 OS ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES EM BELÉM

O registro das matérias publicadas pela imprensa escrita, foi feito priorizando as situações em que ocorreram chuvas bastante superiores às médias históricas; precipitação concentrada em curto espaço de tempo; precipitações intensas associadas ao nível da maré e de grande abrangência espacial.

Década de 1970

Em 10 de janeiro de 1971 segundo dados da estação meteorológica do INMET (CEASA) choveu em Belém 118,2 mm. Este evento foi registrado na matéria publicada no jornal “A Província do Pará” com o título; “CHUVA ALAGOU QUASE TUDO NA CIDADE”, parte do trecho transcrito abaixo descreve o caos que a cidade viveu.



Quatro horas de chuva à noite de ontem, transformaram a cidade. Os carros ficaram parados e os que se aventuraram nas ruas praticamente alagadas, sofreram dificuldades. Até mesmo na Almirante Barroso com as chuvas da tarde, as pistas estavam inundadas. À noite, a situação se agravou, as águas invadiram o Terminal Rodoviário e levaram a que fosse interditado totalmente. Os bombeiros foram chamados por haver problema mais sério com a casa de força. Ainda os bombeiros tiveram que atender a um chamado na rua Dr. Malcher, onde a casa 142 teve a fachada desmoronada. Uma garota de seis anos ficou ferida.

Matéria publicada em 06 de fevereiro de 1973, no jornal “A Província do Pará” sob o título: “FOI UM RESPEITÁVEL TORÓ”, descreve a respeito da chuva de 75,6 mm que caiu em Belém conforme registrado pela estação meteorológica do INMET (CEASA), e que ocasionou mais uma vez prejuízos à população, segundo recorte do texto abaixo.



Sentada na janela da casa número 3691 da Angustura, quase esquina com a 1º de Dezembro, dona Lídia Machado, de 55 anos, lavadeira, chora sem consolo, indiferente do aglomerado de pessoas que a observa: Seus móveis estão flutuando dentro da casa, invadida pela água da chuva que traz detrito de todas as espécies, fezes e moréias.

No dia 6 de março de 1976, o jornal “A Província do Pará” publicou matéria “CHUVA INUNDOU A CIDADE E PARALISOU O TERMINAL”. Neste episódio, a estação meteorológica do INMET (CEASA) registrou uma precipitação de 22,5 mm. A transcrição de partes do texto matéria descreve o caos ocorrido na época.



O Terminal Rodoviário paralisou as suas atividades em consequência das águas que invadiram a dependência que dá acesso às plataformas de embarque. Lá estão localizados os geradores e as águas ameaçavam invadir a dependência, e poderia causar muito perigo aos usuários. O terminal foi interditado ao público e aos coletivos,

por medida de segurança pela direção e pelo delegado Orlando Sousa que esteve no local.

[...] A maioria das ruas de Belém ficaram inundadas com a torrencial chuva de ontem a noite. Na Pedreira, a Av. Pedro Miranda quase em seu início, próximo a Av. Alcindo Cacela, ficou praticamente intransitável, isto sem contar com outras ruas e travessas do bairro.

Como sempre ocorre, o bairro do Reduto foi o mais prejudicado pela chuva. Na Praça Magalhães a água se elevou a cerca de 30 centímetros. Casas comerciais e residenciais foram invadidas pelas águas.

Década de 1980

Em 04 de março de 1982 o jornal “A Província do Pará” publicou a matéria jornalística: “BELÉM TRANSFORMADA EM ILHA”, relata sobre a chuva de 115,1mm registrada pela estação meteorológica do INMET (CEASA). A transcrição de parte da matéria, relata sobre as conseqüências de uma situação de chuvas incessantes ocorridas em 3 (três) dias consecutivos com valores precipitados na ordem de 10,4 mm, 46,4 mm e 115,1 mm, respectivamente.



Com a chuva que desde a tarde de segunda-feira que cai incessantemente sobre a cidade, Belém ananheceu, ontem, com inúmeros locais totalmente alagados, situação que há muito não era vista. Tanto no centro quanto em bairros da periferia qualquer pessoa que tenha saído de casa pode observar os verdadeiros

lagos que se formaram em alguns pontos, para desespero total dos moradores destes locais.

E embora a “enchente” tenha sido quase que geral naturalmente locais onde canais ou igarapés foram os mais atingidos, chegando mesmo a apresentar uma situação crítica não apenas para o tráfego mas principalmente para as famílias residentes nas proximidades. Mesmo a chuva tendo estiado por volta das 10 horas, cerca das 12 horas muitos pontos da cidade ainda apresentavam-se bem “cheios” d’água, e a situação, apesar de minorada, continuava pela parte da tarde.

Em 19 de março de 1985, matéria jornalística publicada no jornal “A Província do Pará”, com título: “SISTEMA DE DRENAGEM DE BELÉM NÃO RESISTIU DE NOVO À CHUVA”, que conforme transcrição de parte da matéria relata os problemas de alagamentos ocasionados por chuva de 55 mm, registrada pela estação meteorológica do INMET (CEASA) e que não teve a contribuição da maré alta.



Belém foi novamente reprovada no seu sistema de drenagem pela forte chuva que desabou, ontem, causando o surgimento de inúmeras poças d’água em vários trechos da área urbanizada, principalmente nos canais da Doca de Souza Franco e da Almirante Tamandaré, que mesmo sem a contribuição da

maré alta, ficaram transbordando. Verificou-se também em várias partes que as chamadas “Boca-de-Lobo” não permitem o escoamento tranquilo das águas pluviais, dificultando o tráfego e a travessia de pedestres. Assim, em pleno centro de Belém muitas pessoas foram obrigadas a arregaçar as calças para transpor mais essa dificuldade.

A ausência de maré alta foi verificada exatamente no trecho da Avenida Portugal, em frente às Lojas Pernambucanas, que sempre fica inteiramente inundado. Mas apesar do forte temporal de ontem, os veículos puderam transitar sem maiores problemas, o que já não aconteceu no início da Boulevard Castilho França, onde um taxi não conseguiu ultrapassar a poça d’água.

“E BELÉM MAIS UMA VEZ VOLTOU A FICAR SUBMERSO”, título da matéria publicada no jornal “A Província do Pará”, em 02 de fevereiro de 1989. Segundo dados da estação meteorológica INMET (CEASA) a chuva deste episódio foi de 22,8 mm. A matéria jornalística, em parte transcrita abaixo, descreve sobre os problemas ocasionados na cidade decorrente deste evento.



Como já de praxe, depois da chuva de ontem à tarde, Belém ficou submersa durante algumas horas. Semáforos em pane, ruas alagadas, casa com água até na cozinha, foram alguns dos saldos. Mas o descontentamento ficou por conta das condições de trafegabilidade de algumas ruas onde os veículos, mesmo de

grande porte, desistiram de passar. Por volta das 16 horas, uma chuva rápida, mas forte, desabou sob a cidade. Embora o belenense já esteja acostumado com esse inverno, não de temperatura baixa, mas de muita chuva, a todas as vezes que uma chuva mais violenta cai, não há aquele que consiga dar pulos de felicidades, afinal, de uma maneira ou de outra ele é sempre afetado. Se tem carro próprio não consegue atravessar os grandes rios que se formam no meio da rua; se anda a pé não escapa de levar um banho de lama vindo de um veículo que passou próximo, ou se fica em casa, tem que com latas na mão, retirar a água, que sem pedir licença atravessa da sala à cozinha.

Década de 1990

Matéria publicada no jornal “O Liberal” de 22/11/1992 com título “CHEGADA DAS CHUVAS REVIVE UM DRAMA”, relata sobre os problemas recorrentes ocasionados pelas chuvas típicas da época chuvosa. Segundo dados da estação meteorológica do INMET (CEASA) para o dia do episódio registrou-se uma precipitação de 14,9 mm, que ocasionou transtornos de alagamentos e inundações na cidade, conforme parte do relato jornalístico transcrito abaixo.

Belém não está preparado para enfrentar um inverno rigoroso. A constatação pode ser verificada nas ruas da cidade quando chove. [...] Sempre que chove, várias vias da capital ficam bastante alagadas, causando, às vezes, danos físicos e materiais, entre outros problemas.

[...] Wady Homci disse que o programa de macrodrenagem irá retificar os canais existentes em Belém, tornando-os mais largos e com maior capacidade para acumular a quantidade de chuva que cai na cidade, sobre tudo no período em que o sistema de escoamento da cidade estiver paralisado. Durante 3h15, e a cada 12 horas – o ciclo da maré -, o sistema de escoamento da cidade fica paralisado, fazendo com que a água do canal não seja escoado para a Baía do Guajará ou para o Rio Guamá, Só volta ao normal quando a maré começa a baixar.

Observa-se no texto da matéria, o comentário feito pelo secretário municipal Wady Homci, sobre a influência das marés no sistema de drenagem dos canais, interferindo na vazão dos mesmos.

Matéria jornalística publicada no jornal “O Liberal” em 08 de agosto de 1997 sob o título “OITENTA LITROS POR METRO QUADRADO”, retratando o evento pluviométrico da ordem de 79,4 mm. O documentário jornalístico sobre este evento está em parte descrito abaixo.

A combinação da maré alta com a maior chuva registrada nos últimos nove meses em Belém resultou no pior dia de alagamento na cidade desde o reinício do inverno neste final de ano. Ontem, moradores de diversos bairros de Belém sofreram com o mau tempo, que durou por quase toda a tarde. As áreas mais atingidas na periferia e no centro, foram as localizadas nas proximidades dos canais que cruzam toda a cidade.

[...] À espera – duas horas depois do início da chuva de ontem, que desabou a partir das 13h, várias casas localizadas às redondezas do canal da 14 de Março ficaram isoladas pelo alagamento . O curso d'água transbordou para a pista e sobre calçadas nos trechos situados próximos as vias Pariquis e Mundurucus, em Batista Campos.

Vale registrar que o início do evento pluviométrico coincidiu com a hora de pico da maré alta, que atingiu a cota de 3,0 m (NMM²), prejudicando ainda mais o sistema de drenagem dos canais.

Década de 2000

Publicado no jornal “O Liberal” em 16 de abril de 2000, matéria jornalística de título “CHUVA IMPIEDOSA CASTIGA A CIDADE”, onde segundo dados da estação meteorológica do INMET para o dia do episódio registrou uma

² Nível Médio do Mar

precipitação de 133,7 mm, provocando transtornos à população conforme a transcrição de parte da matéria sobre o assunto.

Cinco horas de chuva, iniciada às 4 horas da manhã de sábado, deixaram a maioria dos bairros de Belém literalmente debaixo d'água. Ruas amanhecaram alagadas, os canais transbordaram, carros atolaram e muita gente perdeu tudo o que tinha com a invasão das águas. Chegar atrasado ao trabalho - ou simplesmente nem poder ir - foi considerado "problema menor" para ser resolvido na manhã de ontem na cidade.

[...] Na Rua Fernando Guilhon (antiga Conceição), o transbordamento do canal fez com que o tráfego fosse interrompido. Muitos não ousaram arriscar passar pela rua. Os moradores reclamavam que o problema volta sempre a se repetir cada vez que chove mais forte.

Na Rua Apinagés, no bairro Batista Campos, alguns trechos ficaram praticamente intransitáveis. Empurrando o Gol de uma tia, Pedro Borges, encalhado, reclamava do tempo. "Quem iria prever que ia chover desse jeito?"

Conforme relatado acima, as chuvas deste episódio foram suficientes para fazer com que os canais transbordassem provocando inundações das áreas ao seu entorno, contribuindo para o surgimento de vários pontos de alagamento ocasionados pela impossibilidade do escoamento da água através da rede de drenagem subterrânea devido.

A matéria do jornal "O Liberal" de 30 de março de 2005 de título "TEMPORAL DEIXA AS RUAS ALAGADAS", descrevia os transtornos sofrido pela população de Belém provocada por conta da coincidência da maré alta com a chuva, ocasionando inundações e alagamentos em vários pontos da cidade, tornando intransitáveis algumas ruas e prejudicando o deslocamento da população. A maré alta registrada para esse dia ocorreu por volta das 14h15min atingindo a marca de 3,3 m de altura, e segundo dado da estação meteorológica do INMET, foi registrado no dia do episódio (29/03/2005) uma precipitação de 60,7 mm. A extensão do problema pode ser observada na transcrição do texto jornalístico.



As chuvas de ontem provocaram alagamentos em vários pontos da periferia de Belém. As ruas próximas à baía do Guajará ficaram submersas. Das avenidas às passagens, as conseqüências foram sentidas não só por quem trafegava de carro, mas também pelos ônibus, caminhões, pedestres, ciclistas e ambulantes que se utilizam das vias públicas. A cidade teve seu ritmo modificado e o trânsito ficou

lento em toda a extensão. O Ver-o-Peso encheu com a preamar do início da tarde

de ontem. A chuva acabou coincidindo com as últimas marés altas do mês de março. Bueiros entupidos e o volume de lixo nas laterais dos canais e calçadas fazem com que as águas não seguissem o curso normal.

Moradores no entorno dos canais da Avenida Almirante Tamandaré e das Travessas Quintino Bocaiúva, São Joaquim e Tucunduba mais uma vez tiveram que conviver com as conseqüências das fortes chuvas. Os alagamentos também aconteceram ao longo da Avenida Bernardo Sayão e nas respectivas passagens de acesso ao bairro periférico. Trechos das Avenidas Pedro Álvares Cabral, Marechal Hermes, Roberto Camelier, Duque de Caxias e Arthur Bernardes também ficaram embaixo d'água. Bairros do Reduto e Comércio tiveram pontos de estrangulamento do trânsito. O bairro da Terra Firme também foi afetado, principalmente, o conjunto Orquídea que teve suas passagens totalmente interrompidas. Moradores ficaram ilhados. [...] A opção proporcionou a alegria para as crianças da passagem na Terra Firme. Para os irmãos Cristina e Márcio Pires, a situação é séria. No local, crianças ficam doentes com frequência. “Em época de chuva, a situação piora muito. Aqui não somos vistos pelo poder público”, comentou Cristina.

No dia 26 de abril de 2005 sob o título “A MAIOR CHUVA EM 100 ANOS”, o jornal “O Liberal” relatou que segundo o INMET o volume de água que caiu em Belém correspondia a metade do que deveria chover todo o mês de maio. No dia desse episódio (25/05/2007) foi registrado pela estação meteorologia do INMET, uma precipitação de 200,8 mm, enquanto que no mês o acumulado foi de 564,1 mm. Na transcrição de partes da matéria jornalística pode-se observar o caos que se transformou a cidade.

[...] Foram 17 horas de chuva quase ininterruptamente. [...] A chuva começou às 11h31min e parou às 12h14min. Mas foi só uma trégua para o período de maior intensidade, verificado entre as 13h34min e às 15h27min. Alterando maior e menor frequência, a chuva voltou a cair às 23h e só parou por completo às 6h da manhã de ontem.

[...] A chuva levou pelo menos 47 pessoas a pedirem socorro ao Corpo de Bombeiros. A maioria era para a retirada da água que invadiu casas durante o temporal.

[...] O titular da Secretaria Municipal de Saneamento (SESAN), Luís Otávio Pereira, que “não havia nada a fazer” ao comentar o caos provocado pela chuva. Ele contestou acusações de moradores de que os alagamentos foram frutos da falta de limpeza da rede de esgoto e disse que a programação da limpeza não será alterada. Para o secretário, a situação era inevitável por causa dos índices pluviométricos considerados acima do normal.

No jornal “O Liberal” de 28 de abril de 2007 publicou a seguinte matéria: “CHUVA E MARÉ ALTA, BELÉM NO FUNDO”. Neste mês a estação meteorológica do INMET registrou um acumulado de 472,3 mm. O texto do jornal comenta justamente a coincidência de uma chuva forte com o pico da maré alta.



A chuva de ontem à tarde castigou a cidade. Vários bairros sofreram com os alagamentos. De acordo com informações da Secretaria Municipal de Saneamento (Sesan), a situação agravou-se porque coincidiu com a maré alta, o que fez com que canais transbordassem e a água invadisse algumas casas. Houve até quem aproveitou o 'rio' que se formou em algumas ruas do centro de Belém para

dar uma voltinha de caiaque.

A cena inusitada, na qual um caiaque dividia espaço com veículos, foi vista na Rua dos Pariquis, próximo a Travessa 14 de março, onde o jovem Pablo Sérgio da Silva Pinto, de 19 anos, resolveu brincar no alagamento. 'Eu ganhei esse caiaque da dona de uma loja, que é minha vizinha. Ele estava para conserto e quando vi esse 'rio' aqui resolvi colocá-lo na rua para brincar', contou o morador, que 'navegou' em seu mais novo brinquedinho até a rua dos Caripunas, próximo a avenida Generalíssimo Deodoro.

Na Rua dos Caripunas, a chuva e os fortes ventos derrubaram uma árvore, que ficou atravessada na pista, deixando pouco espaço para o tráfego de carros e pedestres. Muitos tiveram que tirar seus sapatos e encarar o alagamento, que ficou acima dos joelhos. As crianças tiveram que ser carregadas.

O guarda municipal Alexandre Ricardo de Freitas Santos, de 28 anos, e a mulher Ana Carla Pereira dos Santos, de 26 anos, foram juntos buscar os filhos numa creche da Legião da Boa Vontade (LBV), localizada às proximidades da Rua dos Caripunas, e tiveram que se preparar para enfrentar o alagamento. 'Aqui sempre alaga quando chove. Umás vezes mais, e outras menos, mas sempre alaga', disse o guarda. 'Tivemos que tirar nossos sapatos e carregar nossos filhos para poder atravessar e, mesmo assim, olha só como estamos molhados', acrescentou a esposa, mostrando a roupa de todos.

Em 9 de maio de 2007, o jornal "O Liberal" divulgou "CHUVA ALAGA RUAS E CONGESTIONA TRÂNSITO". Foi registrada pela estação meteorológica do INMET uma precipitação de 45,7 mm para o dia do episódio (08/05/2007). Na transcrição de parte da matéria, observa-se que apesar da chuva não ter coincidido com a maré alta, os transtornos causados a população foram prejudiciais a população que vive próximo as áreas de influência dos canais.

A chuva de ontem à tarde alagou várias ruas e avenidas de Belém e provocou congestionamentos no trânsito. O canal da Travessa 14 de Março, em Nazaré, transbordou e causou transtornos para os moradores.

A comerciária Nivalda Monteiro do Vale, de 54 anos, mora à Travessa 14 de Março há 25 anos e diz que já espera mais por melhorias na área. De acordo com ela, há mais de dois meses não é feita a limpeza no canal. 'E olha que hoje (ontem) não houve coincidência de chuva com maré alta. O canal transbordou porque está sujo mesmo', reclamou a moradora.

As queixas dos moradores são muitas. 'A travessa fica alagada com qualquer chuvinha', disse uma moradora que estava nervosa com a água que invadiu a casa dela. Ela não quis se identificar.

O ajudante de pintor de carros, Davi Alexandre Queiroz dos Santos, de 19 anos, esforçou-se, mas acabou conseguindo passar de bicicleta pelo local. 'Esse canal está entupido. É um absurdo que a gente tenha que enfrentar essa situação todas as vezes que chove', disse.

A rua dos Pariquis, que sempre alaga durante as chuvas, também ficou debaixo d'água. O trânsito no local ficou lento e vários motoristas deram a ré nos veículos e passaram a trafegar na contramão para escapar do alagamento na área.

Maria de Nazaré Durães, de 34 anos, que mora à travessa 14 de Março com a Rua dos Caripunas, há cinco anos, disse que caminhou com água com os filhos desde que passou pela Rua dos Pariquis. 'Eu fui buscar meus filhos na escola e não teve jeito. Eles estão tendo que caminhar por dentro dessa lama. Não há outro jeito. Eles vivem com vermes por conta dessa situação', disse a mulher, que estava com os filhos pequenos.

Os canais da travessa Pirajá e da Antônio Baena, às proximidades do campus da Universidade da Amazônia (Unama), não transbordaram. Mas as ruas ficaram com pontos de alagamento e também causaram transtornos aos seus moradores e a quem trafegou pelos dois locais.

A assessoria de imprensa da Secretaria Municipal de Saneamento (Sesan) informou que o canal da Travessa 14 de Março já foi limpo pelos funcionários da secretaria. Porém, segundo a assessoria, o canal pertence à Bacia da Estrada Nova, onde há um maior acúmulo de lixo e entulho, o que ocasiona o transbordo do mesmo e alagamentos na área. Por esse motivo, a assessoria informa que a secretaria está com limpeza para o canal agendada para o final deste mês. A informação da Sesan é que o órgão está cumprindo um cronograma de limpeza em todos os canais da cidade.

Em 5 de março de 2009, o jornal "O Liberal" publicou a matéria "Em Belém - Famílias passam o dia na limpeza pesada de casas e calçadas em vários bairros", referente a chuva da ordem de 49,0 mm que caiu sobre a cidade no dia anterior de intensidade calculada em 35,6 mm/h. Os estragos decorrentes desse episódio podem ser dimensionados através da transcrição de parte da matéria jornalística.

O dia seguinte ao temporal de anteontem foi de limpeza pesada para os moradores dos bairros da Grande Belém que sempre sofrem com os alagamentos. Ontem pela manhã, a lama e a sujeira ainda encobriam parte das calçadas e das pistas dos cruzamentos da Travessa 14 de Março com a Rua dos Pariquis, Pariquis com a Travessa Quintino Bocaiúva e Rua dos Timbiras com a Apinagés.

Os moradores da área do canal da 14 de Março são alguns dos prejudicados pelos alagamentos. 'Não precisa cair uma chuva muito forte para o canal transbordar. É que o canal está entupido. A rua amanheceu hoje (ontem) suja e a gente é obrigado a limpar', reclamou a moradora Edmilza Prata.

Na Pariquis com a Quintino, a dona Domingas da Silva se compadeceu do funcionário da prefeitura que fazia a limpeza da sua calçada e resolveu ajudá-lo a varrer o chão. "A rua alaga toda vez que chove por causa dos bueiros entupidos.

Não tem porque não ajudar o moço, que tem que fazer a mesma coisa toda vez que chove, não é?”, disse.

Na esquina da Timbiras com Apinagés, Flávio César, que presta serviços gerais para uma das casas da rua, conta que toda chuva forte é sinônimo de dor de cabeça. “É muito barro que acumula e transborda. Isso acontece por causa dos bueiros, que são entupidos pela própria população. As pessoas têm que conscientizar que, por menor que o lixo seja, ele vai ocupar espaço e ajudar a obstruir os buracos. Se todos pensassem assim, não teríamos mais cenas como essa”, disse ele, que limpava um trecho da rua.

Observa-se que os alagamentos e inundações em Belém na maioria das vezes sempre estão associados a intensidade da precipitação e a maré alta. Esse problema será melhor avaliado através de alguns estudos de casos selecionados, no modelo de elevação digital do terreno e pelo modelo hidrológico.

6.5.1 Seleção e análise de casos

Neste tópico, foram selecionados alguns dos episódios de alagamentos e inundações ocorridos em Belém para análise associada do comportamento da precipitação e da maré durante o período de ocorrência do primeiro evento. Foi realizada a leitura e análise dos pluviogramas diários registrados pela estação meteorológica do INMET(CEASA), calculada a intensidade pluvial correspondente e plotado em forma de gráfico a cada intervalo de 10 (dez) minutos. Os dados de nível da maré para as horas antecedente e posterior ao evento pluviométrico foram gerados a partir do software WXTide32, ajustado para as condições locais.

Episódio ocorrido em 29 de março de 2005

O ano de 2005 foi considerado como muito chuvoso, com total anual de 3.528,8 mm e mês de março de 413,9 mm. Um evento pluviométrico da ordem de 50,6 mm e de intensidade registrada da ordem de 41,6 mm/h, provocou alagamento e inundações em diversos pontos de Belém (Jornal “O Liberal”, 30.03.2005). Observa-se na figura 45 que a maior intensidade de chuva ocorreu durante o período em que a maré havia atingido seu nível máximo. A combinação desses fatos faz com que o nível elevado do Rio Guamá funcione como um obstáculo à vazão do canal de drenagem, e influencie na proporção dos alagamentos e inundações em Belém.

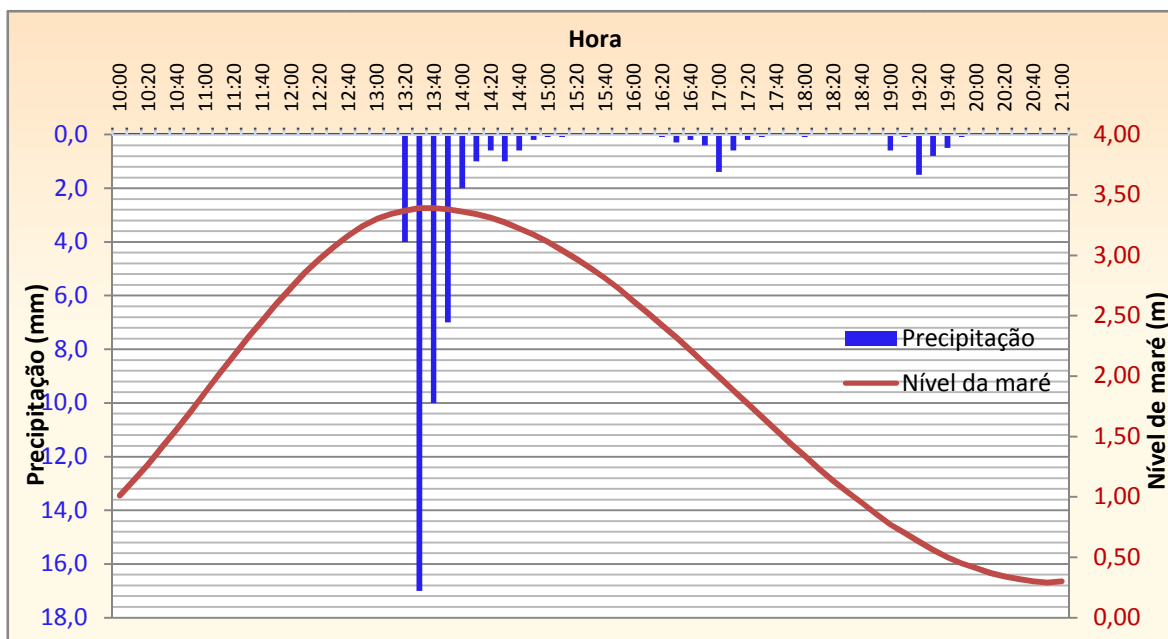


Figura 45. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 29/03/2005.

Episódio ocorrido em 14 de março de 2006

Assim como o ano anterior, o ano de 2006 também foi muito chuvoso, com registro de um total anual de 3.663,7 mm, e de 685,6 mm para o mês de março. O evento pluviométrico da ordem de 17,0 mm e de intensidade máxima calculada da de 7 mm/h, apesar de menos intenso do que o anteriormente relatado, também provocou vários pontos de alagamentos e inundações em diversas áreas de Belém (Jornal “O Liberal”, 15.03.2006). Observa-se na figura 46 que a chuva teve aproximadamente 1 hora de duração, iniciou às 10h30min da manhã e se prolongou até as 11h30min, sendo que neste período de tempo a maré do Rio Guamá estava próximo de atingir seu nível máximo (preamar) naquele dia, o que certamente contribuiu para dificultar o escoamento da água precipitada. Este episódio evidencia o problema da coincidência da chuva com a maré alta. Neste caso em particular, observa-se que mesmo com a ocorrência de precipitações moderadas, inferiores a 20 mm, é possível a ocorrência de alagamentos e inundações na cidade, em parte se dá, devido a coincidência da ocorrência de chuvas com o nível alto do Rio Guamá, que funciona como redutor da vazão do canal da Quintino Bocaiúva.

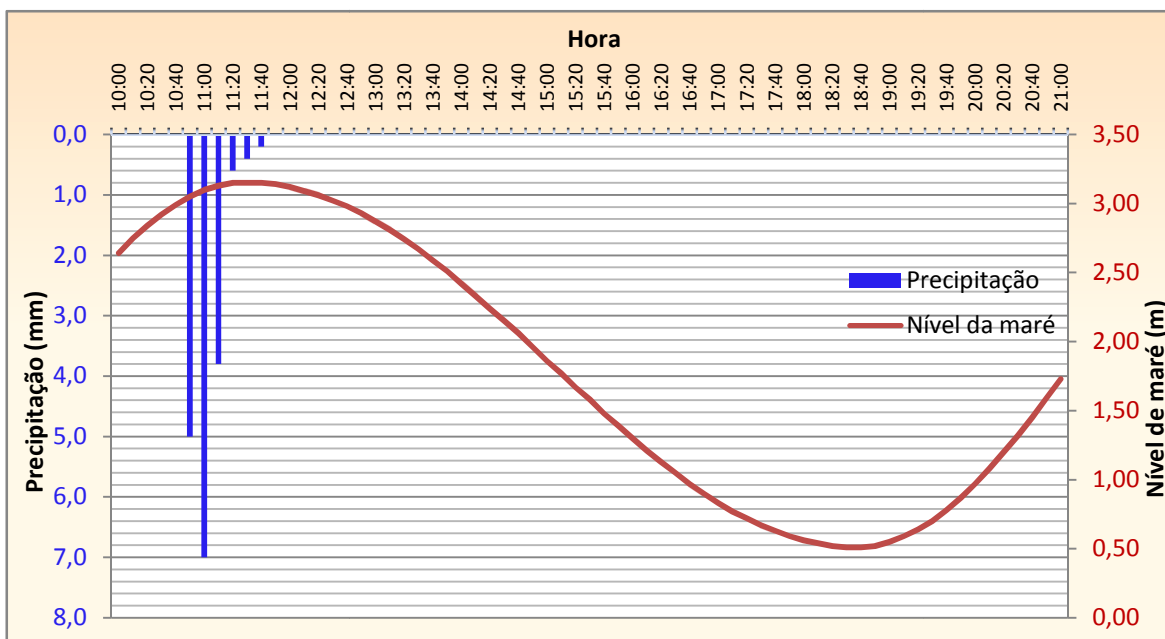


Figura 46. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 14/03/2006.

Episódio ocorrido em de 29 de março de 2006

Trata-se de evento pluviométrico da ordem de 55,5 mm ocorrido durante um período de tempo de aproximadamente 10h, tendo sido registrado três picos de intensidade máxima de 12 mm/h, 26,4 mm/h e 9,8 mm/h respectivamente, provocando inundações em diversos pontos de Belém. (Jornal “O Liberal”, 30.03.2006). Na figura 47, observa-se que o primeiro pico da chuva ocorreu próximo do horário em que a maré iria atingir o nível máximo (preamar), por volta das 11h da manhã. Uma nova pancada de chuva veio ocorrer a partir das 15h, mais intensa que a primeira, porém, neste momento o nível da maré do Rio Guamá estava descendo (cota abaixo de 2 m), sendo que a chuva se prolongou até as 20h30min com alguns intervalos entre uma pancada e outra. Neste caso específico, observa-se que este padrão de sequência de precipitações, durante um período de tempo mais prolongado, tendo como característica intervalos de tempo entre as mesmas, é propenso a ocasionar alagamentos e inundações na cidade devido a diminuição da capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo já encharcado, aumentando dessa maneira, o escoamento superficial, cuja magnitude que se torna em geral superior a vazão do canal de drenagem principal da bacia.

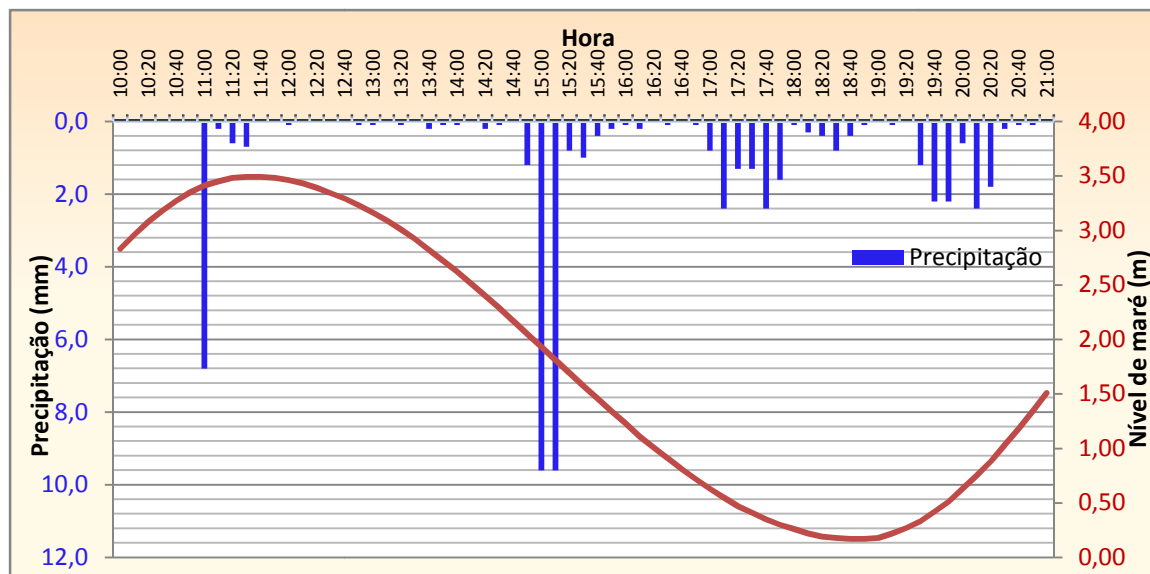


Figura 47. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 29/03/2006.

Episódio ocorrido em 27 de março de 2007

No ano de 2007, segundo dados da estação meteorológica do INMET, foi registrado um total pluviométrico da ordem de 3.310,5 mm, e para o mês de março 433,3 mm. Neste mês, ocorreu evento pluviométrico da ordem de 35,8 mm e de intensidade máxima calculada da ordem de 21 mm/h, provocando inundações em diversos pontos da cidade (Jornal “O Liberal”, 28.03.2007). Observando o gráfico da figura 48, constata-se que este evento pluviométrico ocorreu no decorrer do tempo em que o nível da maré do Rio Guamá encontrava-se na sua cota mínima (baixa-mar), e teve aproximadamente duração de 2 horas contínuas. Diferentemente dos casos anteriormente analisados, este tipo de episódio mostra que mesmo quando o nível da maré não exerce nenhuma influência no escoamento dos canais, podem ocorrer alagamentos e inundações em Belém. Uma das explicações para este fato está relacionada com a duração e a intensidade da chuva, proporcionando com isto um intenso aumento no escoamento superficial. Outro aspecto a considerar, que influencia este tipo de situação, esta pode estar relacionado com a baixa eficiência da atual rede de drenagem subterrânea da cidade e ao assoreamento dos canais ocasionado pelo excesso de lixo depositado no fundo do seu leito, como também, flutuando em sua superfície, reduzindo desta forma a capacidade de retenção e escoamento de água destes canais.

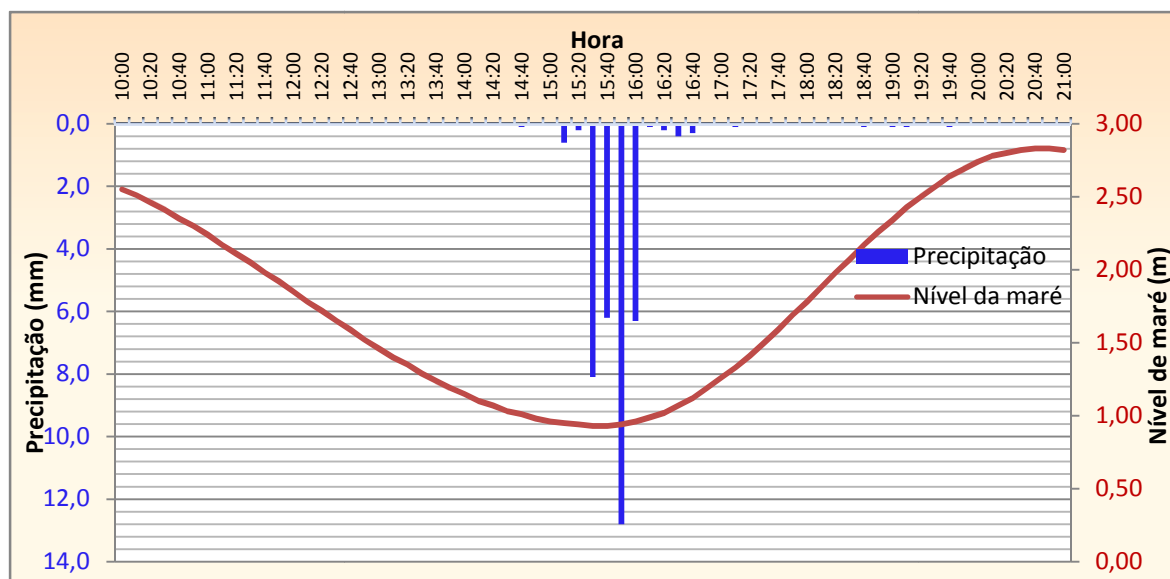


Figura 48. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 27/04/2007.

Episódio ocorrido em 27 de abril de 2009

Trata-se de evento pluviométrico ocorrido no ano de 2009, quando foi registrado pela estação meteorológica do INMET um total pluviométrico de 3.477,6 mm, e um acumulado para o mês desse evento na ordem de 469,9 mm. Na ocasião, foi registrado um evento pluviométrico de 48,7 mm e de intensidade calculada da ordem de 31,6 mm/h, provocando inundações em diversos pontos de Belém (Jornal “O Liberal”, 28.04.2009). No instante em que iniciou a precipitação, o nível do Rio Guamá encontrava-se baixando, porém ainda apresentava cota superior a 3 m (figura 49). Mais uma vez, observa-se o fato da coincidência entre os dois eventos, precipitação e nível alto da maré, onde o segundo exerce uma forte influência sobre as condições do escoamento do canal de drenagem da Quintino Bocaiúva, ocasionando uma redução da vazão do mesmo e proporcionando a ocorrência de alagamentos e inundações na cidade.

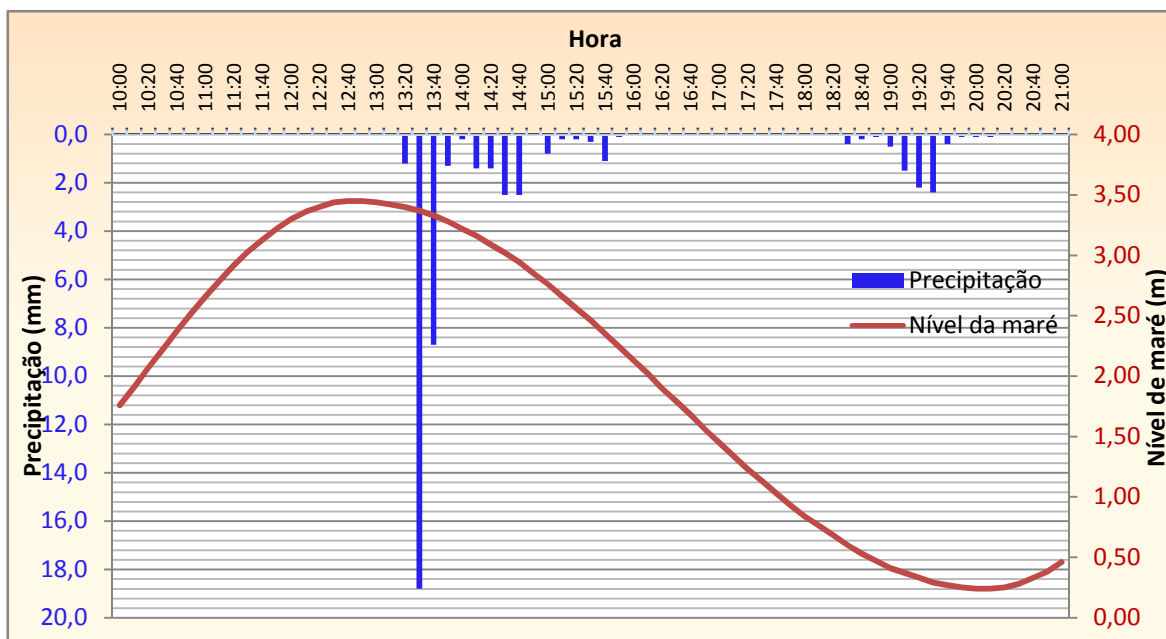


Figura 49. Dado pluviométrico e de maré correspondente a data de 27/04/2009.

6.6 VAZÃO DO CANAL DA QUINTINO BOCAIÚVA

Para a determinação da vazão do canal da Quintino foram feitas coletas em campo de dados na secção da bacia das seguintes variáveis hidrológicas: i) morfologia do fundo do canal, ii) profundidade, iii) área e perímetro da secção e da secção molhada e iv) velocidade do fluxo de água no canal.

Na figura 50, é mostrada a morfologia do fundo do canal obtida a partir dos dados coletados em campo (tabela 19).

Com base na equação 7, obteve-se que a área calculada para a vertical da secção transversal é de 18,94 m² e da vertical da secção molhada é de 13,33 m² (tabela 20).

Tabela 19. Dados de profundidade para determinação vertical da secção e da vertical da secção molhada do canal com base no levantamento de campo realizado na data de 27/04/09.

Secção	Vertical da secção (m)	Vertical da secção molhada (m)	Secção	Vertical da secção (m)	Vertical da secção molhada (m)
0	0.20	0.00	7	1.83	1.40
0.5	0.40	0.00	7.5	2.00	1.57
1	0.60	0.17	8	2.10	1.67
1.5	1.00	0.57	8.5	2.04	1.61
2	1.21	0.78	9	1.96	1.53
2.5	1.42	0.99	9.5	1.83	1.04
3	1.50	1.07	10	1.80	1.37
3.5	1.49	1.06	10.5	1.34	0.91
4	1.71	1.28	11	1.09	0.66
4.5	2.00	1.57	11.5	0.96	0.53
5	2.04	1.61	12	0.65	0.22
5.5	1.99	1.56	12.5	0.46	0.03
6	2.04	1.61	13	0.28	0.00
6.5	1.91	1.48	13.5	0.13	0.00

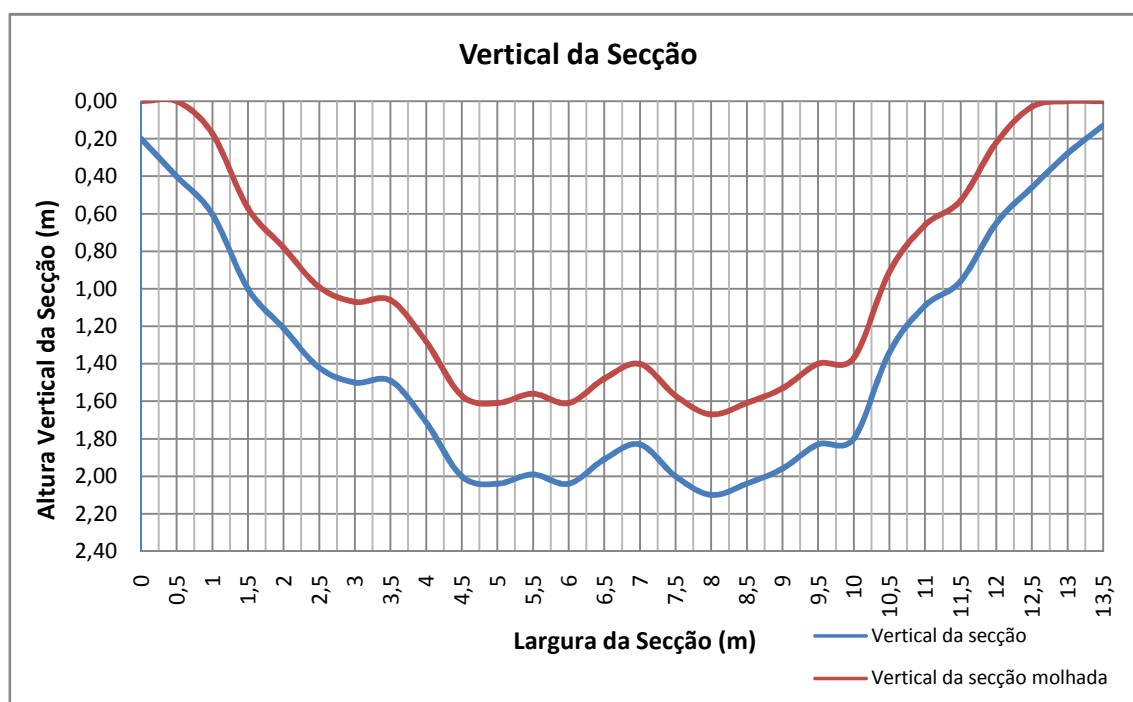


Figura 50. Vertical da secção transversal, secção molhada e morfologia do fundo do canal da Quintino Bocaiúva.

Tabela 20. Cálculo da área total da secção transversal e secção molhada a partir dos perfis verticais.

Secção	Vertical da secção (m)	Vertical da secção molhada (m)	Área secção (m ²)	Área secção molhada (m ²)
0	0,20	0,00	0,15	0,00
0,5	0,40	0,00	0,25	0,04
1	0,60	0,17	0,40	0,19
1,5	1,00	0,57	0,55	0,34
2	1,21	0,78	0,66	0,44
2,5	1,42	0,99	0,73	0,52
3	1,50	1,07	0,75	0,53
3,5	1,49	1,06	0,80	0,59
4	1,71	1,28	0,93	0,71
4,5	2,00	1,57	1,01	0,80
5	2,04	1,61	1,01	0,79
5,5	1,99	1,56	1,01	0,79
6	2,04	1,61	0,99	0,77
6,5	1,91	1,48	0,94	0,72
7	1,83	1,40	0,96	0,74
7,5	2,00	1,57	1,03	0,81
8	2,10	1,67	1,04	0,82
8,5	2,04	1,61	1,00	0,79
9	1,96	1,53	0,95	0,73
9,5	1,83	1,40	0,91	0,69
10	1,80	1,37	0,79	0,57
10,5	1,34	0,91	0,61	0,39
11	1,09	0,66	0,51	0,30
11,5	0,96	0,53	0,40	0,19
12	0,65	0,22	0,28	0,06
12,5	0,46	0,03	0,19	0,01
13	0,28	0,00	0,10	0,00
13,5	0,13	0,00	0,03	0,00
TOTAL			18,94	13,33

6.6.1. Dados de Vazão do Canal

A determinação da vazão de saída da bacia no canal principal foi realizada para dois momentos distintos, um correspondente ao período mais chuvoso, que aconteceu no dia 27/04/09, e o outro referente ao período menos chuvoso, no dia 22/08/09. Para ambas as datas as medidas de campo foram realizadas a cada intervalo de 1 (uma) hora. Nas duas datas estudadas, observa-se a existência de uma vazão positiva que corresponde ao fluxo de água saindo do canal em direção

ao Rio Guamá e a vazão negativa, correspondente ao fluxo de entrada de água no sentido do Rio Guamá para o canal. Isto ocorre devido o fato de não existir nenhum sistema de comporta funcionando para conter a entrada da água do Rio Guamá durante a elevação do seu nível, induzida pelo efeito da maré oceânica. Este tipo de fenômeno varia entre localidades, especificamente em Belém, no Rio Guamá. Segundo observações realizadas na régua instalada no trapiche localizado próximo ao restaurante da UFPA (foto 4), as variações entre uma baixa-mar e preamar é de aproximadamente 6h23min, e entre uma preamar e uma baixa-mar é de aproximadamente 7h37min.



Foto 4. Localização da régua linimétrica instalada no Rio Guamá próximo a restaurante (R8) da UFPA.

Campo do dia 27/04/09 - Estudo de caso: Vazão do canal com ocorrência de chuva

O registro da velocidade do fluxo de água no canal correspondente a cada vertical da secção molhada foi realizado através do uso de um molinete, em intervalos de 1 (uma) hora, durante um período de 7 (sete) horas de coleta de dado em campo (quadro 6).

Quadro 6. Medidas das velocidades do fluxo de água obtidas a 60% de profundidade do canal referente às verticais das secções molhadas obtidas no trabalho de campo executado na data de 27/04/09.

Vertical da secção												
Hora	1		2		3		4		5		6	
	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.
	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)
11:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,05	0,54	0,06	0,56	0,17	0,60	0,17
12:00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,80	-0,05	0,80	-0,11	0,94	-0,11	1,04	-0,11
13:00	0,00	0,00	0,72	0,00	0,86	-0,05	1,12	-0,08	1,28	-0,08	1,28	-0,13
14:00	0,00	0,00	0,88	0,00	1,24	0,55	1,24	0,80	1,28	1,03	1,28	1,02
15:00	0,00	0,00	0,86	0,00	1,02	0,25	1,20	0,26	1,20	0,22	1,24	0,29
16:00	0,00	0,00	0,84	0,00	1,17	0,21	1,20	0,25	1,24	0,20	1,24	0,31
17:00	0,00	0,00	0,84	0,00	1,04	0,14	1,16	0,03	1,26	0,31	1,24	0,26
18:00	0,00	0,00	0,84	0,00	1,04	0,18	1,18	0,25	1,26	0,30	1,24	0,22
Vertical da secção												
Hora	7		8		9		10		11		12	
	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.	Profund.	Vel.
	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m/s)
11:00	0,58	0,12	0,56	0,10	0,89	0,09	0,48	0,05	0,34	0,00	0,00	0,00
12:00	0,90	-0,11	0,92	-0,14	0,96	-0,10	0,96	-0,06	0,48	0,00	0,04	0,00
13:00	1,29	-0,10	1,20	-0,14	1,28	-0,10	0,92	-0,06	0,96	-0,06	0,52	0,00
14:00	1,28	0,30	1,24	0,40	1,28	0,90	1,28	0,70	0,82	0,27	0,68	0,00
15:00	1,32	0,20	1,24	0,30	1,24	0,30	1,20	0,23	0,96	0,14	0,66	0,00
16:00	1,32	0,30	1,28	0,30	1,24	0,36	1,00	0,26	0,96	0,25	0,64	0,00
17:00	1,26	0,19	1,24	0,20	1,36	0,27	1,12	0,28	0,96	0,26	0,64	0,00
18:00	1,28	0,15	1,26	0,21	1,28	0,27	1,02	0,20	0,88	0,20	0,64	0,00

Na tabela 21 observam-se as vazões calculadas correspondente as verticais da secção.

Tabela 21. Vazões das verticais das secções molhadas calculadas para a data de 27/04/09.

Hora	Vazão por Secção Vertical (m ³ /s)											Vazão Total (m ³ /s)
	1--2	2--3	3--4	4--5	5--6	6--7	7--8	8--9	9--10	10--11	11--12	
11:00	0,00	0,01	0,03	0,08	0,12	0,11	0,08	0,09	0,06	0,01	0,00	0,58
12:00	0,00	-0,02	-0,08	-0,12	-0,14	-0,13	-0,14	-0,14	-0,10	-0,03	0,00	-0,89
13:00	0,00	-0,02	-0,08	-0,12	-0,17	-0,18	-0,19	-0,19	-0,11	-0,07	-0,03	-1,16
14:00	0,00	0,36	1,05	1,44	1,64	1,06	0,55	1,02	1,28	0,64	0,13	9,17
15:00	0,00	0,15	0,35	0,36	0,39	0,39	0,40	0,47	0,40	0,25	0,07	3,23
16:00	0,00	0,13	0,34	0,34	0,40	0,49	0,49	0,52	0,43	0,31	0,13	3,58
17:00	0,00	0,08	0,11	0,25	0,45	0,35	0,30	0,38	0,43	0,35	0,13	2,84
18:00	0,00	0,11	0,30	0,42	0,41	0,29	0,29	0,38	0,34	0,23	0,09	2,85

A menor vazão registrada em termo de valor absoluto foi 0,58 m³/s, e ocorreu às 11h, próximo de acontecer a inversão do fluxo da água do canal. Já a maior vazão registrada foi de 9,17 m³/s é consequência da precipitação de 40,70 mm registrada no período de 13h20min às 15h40min do dia 27/04/09. A intensidade máxima desta chuva foi de 18,80 mm/20min registrada em torno das 13h30min (figura 51).

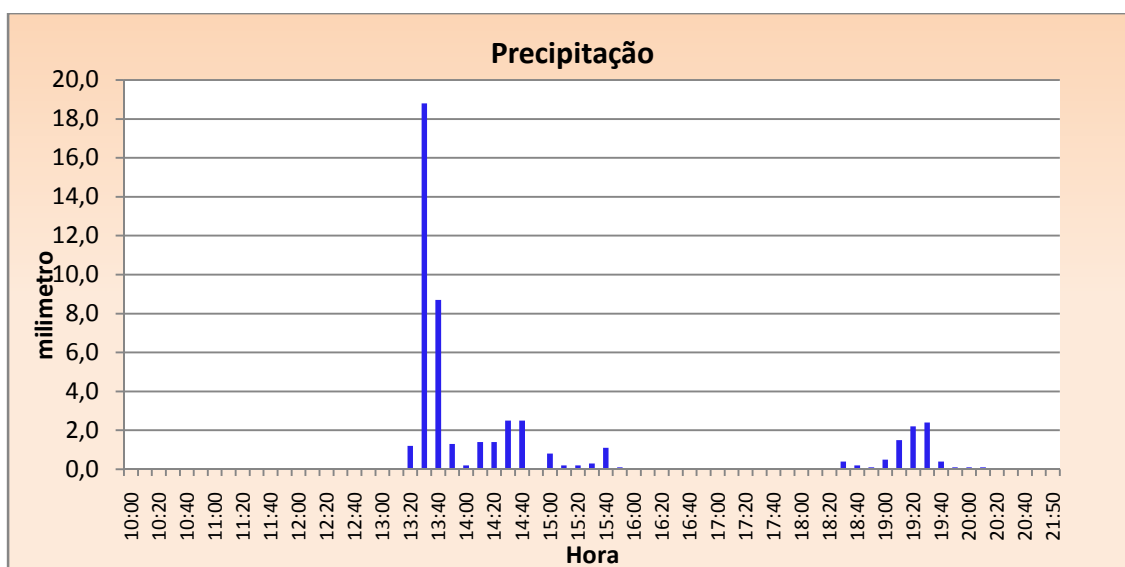


Figura 51. Precipitação registrada no dia 27/04/09 na estação meteorológica do INMET (CEASA).

A análise dos dados da tabela 22 mostra que o canal da Quintino não tem nenhum dispositivo de comporta funcionando para impedir a entrada da água do Rio Guamá, o que agrava o risco de alagamentos e inundações em eventos de precipitação intensa, coincidente com horário de maré alta, comprometendo tanto o sistema de drenagem pluvial subterrânea quanto a dos canais.

Analisando as coletas realizadas em cada perfil da secção vertical, percebe-se que as maiores vazões ocorreram próximo da parte central do canal (figura 52), entretanto, entre os perfis das secções 6 e 7 observa-se uma redução da vazão, isto pode ser explicado pelo assoreamento do leito do canal constatado na plotagem da vertical da secção transversal mostrado no gráfico da figura 50.

Tabela 22. Leitura do nível de água no canal da Quintino Bocaiúva obtida durante o trabalho de campo executado na data de 27/04/09.

Hora	Nível do Canal Corrigido (m)	Nível da Maré (m)	Condição da Maré	Sentido do Fluxo	Obs.
09:55	2,44	1,80	Enchendo	Canal->Rio	
10:45	2,49	2,04	Enchendo	Canal->Rio	
11:00	2,50	2,23	Enchendo	Canal->Rio	
11:15	2,53	2,41	Enchendo	Canal->Rio	
11:30	2,59	2,58	Enchendo	Rio->Canal	
11:45	2,68	2,73	Enchendo	Rio->Canal	
12:00	2,82	2,87	Enchendo	Rio->Canal	
12:15	2,87	2,99	Enchendo	Rio->Canal	
12:30	2,94	3,08	Enchendo	Rio->Canal	
12:45	3,02	3,15	Enchendo	Rio->Canal	
13:00	3,08	3,19	Enchendo	Rio->Canal	
13:15	3,10	3,21	Enchendo	Rio->Canal	
13:30	3,12	3,20	Vazando	Canal->Rio	Início da chuva
13:45	3,32	3,17	Vazando	Canal->Rio	
14:00	3,40	3,12	Vazando	Canal->Rio	
14:15	3,40	3,06	Vazando	Canal->Rio	
14:30	3,40	2,98	Vazando	Canal->Rio	
14:45	3,40	2,88	Vazando	Canal->Rio	
15:00	3,38	2,76	Vazando	Canal->Rio	
15:15	3,35	2,63	Vazando	Canal->Rio	
15:30	3,34	2,49	Vazando	Canal->Rio	
15:45	3,34	2,34	Vazando	Canal->Rio	
16:00	3,32	2,18	Vazando	Canal->Rio	Fim da chuva
16:15	3,31	2,02	Vazando	Canal->Rio	
16:30	3,30	1,85	Vazando	Canal->Rio	
16:45	3,29	1,68	Vazando	Canal->Rio	
17:00	3,26	1,51	Vazando	Canal->Rio	
17:15	3,26	1,34	Vazando	Canal->Rio	
17:30	3,24	1,18	Vazando	Canal->Rio	
17:45	3,24	1,03	Vazando	Canal->Rio	
18:00	3,23	0,88	Vazando	Canal->Rio	

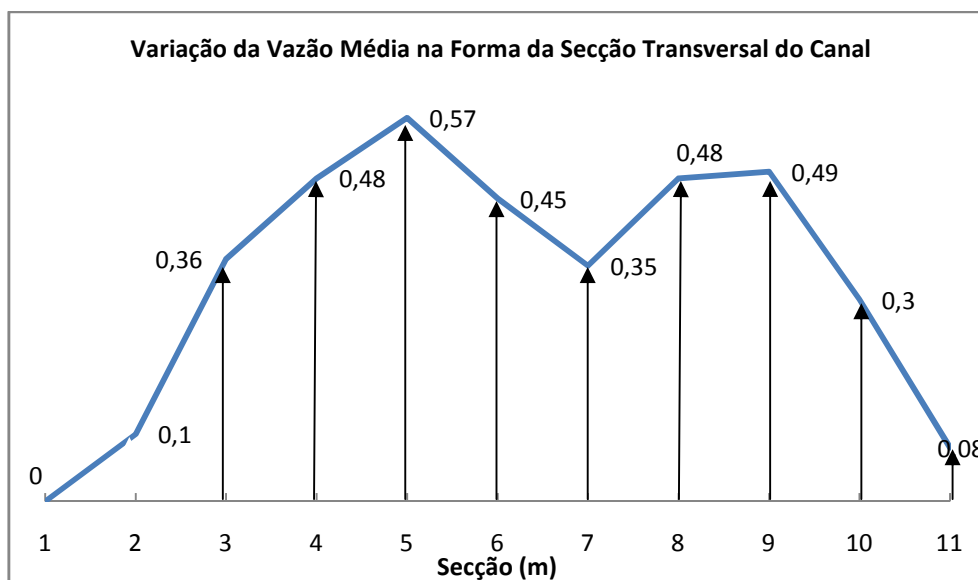


Figura 52. Esquema da variação da vazão ao longo dos perfis verticais da seção transversal do canal correspondente a data de 27/04/09.

Na tabela 22, também é possível observar o comportamento do nível do canal através dos dados de leitura da régua registrada a cada intervalo de 15 minutos, enquanto que as cotas do nível da maré para essa mesma data foi gerada a partir do aplicativo WXTide32.

No início do trabalho de campo, as 09h55min, o nível do canal era de 2,44 m e o da maré de 1,80 m, o que explica o sentido do fluxo da água do canal em direção ao Rio Guamá. Somente às 11h30min, quando o nível da maré atingiu a cota de 2,58 m ocorreu à inversão do fluxo, no sentido do rio ao canal, e se manteve assim até o nível do rio voltar a baixar e atingir a cota de 3,21m às 13h15min (figura 53). Após este horário, apesar do nível da maré continuar baixando o nível do canal se manteve em elevação decorrente da chuva que teve início nesse mesmo momento. Este tipo de modelo parecer representar o comportamento natural do canal para condições de chuvas fortes, onde o pico máximo da vazão do canal registrado para esse dia e visualizado no gráfico da figura 53 ocorreu aproximadamente 30 (trinta) minutos após o registro do centro de massa da precipitação (13h30min). Este tempo observado em campo, se aproxima bastante do tempo de pico (t_p) calculado através da equação (16) para a bacia que foi de 21,60 minutos. Entretanto, são dados preliminares necessitando de um estudo

mais aprofundado a partir de uma série mais prolongada de coleta de campo, o que não foi possível pelo pouco tempo disponível de execução deste trabalho.

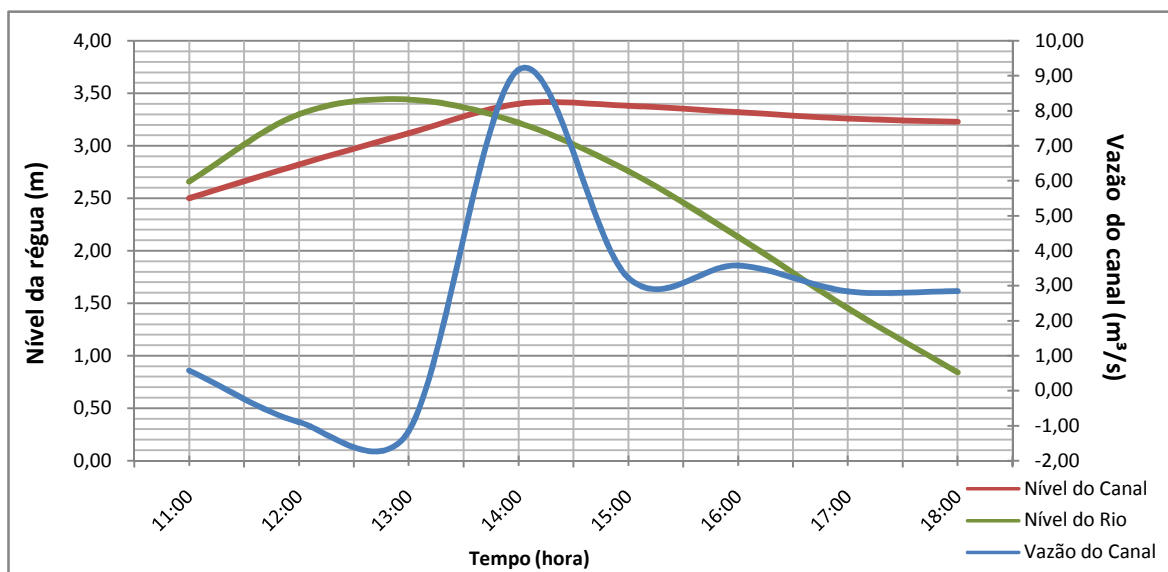


Figura 53. Comportamento da vazão e do nível do canal em relação ao nível da maré referente à data de 27/04/09.

Campo do dia 22/08/09 - Estudo de caso: Vazão do canal sem ocorrência de chuva

No quadro 7 estão os registros das velocidades do fluxo de água no canal correspondente a cada vertical da seção molhada, coletado com auxílio de um molinete, em intervalos de 1 (uma) hora, durante um período de 9 (nove) horas.

O comportamento da vazão do canal para as condições de observação sem influência de chuva pode ser analisado na tabela 23. O pico máximo de vazão ocorreu aproximadamente 1 (uma) hora após o nível da maré do Rio Guamá voltar a baixar, desobstruindo o fluxo da água represada no canal, e posteriormente transcorreu mais 2 (duas) horas para retornar à sua vazão normal (figura 54). Observa-se também, que o refluxo da água no canal (vazão negativa) dura aproximadamente 2 (duas) horas. Este dado é de grande importância na construção do processo de modelagem do risco de alagamento e inundação é proposta para a área da bacia, visto que, este fato aumenta a potencialidade da ocorrência desses eventos para os casos em que precipitação coincide com o nível de maré alta.

Quadro 7. Medidas das velocidades do fluxo de água obtida a 60% de profundidade do canal referente às verticais das secções molhadas obtidas no trabalho de campo executado na data de 22/08/09.

Hora	VERTICAL											
	1		2		3		4		5		6	
	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)
09:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,50	0,08	0,60	0,10	0,60	0,09
10:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,00	0,45	0,08	0,60	0,10	0,60	0,10
11:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,51	0,08	0,74	0,08	0,74	0,04
12:00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,56	0,00	0,72	0,08	0,87	0,12	0,87	0,09
13:00	0,24	0,00	0,53	0,00	0,79	0,00	0,07	0,08	1,00	0,07	1,00	0,07
14:00	0,23	0,00	0,52	0,00	0,78	0,00	0,94	0,00	0,99	0,00	0,99	0,00
15:00	0,20	0,00	0,49	0,00	0,75	0,00	0,91	0,08	0,96	0,14	0,96	0,16
16:00	0,18	0,00	0,47	0,00	0,73	0,00	0,89	0,08	0,94	0,10	0,94	0,12
17:00	0,00	0,00	0,57	0,00	0,83	0,00	0,99	0,15	1,04	0,21	1,04	0,24
Hora	7		8		9		10		11		12	
	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)	Profund (m)	Vel. (m/s)
	09:00	0,48	0,11	0,60	0,12	0,57	0,08	0,43	0,06	0,22	0,00	0,00
10:00	0,48	0,14	0,60	0,11	0,57	0,10	0,43	0,08	0,22	0,00	0,00	0,00
11:00	0,62	0,07	0,74	0,07	0,71	0,05	0,57	0,05	0,36	0,00	0,00	0,00
12:00	0,75	0,07	0,87	0,08	0,84	0,10	0,70	0,07	0,49	0,00	0,00	0,00
13:00	0,98	0,07	1,10	0,07	1,07	0,06	0,93	0,00	0,72	0,00	0,23	0,00
14:00	0,97	0,00	1,09	0,00	1,06	0,00	0,92	0,00	0,71	0,00	0,22	0,00
15:00	0,94	0,15	1,06	0,19	1,03	0,16	0,84	0,14	0,68	0,10	0,19	0,00
16:00	0,92	0,16	1,04	0,17	1,01	0,11	0,87	0,13	0,66	0,11	0,17	0,00
17:00	1,02	0,25	1,14	0,23	1,11	0,19	0,97	0,20	0,76	0,14	0,27	0,12

Tabela 23. Vazão das verticais das secções molhadas obtidas a partir da equação 3 para a data de 22/08/09.

Hora	Vazão por Secção Vertical (m ³ /s)											Vazão Total (m ³ /s)
	1--2	2--3	3--4	4--5	5--6	6--7	7--8	8--9	9--10	10--11	11--12	
9:00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,10	0,09	0,10	0,10	0,06	0,02	0,00	0,57
10:00	0,00	0,00	0,02	0,08	0,10	0,11	0,11	0,10	0,08	0,02	0,00	0,62
11:00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,07	0,06	0,08	0,07	0,05	0,02	0,00	0,47
12:00	0,00	0,00	-0,04	-0,12	-0,15	-0,11	-0,10	-0,13	-0,11	-0,03	0,00	-0,80
13:00	0,00	0,00	-0,03	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,05	0,00	0,00	-0,67
14:00	0,00	0,00	0,00	1,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
15:00	0,00	0,00	0,06	0,36	0,24	0,25	0,28	0,30	0,23	0,15	0,04	1,91
16:00	0,00	0,00	0,05	0,34	0,17	0,22	0,27	0,24	0,19	0,15	0,04	1,67
17:00	0,00	0,00	0,11	0,25	0,39	0,42	0,43	0,39	0,34	0,25	0,11	0,60

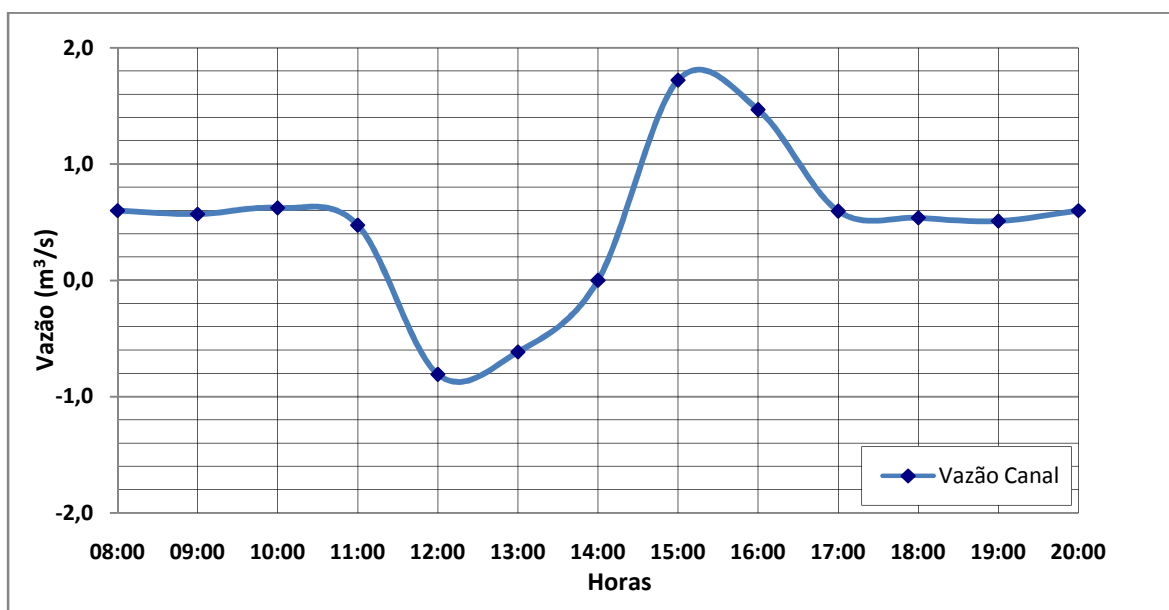


Figura 54. Gráfico demonstrativo do comportamento da vazão do canal para condições normais, ou seja, sem influência de chuva.

Na tabela 24 estão registrados os níveis do canal obtidos através dos dados de leitura da régua realizada a cada intervalo de 15 minutos, e das cotas do nível da maré obtidos a partir do aplicativo WXTide32.

No início do trabalho de campo, às 08h35min, o nível do canal era de 1,80 m e o da maré de 0,54 m, o que explica o sentido do fluxo da água do canal em direção ao Rio Guamá, que se mantém neste sentido até às 11h30min, quando o nível da

maré atingiu a cota de 2,56 m. A partir deste instante, ocorreu à inversão do fluxo da água no sentido do rio ao canal e se manteve assim até o nível do rio voltar a baixar e atingir a cota de 3,18 m às 13h45min (figura 56). A partir deste horário, o nível da maré e do canal começa a baixar mantendo-se assim até as 17h00min quando atinge sua normalidade. Aproximadamente 50min após a inversão do fluxo de água no canal (sentido canal-rio), observa-se a ocorrência da maior vazão. Na sequência, a vazão torna a decrescer até atingir valores próximos ao do início da coleta dos dados conforme observado no gráfico da figura 55.

Na tabela 25 é possível observar o comportamento da vazão do canal, entre as 08h00min e 11h00min quando o nível da maré do Rio Guamá começou a subir, a lâmina d'água no canal registrou pequenas alterações. A vazão por sua vez se manteve praticamente constante, ou seja, não se percebe ao longo desse período nenhuma influência da maré sobre a mesma. Já a partir das 11h30min, quando o nível da maré ultrapassa a cota de 2,56 m, observa-se que a vazão do canal passa a ter um comportamento inverso, sentido rio-canal, se mantendo assim durante 2 (duas) horas. As 13h45min, o fluxo da água no canal volta a ter o sentido canal-rio, justamente após o nível da maré começar a descer (vazante).

Tabela 24. Leitura do nível do canal da Quintino Bocaiúva obtida durante o trabalho de campo executado na data de 22/08/09.

Hora	Nível do Canal Corrigido (m)	Nível da Maré (m)	Condição da Maré	Sentido do Fluxo	Obs.
08:35	1,80	0,54	Enchendo	Canal->Rio	
09:00	1,80	0,68	Enchendo	Canal->Rio	
09:15	1,79	0,83	Enchendo	Canal->Rio	
09:30	1,76	1,00	Enchendo	Canal->Rio	
09:45	1,76	1,19	Enchendo	Canal->Rio	
10:00	1,76	1,38	Enchendo	Canal->Rio	
10:15	1,76	1,58	Enchendo	Canal->Rio	
10:30	1,76	1,79	Enchendo	Canal->Rio	
10:45	1,76	1,99	Enchendo	Canal->Rio	
11:00	1,81	2,19	Enchendo	Canal->Rio	
11:15	1,84	2,38	Enchendo	Canal->Rio	
11:30	1,93	2,56	Enchendo	Rio->Canal	
11:45	2,12	2,72	Enchendo	Rio->Canal	
12:00	2,21	2,86	Enchendo	Rio->Canal	
12:15	2,41	2,99	Enchendo	Rio->Canal	
12:30	2,54	3,08	Enchendo	Rio->Canal	
12:45	2,67	3,16	Enchendo	Rio->Canal	
13:00	2,73	3,20	Enchendo	Rio->Canal	
13:15	2,78	3,22	Enchendo	Rio->Canal	
13:30	2,84	3,21	Enchendo	Rio->Canal	
13:45	2,86	3,18	Vazando	Canal->Rio	
14:00	2,82	3,13	Vazando	Canal->Rio	
14:15	2,78	3,06	Vazando	Canal->Rio	
14:30	2,73	2,98	Vazando	Canal->Rio	
14:45	2,65	2,88	Vazando	Canal->Rio	
15:00	2,56	2,76	Vazando	Canal->Rio	
15:15	2,47	2,63	Vazando	Canal->Rio	
15:30	2,39	2,48	Vazando	Canal->Rio	
15:45	2,34	2,33	Vazando	Canal->Rio	
16:00	2,28	2,16	Vazando	Canal->Rio	
16:15	2,25	2,00	Vazando	Canal->Rio	
16:30	2,21	1,83	Vazando	Canal->Rio	
16:45	2,49	1,65	Vazando	Canal->Rio	
17:00	2,32	1,48	Vazando	Canal->Rio	

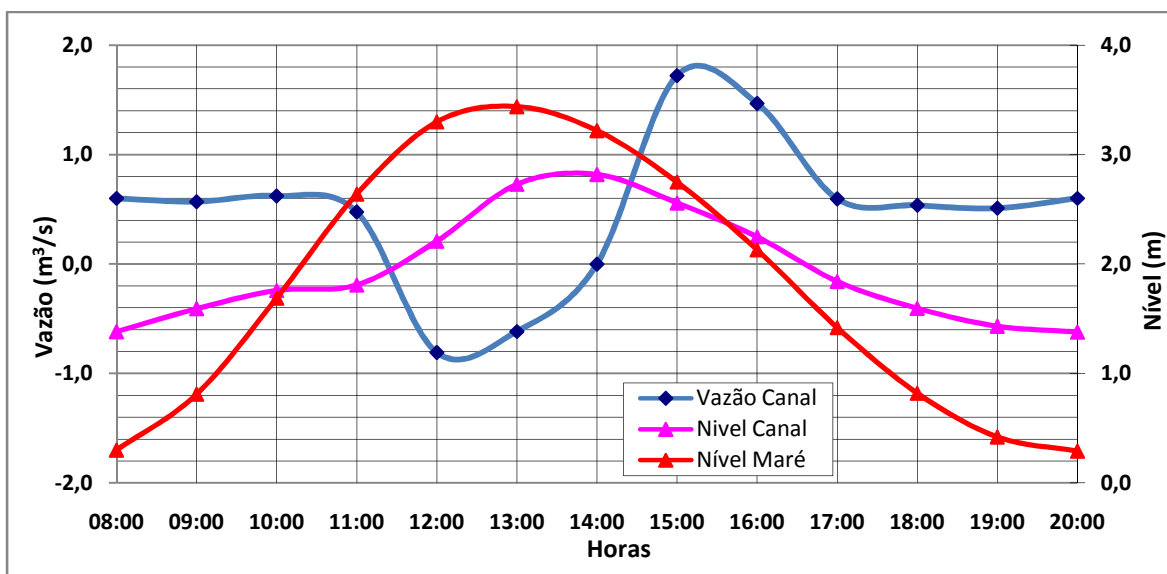


Figura 55. Gráfico demonstrativo do comportamento do nível e vazão do canal e função da variação do nível da maré do Rio Guamá.

Tabela 25. Dados de campo de nível e vazão do canal e de nível da maré do Rio Guamá para a data de 22/08/2009.

Hora	Nível do Canal (m)	Nível da Maré (m)	Vazão (m³/s)
08:00	1,38	0,30	0,60
09:00	1,59	0,81	0,57
10:00	1,76	1,69	0,62
11:00	1,81	2,64	0,48
12:00	2,21	3,30	-0,81
13:00	2,73	3,44	-0,62
14:00	2,82	3,22	0,00
15:00	2,56	2,75	1,72
16:00	2,25	2,13	1,47
17:00	1,84	1,42	0,60
18:00	1,60	0,82	0,54
19:00	1,43	0,42	0,51
20:00	1,38	0,29	0,60

A figura 56 mostra a correlação existente entre o comportamento da vazão do canal com o seu nível durante um ciclo de maré. Conforme o nível de água do canal vai se elevando influenciado pelo nível da maré do Rio Guamá, a vazão tende a reduzir até atingir o valor zero. A partir desse momento, com a continuidade da elevação do nível da água do canal a vazão passa a ser negativa

em razão do fluxo d'água ter assumido o sentido rio/canal. Este processo se mantém até que o nível da água do canal volte a baixar influenciado pela vazante do Rio Guamá, e a vazão novamente atingir o valor zero. A partir de então, a vazão volta a ter sentido canal/rio, e na seqüência atingir seu valor máximo para em seguida voltar a reduzir.

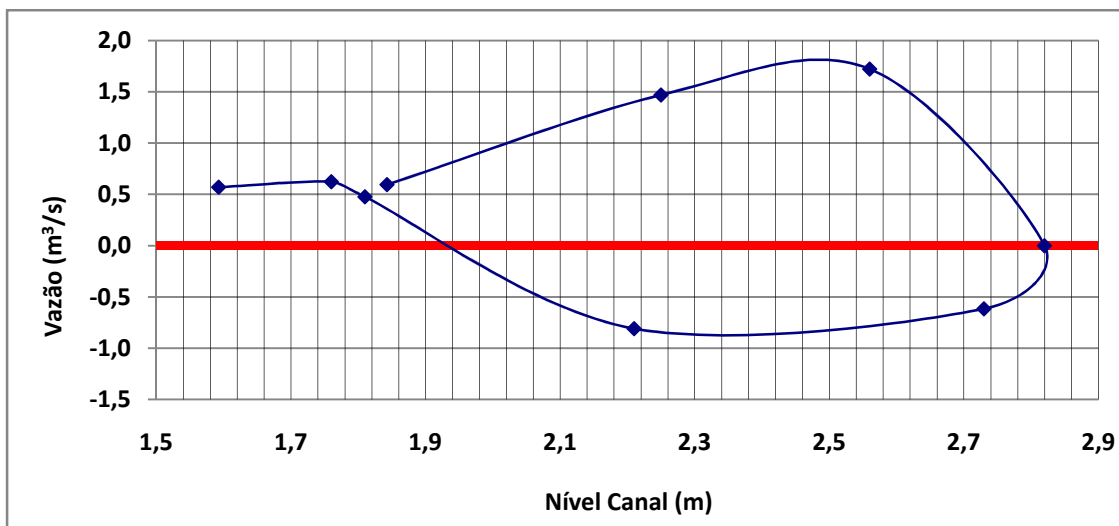


Figura 56. Gráfico demonstrativo da vazão do canal para o dia 22/08/2009 durante um ciclo de maré.

Realizando uma análise comparativa entre as vazões registradas durante as duas coletas de campo (com e sem chuva), observa-se através do gráfico da figura 57, que as curvas de vazão encontram-se ajustadas somente durante as duas primeiras horas da coleta. Porém, era de se esperar que as curvas permanecessem ajustadas ou próximas até a 13h30min, quando inicia a chuva do 27/04/09, uma vez que as condições do horário da maré e do nível máximo da mesma eram exatamente as mesmas. Entretanto, se observa que a vazão negativa (refluxo) do dia 27/04/09 é maior a partir da segunda hora do início da inversão do fluxo do canal. Vários fatores físicos podem ter influenciado este comportamento, como por exemplo, o próprio assoreamento do canal ocorrido entre uma medição e outra, uma vez que a diferença entre as datas foi de aproximadamente 4 (quatro) meses. Outra explicação seria o acúmulo de lixo na superfície do canal criando atrito e conseqüentemente reduzindo a velocidade do fluxo da água.

Fazendo um comparativo entre as curvas do gráfico da figura 57, referente ao intervalo das 13h00min as 15h00min, podemos observar que a diferença entre uma curva e outra corresponde aproximadamente o volume de água resultante do escoamento superficial da bacia provocado pela chuva registrada neste horário, ocasionando o aumento da vazão do canal.

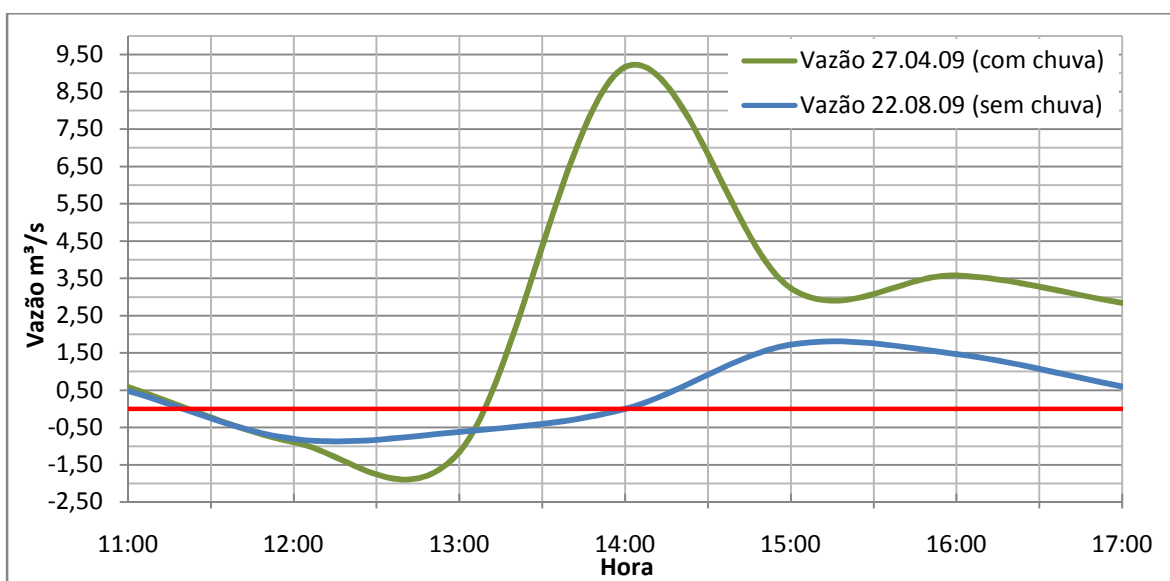


Figura 57. Gráfico comparativo entre as vazões do canal para as data de coleta com e sem ocorrência de chuva.

6.7 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é uma etapa importante para a validação do modelo hidrológico. A partir do conhecimento da influência dos parâmetros nos resultados do modelo é possível determinar melhorias para aplicações futuras. Em razão disso, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo hidrológico para a intensidade máxima da chuva e vazão máxima do canal. A análise teve como base os dados do evento pluviométrico ocorrido na data de 27/04/2009, onde a precipitação registrada foi de 38 mm e a duração da chuva de 90 minutos. A condição considera de vazão do canal em relação ao nível da maré foi de 90% de sua capacidade normal.

A análise de sensibilidade foi conduzida separadamente para cada parâmetro, e seus valores alterados a partir da situação real registrada no dia do evento, enquanto que os valores dos demais parâmetros foram mantidos fixos.

Considerando os resultados da tabela 26, foi feita uma análise quantitativa, baseada na relação do percentual de área atingida por alagamento ou inundação. Os resultados mostraram que a variável intensidade máxima de precipitação tem um peso significativo sobre o modelo hidrológico, mostrando que quanto maior for a intensidade da chuva maior será o impacto de alagamento e inundação sobre a área da bacia (figura 58). Os testes realizados indicam que uma variação da ordem de 5mm/h na intensidade da chuva é o suficiente para provocar um aumento da área de alagamento ou inundação entre 0,60 % e 1,90%. A equação da curva de tendência mostra a existência de uma correlação alta entre a intensidade da chuva e a área alagada ($R^2=0,994$). Ensaio realizado com o modelo para avaliar qual seria a intensidade da chuva mínima necessária para causar problema de alagamentos e inundações na bacia apontam para um valor a partir de 7mm/h, mantidas as condições atuais de vazão do canal.

Quanto ao parâmetro vazão máxima do canal, foram testadas variações da ordem de 5m³, sendo que essas alterações provocaram uma redução da área de alagamento ou inundação entre 1,25% e 1,90%. A figura 59, mostra que a correlação entre a vazão máxima do canal e a área alagada ou inundada é da ordem de $R^2=0,996$, semelhante ao da intensidade máxima da chuva, porém, apresentando um efeito inverso, ou seja, quanto maior for a vazão do canal, menor será o impacto sobre a área da bacia.

Tabela 26. Verificação da sensibilidade dos parâmetros para como o modelo hidrológico.

Precipitação (mm)	Duração Chuva (minuto)	Intensidade máxima (mm/h)	tc	tp	tb	Vazão Máxima Canal (m³)	Vol. Total Alagam. (m³)	Cota Alagam. (m)	Área Alagada (m²)	Área Alagada (%)
38,00	90,0	25,33	30,88	0,36	0,96	9,16	34313,11	3,52	0,36	7,68
38,00	90,0	30,00	30,88	0,36	0,96	9,16	44432,76	3,55	0,45	9,59
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	9,16	49694,98	3,56	0,49	10,45
38,00	90,0	35,00	30,88	0,36	0,96	9,16	54552,40	3,57	0,52	11,09
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	14,00	42183,36	3,54	0,42	8,96
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	19,00	34407,36	3,52	0,36	7,68
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	24,00	26631,36	3,49	0,28	5,97
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	29,00	18855,36	3,46	0,21	4,48
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	34,00	11079,36	3,41	0,12	2,56
38,00	90,0	31,60	30,88	0,36	0,96	39,00	3303,36	3,35	0,07	1,49

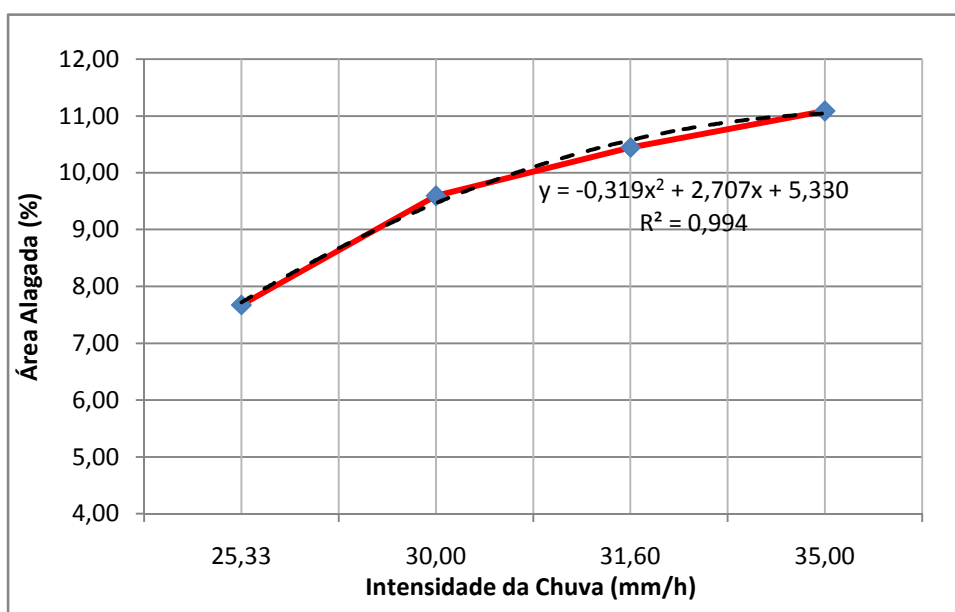


Figura 58. Relação entre a intensidade da precipitação com a área afetada por alagamento e inundação.

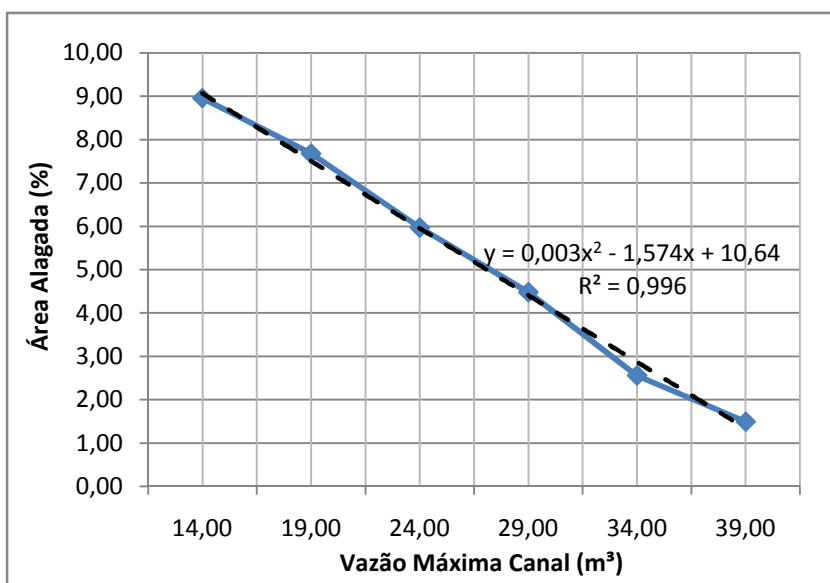


Figura 59. Relação entre a vazão máxima do canal com a área afetada por alagamento e inundação.

6.8 APLICAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO PARA BACIA URBANA

O modelo de escoamento foi construído especificamente para o período de maior número de dias de chuvas em Belém, desconsiderando a época de estiagem.

De um modo geral, o sistema foi desenvolvido para ser operado da forma mais simples possível, por qualquer usuário que tenham um mínimo conhecimento de informática. Para isso, procurou-se automatizar todo o processamento de aplicação das equações definidas para o modelo hidrológico, como também, para o uso das ferramentas de geoprocessamento necessárias para a análise espacial dos resultados e para geração dos boletins de alertas previsto para o sistema. Objetivando conciliar a simplificação do modelo hidrológico com eficiência de resultados, foi desenvolvida uma interface para entrada de dados e botões para rodar o modelo e gerar o produto final (figura 60). Os dados de entrada necessário para rodar o modelo são os de cunho meteorológico, especificamente, os relacionados com a previsão do tempo de curta duração, intensidade e duração da chuva, e hidrológico, de vazão de pico do canal principal e a condição de vazão do mesmo em relação ao nível da maré. Os demais dados, modelo digital de elevação, mapa de uso do solo, tempo de concentração, de pico e de

base da bacia, obtidos a partir dos estudos de discretização da bacia, são considerados dados estáticos, ou seja, uma vez calculados só serão revistos quando ao longo do tempo ocorrer alterações físicas na bacia. Os dados do volume precipitado e data do evento pluviométrico são meramente informativos, não são aplicados no cálculo de modelo, entretanto, estão integrados ao sistema, pois são utilizados para compor o boletim de alerta de alagamento e inundação.

Figura 60. Interface do sistema de monitoramento de risco de alagamento e inundação para a área do projeto.

Os dados do tempo de duração da chuva (t_{ch}) e de uso do solo (usado para o cálculo da percentagem de impermeabilização do solo (p)), são aplicados na equação $c = 0,364 \times \log(t_{ch}) + 0,0042 \times p - 0,145$, utilizada para determinar o coeficiente de escoamento superficial de cada célula que compõe a bacia. Isto significa dizer que as células com maior percentagem de impermeabilização terão um maior coeficiente e assim sendo, contribuirão mais com o escoamento superficial. Da mesma forma ocorre com a variável “tempo de duração da chuva”, onde quanto maior for seu valor, maior também será o valor do coeficiente de escoamento calculado.

A intensidade máxima da chuva (I), assim como o coeficiente de escoamento superficial (c), são os dados de entrada utilizados no cálculo da vazão de pico do hidrograma do escoamento superficial, feito com base na equação $q_p = 0,278 \times C \times I \times A$, onde (A) corresponde a área da bacia. A intensidade e a duração da chuva poderão se obtidas a partir das previsões de curto prazo feito para o tempo, não sendo objeto desse estudo.

O preenchimento do campo de vazão máxima do canal solicitado como entrada na interface do sistema corresponde a vazão máxima observada na coleta de campo. Entretanto, a este campo é permitido a alteração do seu valor, considerando a possibilidade do aumento ou redução da vazão atual em razão de melhorias estruturais do canal e que venha aumentar sua vazão atual. O cálculo da vazão do canal é realizado com base na equação $V_{escoado} = q_{pc} \times t_b/2$, onde (q_{pc}) corresponde a vazão de pico do canal e (t_b) o tempo de base calculado para o hidrograma do escoamento superficial. Na interface do sistema é possível ainda, selecionar a condição de vazão do canal. Esta opção esta relacionada com a condição do nível de maré do Rio Guamá para a hora da simulação, ou seja, se na ocasião da chuva o nível da maré estiver alta, significa dizer que a vazão do canal será reduzida pelo bloqueio das águas do rio. Assim sendo, optar por uma condição inferior a 100%, condicionado a situação da ascendência ou descendência e altura da maré, o que poderão ser verificadas em tempo real através do aplicativo WXTide32, o qual teve seus dados e cota de maré ajustado ao nível médio do mar e os horários de maré (preamar e baixa-mar) as condições locais do Rio Guamá.

Para a determinação da cota de alagamento, foi realizado o cálculo do volume que cada célula suporta em relação às demais do seu entorno. Para execução desse processo pelo sistema, foi criada uma rotina automatizada que com base na cota de elevação extraído do modelo digital de elevação e a área correspondente de cada célula da bacia ($25m^2$).

Estudo de Caso

O ajuste e validação do modelo proposto foram realizados a partir simulação da situação de precipitação registrada para o dia da coleta de dados em campo (27/04/09), e posteriormente aplicado para alguns episódios pluviométricos intensos ocorridos em Belém e que causaram transtornos a população. A seleção e análise desses casos foram realizadas, considerando os eventos que tiveram registros em matérias jornalísticas ou checagem de campo.

1º Caso:

Evento pluviométrico registrado pela estação meteorológica do INMET (CEASA) ocorrido no dia 27/04/2009, da ordem de 38 mm, com início as 13h20min e término 14h40min, duração de 90 minutos e intensidade de 28,7 mm/h.

O nível da maré do Rio Guamá neste dia atingiu seu pico máximo 3,20 m (NMM) às 13h16min, sendo que ao iniciar a chuva, a maré já havia iniciado o processo de vazante, porém ainda com cota acima de 3,00 m (figura 61). A vazão do canal já havia retomado o sentido normal de seu fluxo, canal-rio. Para efeito da simulação do evento e teste do modelo, foi considerado que a condição de vazão do canal era de 90% de sua capacidade normal devido o nível d'água do mesmo encontrar-se alto influenciado pelo nível da maré.

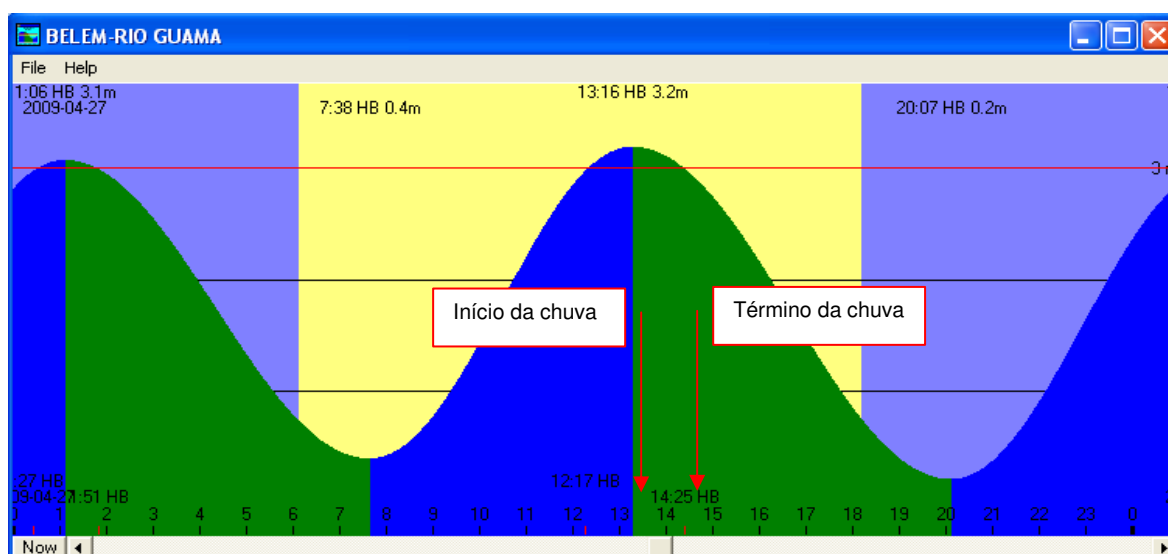


Figura 61. Gráfico do comportamento da maré para o dia 27/04/09.

A figura 62 mostra a interface de entrada dos dados referente ao evento, assim como, o resultado dos cálculos realizado pelo sistema com base nas equações definidas para a modelagem hidrológica.

The screenshot shows the 'Monitoramento de Risco' software interface. It is divided into several sections:

- Dados da Chuva:**
 - Data do Evento: 27/04/2009
 - Precipitação: 38 mm
 - Duração: 90 min
 - Intensidade: 31.6 mm/h
- Dados da Bacia Hidrográfica:**
 - Tempo de Concentração (Tc): 30.88 min
 - Tempo de Pico (Tp): 0.36 h
 - Tempo de Base (Tb): 0.96 h
 - Vazão Máxima do Canal (Qmc): 9.17 m³/s
- Condição de Vazão do Canal:** Radio buttons for 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% (selected), and 100%.
- Processamento:** Two icons: 'Modelo Chuva-Vazão' and 'Modelo Alagamento'.
- Resultado do Processamento:**
 - Volume de Escoamento Superficial (Vtes): 63956.16 m³
 - Vol. Total Escoado pelo Canal (Vtec): 7130.59 m³
 - Volume de Alagamento (Vtal): 56825.57 m³
 - Cota de Alagamento: 3.57 m
- Gerador de Mapa:** Three icons for map generation.
- Bottom right: Desenvolvido por: Flávio Altieri

Figura 62. Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 27/04/09.

Os cálculos obtidos a partir do modelo hidrológico mostram que a chuva desse dia, gerou um volume total de escoamento superficial da ordem de 63.956,16 m³, sendo que desse total, escoou pelo canal um volume de aproximadamente 7.130,59 m³, e o restante do volume, 56.825,27 m³, é o resultado correspondente a água que acumulou nas áreas da bacia de cota inferior a 3,57 m provocando os alagamentos e inundações registrados na área da bacia.

Para validação dos resultados gerados pelo modelo, foram selecionados dois pontos críticos para checagem de campo conforme observado abaixo:

A figura 67 mostra uma área de inundação detectada pelo modelo na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R Mundurucus (figura 64-a). Este fato foi decorrente

do transbordamento do canal da Tv. 14 de Março constatada em campo conforme mostrado na foto 5 e 6.

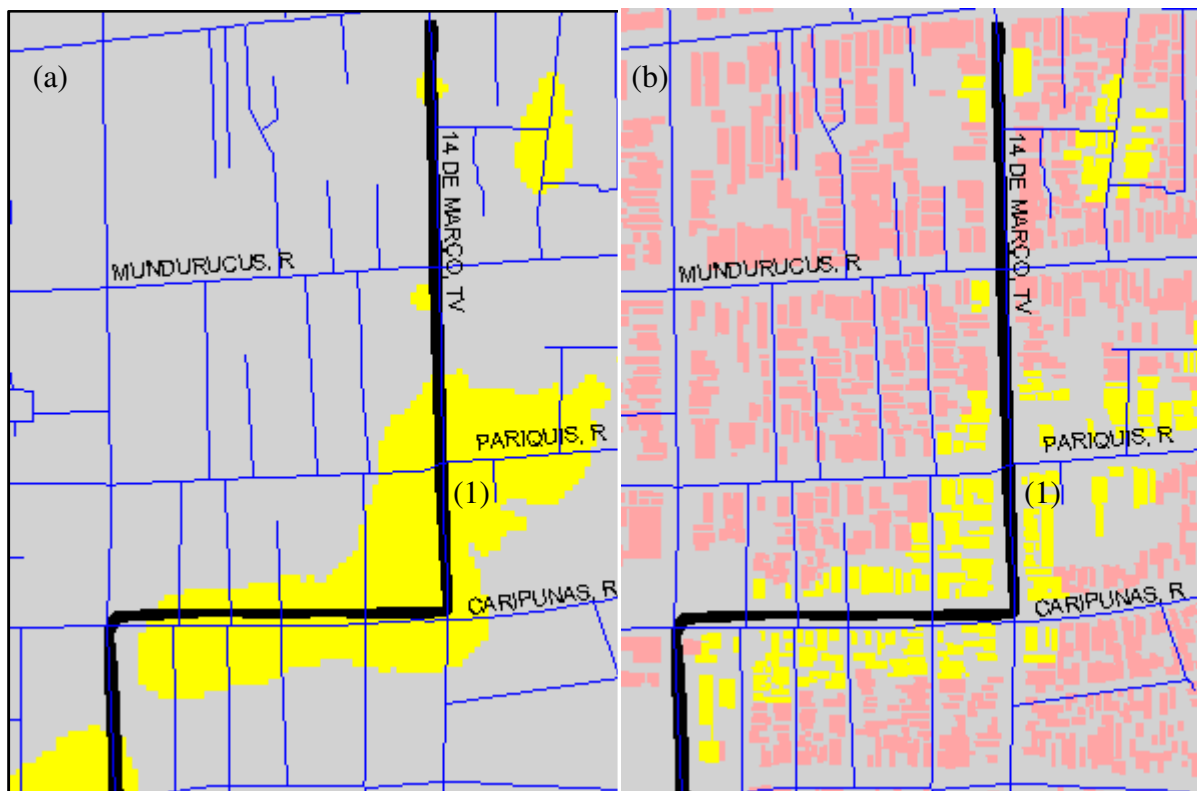


Figura 63. Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.

Segundo a análise do sistema, este evento ocasionou impacto em aproximadamente 2.711 edificações inseridas na área da bacia.



Foto 5. Registro fotográfico da inundação ocorrida na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R. Mundurucus decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.



Foto 6. Registro fotográfico da inundação ocorrida na Tv. 14 de Março entre a R. Pariquis e R. Mundurucus decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.

A figura 64 mostra uma área de inundação detectada pelo modelo na R. Pariquis com a Tv. 14 de Março (2). Este fato foi decorrente do transbordamento do canal da Tv. 14 de Março e constatada em campo conforme mostrado na foto 7.

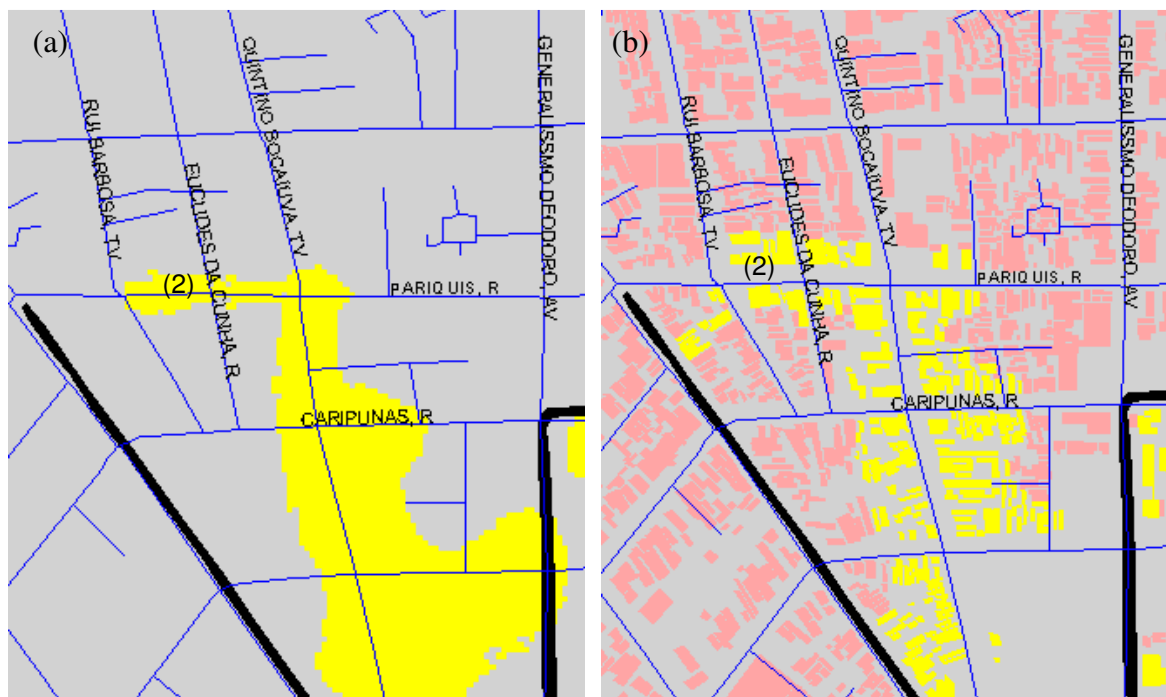


Figura 64. Ponto de inundação (2) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 7. Registro de ponto de inundação na R. Pariquis com a Tv. 14 de Março decorrente da precipitação ocorrida em 27/04/2009.

2º Caso:

Evento pluviométrico registrado pela estação meteorológica do INMET (CEASA) ocorrido no dia 25/01/2010, da ordem de 27,2 mm, com início as 06h00min e término 10h00min, duração de 240 minutos e intensidade de 19,4 mm/h.

O nível da maré do Rio Guamá neste dia atingiu seu pico máximo 2,50 m (NMM) as 07h00min (figura 65), uma hora após o início da chuva, porém no horário de maior intensidade da mesma. Entretanto, para efeito da simulação do evento e teste do modelo, foi considerado que a condição de vazão do canal era de 90% de sua capacidade normal devido o fato da maré cheia, o que pode ter reduzido a vazão do canal.

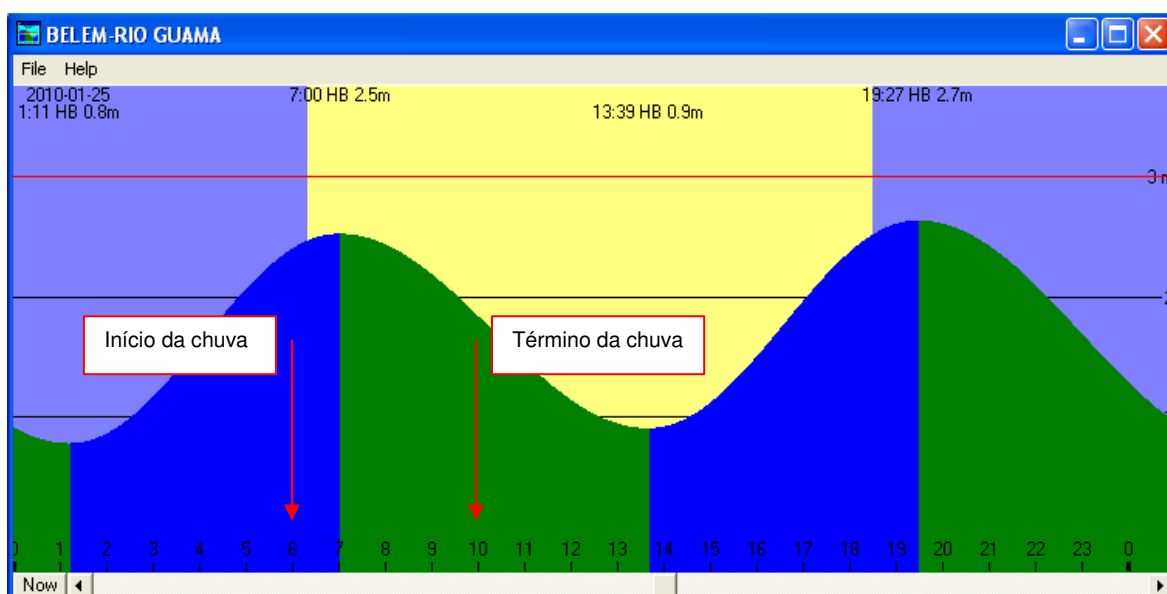


Figura 65. Gráfico do comportamento da maré do dia 25/01/10.

A figura 66 mostra a interface de entrada dos dados referente ao evento, assim, como o resultado dos cálculos realizado pelo sistema com base nas equações definidas para a modelagem hidrológica.

Monitoramento de Risco

Dados da Chuva		Dados da Bacia Hidrográfica	
Data do Evento:	20/01/2010	Tempo de Concentração (Tc):	30.88 min
Precipitação:	27.2 mm	Tempo de Pico (Tp):	0.36 h
Duração:	240 min	Tempo de Base (Tb):	0.96 h
Intensidade:	19.4 mm/h	Vazão Máxima do Canal (Qmc):	9.17 m ³ /s

Condição de Vazão do Canal	Processamento:
<input type="radio"/> 10% <input type="radio"/> 20% <input type="radio"/> 30% <input type="radio"/> 40% <input type="radio"/> 50% <input type="radio"/> 60% <input type="radio"/> 70% <input type="radio"/> 80% <input checked="" type="radio"/> 90% <input type="radio"/> 100%	<input checked="" type="checkbox"/> Modelo Chuva-Vazão <input type="checkbox"/> Modelo Alagamento

Resultado do Processamento	
Volume de Escoamento Superficial (Vtes):	46034.63 m ³
Vol. Total Escoado pelo Canal (Vtec):	7130.59 m ³
Volume de Alagamento (Vtal):	38904.04 m ³
Cota de Alagamento:	3.53 m

Gerador de Mapa

Desenvolvido por: Flávio Altieri

Figura 66. Interface do sistema e resultados do modelo hidrológico para o evento do dia 25/01/10.

Os cálculos obtidos a partir do modelo hidrológico mostram que a chuva desse dia, gerou um volume total de escoamento superficial da ordem de 40.034,63 m³, sendo que desse total, escoou pelo canal um volume de aproximadamente 7.130,59 m³, e o restante do volume, 38.904,04 m³, é o resultado correspondente a água que acumulou nas áreas da bacia de cota inferior a 3,53 m provocando os alagamentos e inundações.

Para validação dos resultados gerados pelo modelo, foram selecionados quatro pontos críticos para checagem de campo conforme observado abaixo:

A figura 67 mostra uma área de inundação detectada pelo modelo na Tv. Quintino Bocaiúva entre a Tv. Tupinambás e Av. Roberto Camelier (1). Este fato foi decorrente do transbordamento do canal da Quintino Bocaiúva e constatada em campo conforme mostrado na foto 8.

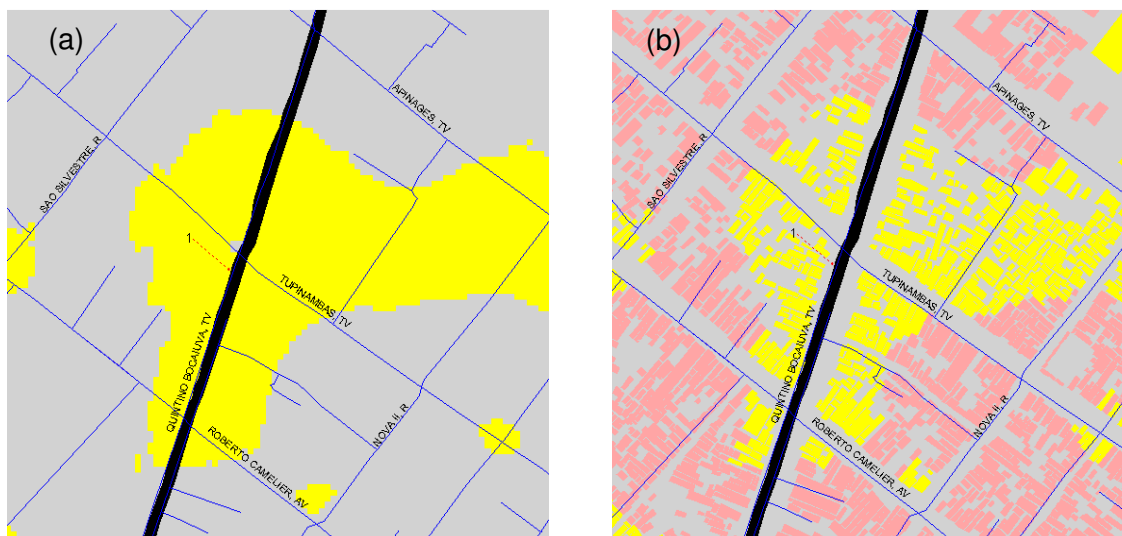


Figura 67. Ponto de inundação (1) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência do evento e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 8. Inundação na Tv. Quintino Bocaiúva esquina com a Tv. Tupinambás provocada pela transbordamento do canal.

A figura 68 mostra um ponto de alagamento detectada pelo modelo na Tv. Quintino Bocaiúva entre a R. Conceição e R. Caripunas (2) decorrente do

transbordamento dos canais da Av. Generalíssimo Deodoro e Tv. Dr. Moraes . Fato constatado em campo conforme visto na foto 9.



Figura 68. Ponto de alagamento (2) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 9. Ponto de alagamento ocorrido na Tv. Quintino Bocaiúva entre R. Conceição e R. Pariquis conseqüência do transbordamento dos canais da D. Moraes e Generalíssimo Deodoro.

A figura 69 mostra outro ponto de alagamento detectado pelo modelo na Tv. Padre Eutíquio nas proximidades da Pass. São Sebastião (3), e um ponto de

inundação também na Tv. Padre Eutíquio entre a Tv. Quintino Bocaiúva e R. São Silvestre (4) decorrente do transbordamento dos canal da Quintino Bocaiúva. Esta ocorrência foi constatada em campo conforme visto na foto 10 e 11.



Figura 69. Ponto de alagamento (3) e inundação (4) detectado através da simulação gerada no sistema de modelagem de risco, onde (a) representa a provável área de abrangência e (b) as prováveis edificações afetadas.



Foto 10. Ponto de alagamento na Tv. Padre Eutíquio próximo a Pass. São Sebastião.



Foto 11. Ponto de inundação na Tv. Padre Eutíquio próximo ao canal da Quintino Bocaiúva.

7 CONCLUSÃO

Clima: A análise da pluviometria a partir do agrupamento dos dados por década, tomando como base o período de 1923/1930 mostra que as quatro últimas décadas vêm registrando aumentos significativos nas médias anuais da precipitação em Belém. Este fato provavelmente está associado não somente a variabilidades decadais do clima, mas também a fatores antrópicos decorrente da supressão da vegetação pela ocupação humana.

As precipitações máximas em 24 horas são mais freqüentes para os intervalos pluviométricos compreendido entre 20 a 40 mm, e ocorrem principalmente no período de janeiro a maio, justamente os meses em que a população de Belém sofre com os alagamentos e inundações da cidade.

O uso da metodologia dos quantis aplicado para o período de 1923 a 2007 confirma a tendência da análise pluviométrica decadal, que a partir da década de 70 registra um maior número de anos com as características “chuvoso” e “muito chuvoso”.

A análise dos dados da série histórica da temperatura do ar (média das máximas e das mínimas) mostra também uma tendência de aumento a partir da década de 70. Uma análise mais criteriosa desses dados é necessária para avaliar o quanto as alterações do uso do solo têm influenciado as alterações da temperatura do ar.

Mudança do Uso do Solo: A análise da expansão urbana realizada para os anos de 1979 e 2006 comprovam o registro de uma redução da cobertura vegetal da Região Metropolitana de Belém, ocasionada principalmente pelo avanço da ocupação humana. Tal fato, contribui para intensificar a formação de ilhas de calor nas áreas ocupadas, o que foi verificado a partir da análise do gradiente térmico da superfície do solo.

Hidrologia: A partir dos estudos hidrológicos realizados, observa-se que a bacia hidrográfica dispõe de sistema de drenagem incompatível com as suas características atuais (79,26% impermeabilizada), apresentando um índice de

drenagem calculado de aproximadamente 0,71 km/km². Segundo a classificação de STHALER (1957), este índice é considerado muito baixo, tornando a bacia muito suscetível a alagamentos e inundações. Essa tendência a risco de alagamentos e inundações se evidencia em situações de chuvas convectivas intensas, conforme mostra o resultado do cálculo do coeficiente de compacidade (Kc) de 1,56.

Os estudos dos episódios de alagamentos e inundações já ocorridos em Belém mostraram que existe uma relação entre o momento da ocorrência dos eventos pluviométricos intensos com os horários de registro de maré alta do Rio Guamá. Entretanto, não se pode fazer dessa situação uma regra, pois se constatou inundações também, quando eventos pluviométricos ocorreram em ocasiões de maré baixa. Desta maneira, foi observado que o parâmetro mais influente para a ocorrência dos alagamentos e inundações é a intensidade da precipitação, tendo sua ação potencializada quando coincide com a maré alta.

Com base em observações de campo, foi constatado que na bacia estudada somente o canal da Quintino Bocaiúva sofre influência do nível da maré alta do Rio Guamá. Esta constatação permitiu observar que a partir de uma determinada cota do nível da maré ocorre a inversão do fluxo da água no canal, e a elevação do nível do mesmo, em condições de chuva, prejudica ainda mais a vazão do escoamento superficial aumentando o risco de alagamento e inundação na área da bacia.

Outra constatação importante obtida a partir do modelo de elevação do terreno é o fato de que a maior parte da topografia da bacia apresenta baixa declividade, onde 53,97% da área apresenta declividade abaixo de 0,5%, dificultando o deslocamento da água e favorecendo a formação de pontos de alagamentos. Devido a topografia, observa-se que os canais de drenagem apresentam baixa eficácia, ou seja, não produz o resultado de drenagem esperado para dar vazão a água precipitada sobre a bacia em ocasiões de eventos pluviométricos intensos. A comprovação disso, é o fato de que os canais da 14 de Março, Dr. Moraes, Generalíssimo Deodoro, Caripunas e parte da Quintino Bocaiúva, atualmente funcionam como simples reservatório de armazenamento da água pluvial e de

esgoto que chegam até eles, pois, em condições normais, não é possível constatar visualmente nenhum fluxo de água na superfície dos mesmos, com exceção do canal da Quintino Bocaiúva, a partir da Av. Roberto Camelier, sendo que, a água retida nesses canais são dissipadas pelo processo de evaporação e infiltração no solo.

Ainda com base na análise do modelo de elevação do terreno, observa-se que os pontos de cota altimétrica inferior ao do nível máximo de água que os canais de drenagem suportam, são os normalmente alagam. Isso significa dizer que, o sistema de drenagem pluvial subterrâneo tem seu comportamento alterado toda vez que o canal estiver cheio.

Vazão do Canal: A precariedade de conservação estrutural dos canais, somado as intervenções de urbanização ocorridas nos últimos anos na área de entorno, são fatores que contribuem de forma preponderante à ocorrência frequente de alagamentos e inundações durante o período chuvoso em Belém.

Modelagem Hidrológica: O modelo hidrológico aplicado para simular as condições de risco de alagamento e inundação para a bacia hidrográfica de estudo, construído com base em parâmetros meteorológicos (intensidade e duração da precipitação), hidrológico (vazão do canal) e aspectos físicos (dado de altimetria e uso do solo), mostrou-se bastante eficiente nos teste realizados com base nos dados de eventos pluviométricos já ocorridos e checados por meio de registros fotográficos e matérias jornalísticas. Entretanto, nem todos os pontos detectados pelo modelo foram possíveis de serem validados através dos relatos da mídia ou checagem de campo.

Sensibilidade do modelo: A análise de sensibilidade mostrou que as variáveis do modelo responderam coerentemente a sistema físico da bacia, isto é, quando ocorre um aumento da intensidade máxima da chuva aumentam as áreas alagadas ou inundadas, e também, quando houver um aumento nas condições de vazão do canal haverá uma redução no registro de áreas alagadas ou inundadas.

Sensibilidade do modelo: A análise de sensibilidade mostrou que as variáveis do modelo responderam coerentemente ao sistema físico da bacia, isto é, quando

ocorre um aumento da intensidade máxima da chuva aumentam as áreas alagadas ou inundadas, e também, quando houver um aumento nas condições de vazão do canal haverá uma redução no registro de áreas alagadas ou inundadas.

Sistema: O sistema de alerta de risco de alagamento e inundação concebido para gerenciar o modelo hidrológico se mostrou bastante prático, possibilitando que um usuário com um mínimo de treinamento possa operá-lo a partir de uma interface de entrada de dados e botões que executam todo o processamento necessário para a identificação e espacialização das prováveis áreas que serão impactadas. Este sistema permite também, que o usuário gere de forma automatizada relatórios indicando em mapa os pontos de alagamentos e inundações, como também, possibilita quantificar o número provável de moradias impactadas e o nome das vias de acesso que serão atingidas.

Uso e aplicação do modelo e sistema: Alguns aspectos importantes relacionados ao modelo devem ser destacados, como: i) a simplicidade das equações matemáticas aplicadas no modelo; ii) a facilidade de operacionalização do sistema; e iii) a disponibilidade do mapeamento das vias e do número de edificações prováveis de serem afetadas. Os pontos destacados já garantem a significância do modelo e sua aplicabilidade.

A eficiência dos resultados gerados pelo modelo hidrológico mostrou-se dependente da previsão meteorológica de curto prazo para geração dos dados de entrada referente às informações pluviométricas. Para um melhor ajuste do cálculo da vazão do canal, obtido através de coleta de campo, admite-se a necessidade de um estudo mais detalhado da influência das marés sobre o canal e o seu comportamento diante de uma situação de chuva intensa. Apesar disso, os resultados indicam que o sistema mostrou-se eficiente e pode ser usado como importante instrumento na geração de boletim de alerta de risco de alagamento e inundação. Em consequência dos bons resultados obtidos nos testes executados para a bacia em estudo, pode-se afirmar que o modelo apresenta condições de ser aplicado para outras bacias de Belém, uma vez que as características da maioria dos demais canais de drenagem da cidade são semelhantes ao da bacia em estudo.

No que diz respeito à operacionalização do sistema, destaca-se como ponto positivo a praticidade de manuseio obtida a partir das customizações geradas à execução do processamento do modelo hidrológico, e principalmente, no que diz respeito a aplicação prática por parte da Defesa Civil para identificar de maneira ágil e eficaz os pontos de alagamentos e inundações, e prognosticar quais as vias de acesso e o número de moradias prováveis de serem impactados por um evento pluviométrico.

8 SUGESTÕES

Sugere-se a realização de estudos futuros para:

- a) Verificar se de fato as alterações da cobertura vegetal em Belém e seu entorno esta influenciando na temperatura do ar e precipitação registrada pela estação meteorológica do INMET (CEASA).
- b) Estender este estudo as demais bacias hidrográfica de Belém onde existam registros de problemas de alagamento e inundação;
- c) Acoplar as previsões meteorológicas de estimativas de intensidades de chuvas produzidas pelos sistemas meteorológicos que atingem a região metropolitana de Belém com estes modelos de alagamento e inundação, com base nas observações geradas pelo radar meteorológico do SIPAM;
- d) Investir no desenvolvimento do sistema proposto tendo como base software de tecnologia aberta (open source), como forma de reduzir os custos da aplicação desta metodologia em outras áreas urbanas na Amazônia.

REFERENCIAS

BARTH, F. T. et al. *Modelo para gerenciamento de recursos hídricos*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, São Paulo: NOBEL/ABRH, 1987. 21p.

BERTHOLOT, R. *Curso de hidrologia sintética*. 1970. 178f. Dissertação (Mestrado em Hidrologia Aplicada). - IPH-UFRGS, Porto Alegre, 1970.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação In: TUCCI, C.E.M, *Hidrologia*. Ed. da UFRGS, EDUSP, 1993. cap. 5. p. 177- 242.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. *Precipitação*. In. TUCCI, C.E.M. (Org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001, p. 177-242.

BRANDÃO, A. M. As alterações climáticas na área metropolitana do Rio de Janeiro: uma provável influência do crescimento urbano. In: ABREU, M. de A. (org.). *Natureza e sociedade no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Secretaria Municipal de Cultura, Turismo e Esporte, 1992. p.143-200.

BRANDÃO, A. M. P. M. Clima urbano e enchentes na cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs) *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p.47-95: 240.

BRASIL, Delegacia do Patrimônio da União. *Relatório de demarcação*. Belém: Ministério da Fazenda, 1994.

BRASIL, Ministério das Cidades. *Cadernos cidades/Desenvolvimento Urbano – Política Nacional de Desenvolvimento Urbano 1*. Brasília: Ministério das Cidades, 2004.

BUNTING, E.T.; GUELKE, L. Behavioural and perception geography: a critical appraisal. In: ASSOCIATION AMERICAN GEOGRAPHERS., 1979, U.S.A. *Annals*, 1979. v.3, p.69.

_____. *Caracterização e tendências da rede urbana do Brasil: estudos básicos para caracterização da rede urbana* / IPEA, IBGE, UNICAMP. Ed.Cidades. Brasília: IPEA, 2001a.

_____. *Caracterização e tendências da rede urbana do Brasil: estudos básicos para caracterização da rede urbana* / IPEA, IBGE, UNICAMP, v. 02 Rede urbana. Brasília: IPEA, 2001b.

_____. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n.1. Porto Alegre: ABRH, 2000, p. 61-68.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. Ed. Edgard Blucher Ltda, EDUSP, 1974, 149 p.

COELHO, M.C.N. Impactos ambientais em áreas urbanas – teorias, conceitos e método de pesquisa. In: BRANDÃO, A. M. *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 19-45.

CORREA, R.L. *O Espaço Urbano*, São Paulo, Ed. Ática, 1989.

COSTA, T.C.D.da. *Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotécnico visando a formulação de diretrizes para a cartografia geotécnica no trópico úmido e aplicação na região metropolitana de Belém, na Escala 1:50.000*. 2001. 268 f. Tese (Doutorado) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 2001.

COWEN, D.J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, p. 1551-1554. 1988.

DESCHAMPS, M.V. *Vulnerabilidade socioambiental na região metropolitana de Curitiba*. 2004. 155F. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - UFPR, 2004.

DEVANTIER, B. A.; FELDMAN, A.D. Review of gis applications in hydrologic modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.119, 1993, 246p.

DOYLE, F.J. Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.44. n.12, p.1481-1485. 1978.

FERRAZ, F.F.B. *Aplicação de sistema de informações geográficas em estudo de área urbana de Piracicaba sujeita à inundação*. São Paulo: CENA/USP, 1996.

_____. *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001, p. 47-1-2.

GARCEZ, L. N. *Elementos de engenharia hidráulica e sanitária*. 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1974. 205p.

GARRISON, T. *Oceanography. a invitation to marine science*. 2.ed. Wadsworth: Belmont, 1998.

GONÇALVES, N.M.S. *Impactos pluviais e desorganização do espaço urbano em Salvador – BA*. 1992. 210f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, 1992.

HORTON, R.E. Drainage basin characteristics. *Trans. American Geophysical Union*, n.13, p. 350-361. 1932.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL (IBGE) – 1997. *Contagem da População*. Rio de Janeiro, 1998. 1CD-ROM.

ISAAKS, Edward H.; SRIVASTAVA, R.M. *An Introduction to applied geostatistics*. NY: Oxford University Press, Inc., 1989.

ISDR (INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION). *Living with Risk. A Global review of disaster reduction initiatives*. United Nations, Inter-Agency Secretariat. ISDR Secretariat. Preliminary Version. Geneva, Switzerland, 2002. 384p.

JENSON, S.; DOMINGUE, J. Extraction topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.54, p. 1593-1600. 1998.

LOMBARDO, M. A. *Ilha de calor nas metrópoles – o exemplo de São Paulo*. São Paulo: HUCITEC, 1985. 244p.

MAIDMENT, D. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using zIS. In: KOVAR, K.; NACHTENEBEL, H. *Applications of GIS in hydrology and water resources Proceedings of Vienna conf.*, April 1993. IAHS publ. no. 211, p. 181-192.

MAR da Bahia. Disponível em: <<http://www.mardabahia.com.br>>. Acesso em maio, 2009.

MESQUITA, A.; LEITE, J.B.A. Sobre a variabilidade do nível médio do mar na costa Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4. ed, p. 229-236. 1986.

MIKHAIL, E.M. et al. Panel discussion: the future of DMT. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. v.44, n.12, p. 1487- 1497. 1978.

MONTEIRO, C.A.F. *Clima e excepcionalismo – conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico*. Florianópolis: UFSC, 1991, 241p.

_____. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998, 652p.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978, 372p.

ONU, Organização das Nações Unidas. *The World at Six Billion*. Disponível em: <http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbillion.htm>. Acessado em: 22/09/2008.

PESSOA, M.C.P.Y. et al. *Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas*. Jaguariúna: EMBRAPA/CNPMA. v. 8, 1997, 83p.

PINTO, N. L. DE S. et al. *Hidrologia Básica*. São Paulo: Editora Edgar Blücher; Rio de Janeiro, 1976.

PINKAYAN, S. *Conditional Probabilities of Occurrence of Wet and Dry Years Over a Larg Continental area*. Hydrology Papers, 12. Colorado State University, Fort Collins, Col., U.S.A, 1966.

RAFAELI NETO, Sílvio Luis. *Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (Tese de doutorado - Departamento de Engenharia de Transporte). 2000, 231p.

SANTOS, Milton. *A Urbanização Brasileira*. 3. ed. São Paulo: Hucitec, 1996.

SANTOS, I. et al. *Hidrometria Aplicada*. Instituto de Tecnologia para o

Desenvolvimento. Curitiba-Pr, 2001, 372p.

SANTOS A.R. *Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Turvo Sujo*, Viçosa, MG. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, MG, 2001. 141p.

SCHWAB, G.O.; A.K. FREVERT; T.W. EDMINSTER, K.K. BARNES. *Soil and Water Conservation Engineering*. John-Wiley & Sons. New York, 1966. 683p.

SCHUELLER, T. *Controlling urban runoff*. A practical manual for planning and designing urban BMPs, 1987.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. *Infiltração e armazenamento no solo*. In: TUCCI, C. E. M. et al. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1997. p. 335-372.

STEYAERT, L.T. *A perspective on the state of environmental simulation modeling*. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O.; STEYAERT, L.T. (ed). *Environmental modeling with GIS*. New York: Oxford University Press, 1993. p. 16-30.

STHRALER, A.N. *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Trans. American Geophysical Union, p.38, p. 913-920. 1957.

STURARO, J. R.; LANDIM, P. M. B.; RIEDEL, P. S. *O emprego da técnica geoestatística da krigagem indicativa em Geotecnia Ambiental*: Revista Solos e Rochas, 2000, p. 23:157-164.

TUCCI, C.E.M. *Análise de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo de infiltração*. In: Anais. III Simpósio Brasileiro de Hidrologia. Brasília, 1979.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Ed.UFRGS, 2000.

TUCCI, C.E.M. *Vazões médias in: Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap.7, p.113-124.

TUCCI, C.; BERTONI, C. E.M. *Inundações urbanas na América do Sul*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003.

TUCCI, C.E.M.; GENZ, F. *Medidas de controle de inundações*. Estudos Hidrossedimentológicos do Alto Altieri Paraguai. IPH/MMA, 1994.

TUCCI, C.; SIMÕES LOPES, M. *Zoneamento das áreas de inundação*: Rio Uruguai. Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos. v. 3, Rio de Janeiro, 1985, P.19-45.

TUCCI, C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 669p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo, Editora McGraw Hill do Brasil, 1975.

VÉLEZ, O.L.P.; BERNASCONI, W.G.; RENAUD, B.C. *Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements* in: distributed hydrological models. Journal of Hydrology, v. 211, p. 266-274, 1998.

WILKEN, P.S. *Engenharia de drenagem superficial*. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, 1978, 447p.

WHITE, G. F. (ed.) *Natural Hazards local, national (2000), global*. New York: Oxford University Press USA, 1974.