



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA**

RANIERE RODRIGUES MELO DE LIMA

**ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA CIDADE
NATAL-RIO GRANDE DO NORTE**

**NATAL
2011**

RANIERE RODRIGUES MELO DE LIMA

**ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA CIDADE
NATAL-RIO GRANDE DO NORTE**

Dissertação de mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia
Sanitária, da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito obrigatório no
processo de formação para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Antônio
Marozzi Righetto

**NATAL
2011**

Seção de Informação e Referência
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Lima, Raniere Rodrigues Melo de.

Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na cidade Natal-Rio Grande do Norte. / Raniere Rodrigues Melo de Lima. – Natal, RN, 2011.
190f. ; il.

Orientador: Antônio Marozzi Righetto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Águas pluviais. – Dissertação. 2. Bacias de drenagem. – Dissertação. 3. Recursos hídricos. – Dissertação. 4. Qualidade da água. – Dissertação. 5. Modelagem hidráulica. – Dissertação. I. Righetto, Antônio Marozzi. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.116.2(813.2)

RANIERE RODRIGUES MELO DE LIMA

**ESTUDO DE MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS NA CIDADE
NATAL-RIO GRANDE DO NORTE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito obrigatório no processo de formação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Marozzi Righetto – Orientador

Prof. Dr. João Abner Guimarães Jr. – Examinador Interno UFRN

Prof. PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro – Examinador Externo UFC

Natal, 29 de agosto de 2011

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Inaldo Rodrigues de Lima e Ruth Regina Melo de Lima, aos meus irmãos, Ruthnaldo Rodrigues Melo de Lima e Rodrigo Rodrigues Melo de Lima, pelo carinho, dedicação, paciência e amor apresentado durante o constante desenvolvimento de minha vida e no meu aperfeiçoamento profissional. A esses, jamais poderei agradecer plenamente, pois nenhuma forma de agradecimento seria capaz de contemplar a magnitude de quanto os reconheço.

Ao professor Antônio Marozzi Righetto, pela confiança prestada desde os períodos de iniciação científica, por todas as informações proporcionadas e esclarecidas durante a graduação em Engenharia Civil e Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, pela dedicação, incentivo, paciência, amor e responsabilidade na formação do ser humano e na socialização do conhecimento.

Ao professor Lúcio Flávio Ferreira Moreira, por ter acreditado na minha vontade desde as primeiras experiências enquanto aluno de iniciação científica e por estar sempre apoiando meu ingresso e participação na vida acadêmica.

Ao professor Manoel Lucas Filho, pelos encaminhamentos e orientações que acabaram por me conduzir ao ponto onde hoje estou.

Ao professor João Abner Guimarães Jr., por todos os esclarecimentos e informações cedidas, pelo apoio na participação de projetos paralelos importantes, pela confiança e incentivo nas minhas atividades acadêmicas.

Ao professor Arthur Mattos, por todos os diálogos e as oportunidades oferecidas, pela confiança, disponibilidade e atenção desde meu ingresso como aluno de pós-graduação.

Ao professor Cícero de Onofre Andrade Neto, pelo incentivo na realização das pesquisas, pela enorme disponibilidade, por todo o conhecimento cedido e pelo apoio dado desde os períodos de graduação em Engenharia Civil.

Ao professor Luiz Pereira de Brito, pelas oportunidades de colaboração, pelas dúvidas esclarecidas, por todas as informações e demais apoios prestados.

A professora Maria del Pilar Durante Ingunza, pelo reconhecimento, incentivo, força e alegria durante as atividades de pós-graduação.

A professora Ada Cristina Scudelari, pela disponibilidade no esclarecimento das dúvidas e nos encaminhamentos dados para a resolução de uma série de outros impasses.

Ao professor João de Carvalho Filho, pelo incentivo, colaboração e apoio prestado na minha formação profissional.

A todos os funcionários que constituem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, especialmente a Leonor Barbosa dos Santos, por toda a eficiência, assistência e apoio integral.

A Biblioteca Central “Zila Mamede”, pela importante colaboração na aquisição de informações indispensáveis para a realização das pesquisas.

A CAPES e ao CNPq pelos auxílios prestados no financiamento dos estudos e publicações bem como no fornecimento de bolsas.

A todos os amigos, meu afeto e minha eterna gratidão.

RESUMO

As águas pluviais urbanas podem ser consideradas como recursos hídricos potenciais e também como problemas para o bom funcionamento das múltiplas atividades da cidade, decorrentes do uso e ocupação inadequados do solo, em geral, devido ao planejamento insatisfatório do desenvolvimento da ocupação das áreas, com poucos cuidados com relação aos aspectos ambientais da drenagem dos deflúvios superficiais.

Como premissa básica, há que se buscar a preservação dos mecanismos naturais de escoamento em todos os estágios de desenvolvimento de uma área urbana; preservando-se a capacidade de infiltração do solo na escala da área urbana; compreendendo os mecanismos naturais da drenagem, observando e preservando os espaços naturais dinâmicos dos cursos d'água, tanto na calha principal como na secundária. São desafios para uma urbanização sustentada, num convívio harmônico da modernidade desenvolvimentista, em que se coadunam os impositivos econômicos com qualidade ambiental e social.

Estudos integrados envolvendo a quantidade e a qualidade das águas pluviais são absolutamente necessários para se alcançar o entendimento e a obtenção de tecnologias adequadas, envolvendo tanto os aspectos relacionados com os problemas de drenagem quanto os aspectos de uso das águas quando submetidas a um adequado manejo dos deflúvios superficiais, como, por exemplo, a acumulação dessas em reservatórios de detenção com possibilidades de utilização em outras finalidades.

A proposta do presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um modelo computacional, ajustado às condições reinantes de uma bacia experimental urbana, a fim de possibilitar a implementação de práticas de manejo de recursos hídricos, a realização de simulações hidrológicas de quantidade e, de maneira preliminar, da qualidade das águas pluviais que afluem a uma lagoa localizada na extremidade de jusante da bacia de drenagem. Para tanto, utilizou-se, paralelamente, o modelo distribuído SWMM¹ com dados da bacia levantados com a máxima resolução possível a fim de permitir a simulação de cargas difusas, características heterogêneas da bacia tanto em termos de parâmetros hidrológicos e hidráulicos quanto do uso e ocupação do solo. O trabalho paralelo deve aprimorar o grau de entendimento dos fenômenos simulados na bacia bem como a atividade de calibração dos modelos, sendo essa amparada pelos dados de monitoramento adquiridos durante o período de vigência do projeto MAPLU (Manejo de Águas Pluviais Urbanas) pertencente a rede PROSAB (Programa de Pesquisas em Saneamento Básico) nos anos de 2006 a 2008.

PALAVRAS-CHAVE: águas pluviais, monitoramento, modelagem, manejo.

¹ O SWMM (Storm Water Management Model) é um modelo de armazenamento/hidrodinâmico originado em 1969, inicialmente desenvolvido pela Metcalf & Eddy Inc., Universidade Federal da Flórida, e a Water Resource Engineers, encomendado pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) e, posteriormente, aperfeiçoado pela Universidade da Flórida.

ABSTRACT

Urban stormwater can be considered as potential water resources as well as problems for the proper functioning of the manifold activities of the city, resulting from inappropriate use and occupation of the soil, usually due to poor planning of the occupation of the development areas, with little care for the environmental aspects of the drainage of surface runoff.

As a basic premise, we must seek mechanisms to preserve the natural flow in all stages of development of an urban area, preserving the soil infiltration capacity in the scale of the urban area, comprising the mechanisms of natural drainage, and noting preserving natural areas of dynamic water courses, both in the main channel and in the secondary. They are challenges for a sustainable urban development in a harmonious coexistence of modern developmental, which are consistent with the authoritative economic environmental and social quality.

Integrated studies involving the quantity and quality of rainwater are absolutely necessary to achieve understanding and obtaining appropriate technologies, involving both aspects of the drainage problems and aspects of use of water when subjected to an adequate management of surface runoff, for example, the accumulation of these reservoirs in detention with the possibility of use for other purposes.

The purpose of this study aims to develop a computer model, adjusted to prevailing conditions of an experimental urban watershed in order to enable the implementation of management practices for water resources, hydrological simulations of quantity and, in a preliminary way, the quality of stormwater that flow to a pond located at the downstream end of the basin. To this end, we used in parallel with the distributed model SWMM data raised the basin with the highest possible resolution to allow the simulation of diffuse loads, heterogeneous characteristics of the basin both in terms of hydrological and hydraulic parameters on the use and occupation soil. The parallel work should improve the degree of understanding of the phenomena simulated in the basin as well as the activity of the calibration models, and this is supported by monitoring data acquired during the duration of the project MAPLU (Urban Stormwater Management) belonging to the network PROSAB (Research Program in Basic Sanitation) in the years 2006 to 2008.

KEY-WORDS: rainwater, monitoring, modeling, management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arranjo esquemático de células em série	42
Figura 2 – Resumo dos fenômenos simulados através do SWAT	50
Figura 3 – Módulos estruturais do modelo SWMM.....	54
Figura 4 – Funcionalidades e interfaces dos módulos estruturais do Sistema UFC.....	56
Figura 5 – Compreensão do ciclo hidrológico através do modelo ABC.....	62
Figura 6 – Esquema da entrada de dados do modelo ABC	62
Figura 7 – Delimitação da área de drenagem	67
Figura 8 – Configuração da estação hidrométrica na Lagoa Mirassol.....	69
Figura 9 – Corte longitudinal da estação hidrológica da Lagoa de Mirassol	69
Figura 10 – Pontos de coletas do monitoramento qualitativo (M1, M2, M3, M4 e M5)	70
Figura 11 – a) Coletor e detalhe da tampa; b) Suporte para os coletores de água no tanque da lagoa de infiltração	71
Figura 12 – Amostrador automático, com detalhe para a disposição das garrafas em seu interior	72
Figura 13 – a) Localização de um ponto de coleta simples (M2); b) Amostrador Simples instalado na sarjeta; c) Detalhe do procedimento para coleta de dados da amostra	73
Figura 14 – a) Amostrador composto instalado na sarjeta; b) Detalhe da retirada do tubo vertical no momento da coleta c) Coletores dispostos na sarjeta	74
Figura 15 - Hietograma e hidrograma para os eventos de mês de junho de 2007	76
Figura 16 - Hietograma e hidrograma para os eventos de mês de junho de 2008	76
Figura 17 - Perfil do pH no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas	77
Figura 18 - Perfil da condutividade elétrica no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas	78
Figura 19 - Perfil da DQO no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecida	78

Figura 20 - Perfil do oxigênio dissolvido no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas	79
Figura 21 - Polutograma “multi-variáveis” – Evento do dia 17.06.2008.....	80
Figura 22 - Polutograma “multi-variáveis” – Evento do dia 06.08.2008.....	81
Figura 23 - Perfil da DQO nos pontos espaciais distribuídos nas bacias Mirassol e Cidade Jardim em função da precipitação acumulada em 1, 3 e 7 dias antecedentes ao evento	83
Figura 24 – Sentido de fluxo do escoamento e área de contribuição por amostrador	88
Figura 25 – Resultado da decomposição da área de contribuição por amostrador	89
Figura 26 – A) Apresentação da área do lote com a edificação; B) Discretização da área do lote	90
Figura 27 – Transferência dos escoamentos entre as áreas discretizadas.....	91
Figura 28 – Fenômenos considerados no balanço hídrico da frente e do fundo do lote	93
Figura 29 - Consideração das possibilidades de ocupação da área do lote	94
Figura 30 – A) Apresentação da interface do modelo; B) Janela para configuração dos padrões e tipos de lote; C) Janela de inserção dos parâmetros para caracterização das superfícies do lote	96
Figura 31 – Resultado da representação da bacia através de software de geoprocessamento.....	97
Figura 32 – Metodologia de cálculo da vazão para sarjeta de seção composta	98
Figura 33 – Fator de redução da sarjeta	99
Figura 34 – Determinação do polinômio para a curva do fator de redução....	100
Figura 35 – Metodologia adotada para a contabilização das vazões segundo intervalo de análise do modelo proposto.....	101
Figura 36 – Valores sugeridos para os parâmetros da equação de Horton segundo o SWMM.....	103
Figura 37 - Subdivisão das quadras em áreas contribuintes.....	106
Figura 38 - Imagem aérea da bacia de estudo.....	107
Figura 39 – Sequência para subdivisão da bacia de estudo. (A) Curvas de nível da bacia. (B) Traçado dos limites da bacia utilizando as curvas de nível. (C)	

Disposição das quadras e arruamentos na bacia. (D) Disposição dos lotes na bacia. (E) Discretização das áreas das quadras para formação das áreas contribuintes. (F) Resultado da subdivisão da bacia em áreas contribuintes.	108
Figura 40 – Resultado da discretização da bacia na interface de trabalho do SWMM	109
Figura 41 – Sistemática de cálculo do escoamento superficial através do SWMM	110
Figura 42 – Mapa de avaliação do nível de impermeabilização da bacia	113
Figura 43 – Valores sugeridos pelo SWMM para a profundidade de armazenamento nas depressões de superfícies permeáveis e impermeáveis	116
Figura 44 – Caracterização das subáreas, sarjetas e nós da rede	117
Figura 45 – Seção transversal de uma sarjeta do tipo mista.....	120
Figura 46 – Seção transversal da sarjeta (visualização na interface do SWMM)	121
Figura 47 – Esquema para tabulação da lagoa de retenção/infiltração. (A) Exportação da planta baixa da lagoa para o programa de modelagem em 3D. (B), (C) e (D) Sequência para configuração da lagoa nas três dimensões. (E) As figuras da esquerda para a direita representam o procedimento executado para a obtenção da área da superfície da lagoa, para pontos equidistantes de 1 (um) metro, contabilizados a partir da cota de fundo	123
Figura 48 - Resultado da tabulação no modelo de simulação.....	124
Figura 49 - Resultado da separação da bacia em lotes e quadras segundo o modelo proposto.....	133
Figura 50 - Resultado da criação dos nós e sarjetas para a rede de drenagem da bacia segundo o modelo proposto	134
Figura 51 – Resultado da aplicação de software para desenho na identificação de lotes, quadras, sarjetas e nós da rede de drenagem da bacia.....	136
Figura 52 – Arquivos de texto obtidos da conversão do desenho.....	137
Figura 53 – Resultado da identificação dos padrões e tipos de lotes existentes na bacia.....	139
Figura 54 – Levantamento quantitativo para os tipos de lote existentes na bacia	140
Figura 55 – Percentual dos tipos de lote existentes na bacia	140

Figura 56 - Importação dos arquivos de texto para inserção dos elementos representativos da bacia através do modelo proposto	144
Figura 57 - Caracterização da ocupação das residências no interior do lote .	145
Figura 58 – Caracterização das superfícies do lote	145
Figura 59 – Janela para cálculo da seção transversal da sarjeta.....	146
Figura 60 – Janelas para edição das propriedades dos elementos	147
Figura 61 – Importação dos arquivos de texto para edição das propriedades dos elementos representativos da bacia	148
Figura 62 – Ferramenta para importação do arquivo com os dados de precipitação	150
Figura 63 – Janela para importação e visualização dos dados de precipitação	151
Figura 64 – Gráfico de vazão no exutório da bacia gerado pelo modelo proposto	152
Figura 65 – Exemplo da planilha geral apresentada pelo modelo proposto...	153
Figura 66 - Resultado das vazões de escoamento superficial para o evento 11 (dados simulados)	155
Figura 67 - Resultado da análise de sensibilidade para o número de Manning das áreas impermeáveis	156
Figura 68 - Resultado da análise de sensibilidade para o número de Manning das áreas permeáveis	156
Figura 69 - Resultado da análise de sensibilidade para a profundidade do armazenamento nas áreas impermeáveis	157
Figura 70 - Resultado da análise de sensibilidade para a profundidade do armazenamento nas áreas permeáveis	157
Figura 71 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem de área impermeável sem armazenamento	158
Figura 72 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem do escoamento transferido entre a área permeável e impermeável da subárea.	158
Figura 73 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem de área impermeável.....	159
Figura 74 - Resultado da análise de sensibilidade para a taxa de infiltração máxima.....	159

Figura 75 - Resultado da análise de sensibilidade para a taxa de infiltração mínima	160
Figura 76 - Resultado da análise de sensibilidade para o coeficiente de decaimento.....	160
Figura 77 - Resultado da análise de sensibilidade para o tempo de saturação	161
Figura 78 – Resultado para o evento 9 e 10 (correlação = 0,94)	171
Figura 79 – Resultado para o evento 11 (correlação = 0,96)	172
Figura 80 – Resultado para o evento 15, 16 e 17 (correlação = 0,95)	172
Figura 81 – Resultado para o evento 20, 21 e 22 (correlação = 0,93)	173
Figura 82 – Resultado para o evento do dia 08/06/2008 (correlação = 0,95). 173	
Figura 83 – Dados observados para a variação da DQO durante o evento do dia 17/06/2008 (entrada da lagoa)	175
Figura 84 – Dados observados para a variação da DQO durante o evento do dia 06/08/2008 (entrada da lagoa)	175
Figura 85 – Dados simulados para a variação da DQO durante o evento do dia 30/05/2008 (entrada da lagoa)	177
Figura 86 – Dados simulados para a variação da DQO durante o evento do dia 30/05/2008 (lagoa de captação).....	177
Figura 87 – Dados simulado para a variação da DQO para o evento do dia 09/07/2008 (entrada da lagoa)	178
Figura 88 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 09/07/2008 (lagoa de captação).....	178
Figura 89 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 25/07/2008 (entrada da lagoa)	179
Figura 90 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 25/07/2008 (lagoa de captação).....	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Bacias de drenagem da zona norte de Natal	26
Tabela 2 - Bacias de drenagem das zonas leste/oeste/sul de Natal	26
Tabela 3 - Valores característicos da concentração média do evento	39
Tabela 4 - Valores de CME de acordo com o uso do solo	39
Tabela 5 - Equações para cálculo da concentração ao longo do reator de fluxo pistão ideal (condições estacionárias).....	41
Tabela 6: Equações para cálculo da concentração ao longo do reator e do efluente final no caso de reatores de mistura completa em série (condições estacionárias)	43
Tabela 7 - Resumo dos eventos de precipitação durante o período de 2007 a 2008	75
Tabela 8 – Estatística descritiva dos valores de DQO para os dos coletores distribuídos	82
Tabela 9 - Valores da DQO para as águas de escoamento superficial de acordo com os eventos monitorados.....	84
Tabela 10 - Área de contribuição dos pontos de coleta distribuídos ao longo da bacia.....	85
Tabela 11 - Precipitação total em milímetros para os eventos associados à DQO	85
Tabela 12 - Resultado da DQO (kg/ha) por amostrador segundo os eventos registrados.....	86
Tabela 13 - Valores médios da DQO (kg/ha)	87
Tabela 14 - Área em hectares das subáreas.....	109
Tabela 15 - Área em metros quadrados para os locais de interesse selecionados	110
Tabela 16 – Resultado da largura do escoamento para cada sub-bacia	111
Tabela 17 - Resultado da classificação e padronização das subáreas da bacia	112
Tabela 18 – Resultado da declividade média por subárea.....	114
Tabela 19 – Resultado da seleção dos métodos de transferência interna dos deflúvios por tipo de subárea	115
Tabela 20 – Cota dos nós da rede de drenagem da bacia.....	118

Tabela 21 - Parâmetros de classificação das vias	119
Tabela 22 - Dimensões mínimas para vagas de estacionamento e faixas de rolamento	119
Tabela 23 - Dimensões adotadas para a seção transversal da sarjeta no modelo SWMM.....	120
Tabela 24 – Número de condutos criados para a representação da rede de drenagem através do SWMM.....	121
Tabela 25 - Valores para tabulação da lagoa de retenção/infiltração.....	124
Tabela 26 - Valores dos coeficientes para caracterização de deposição seca e úmida	128
Tabela 27 – Eventos de precipitação selecionados para as atividades de calibração do SWMM	129
Tabela 28 – Quantitativo do total de elementos criados para representar a bacia segundo o modelo proposto	135
Tabela 29 – Levantamento dos padrões de lote presentes na bacia	138
Tabela 30 – Média para a largura e comprimento das residências por tipo de lote	141
Tabela 31 – Coeficientes para caracterização das superfícies do lote.....	143
Tabela 32 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades dos nós.....	148
Tabela 33 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades das sarjetas.....	148
Tabela 34 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades dos lotes.....	149
Tabela 35 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades das quadras.....	149
Tabela 36 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades do pluviômetro.....	149
Tabela 37 – Resultado do coeficiente de correlação de Pearson por evento selecionado	163
Tabela 38 – Resultado da calibração dos parâmetros do SWMM para o evento 9 e 10	165
Tabela 39 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 9 e 10	165

Tabela 40 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 11	166
Tabela 41 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 11	166
Tabela 42 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 17, 18 e 19	167
Tabela 43 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 17, 18 e 19	167
Tabela 44 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 22, 23 e 24	168
Tabela 45 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 22, 23 e 24	168
Tabela 46 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento do dia 08/06/2008	169
Tabela 47 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 22, 23 e 24	169
Tabela 48 – Média geral dos parâmetros por subárea.....	170
Tabela 49 – Média geral dos parâmetros de infiltração por subárea.....	170
Tabela 50 – Associações entre os eventos quali-quantitativos e quantitativos em função da precipitação total.....	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - área de contribuição

A_C - área de contribuição do fundo ou frente do lote

a - coeficiente de decaimento

ABC - Análise de Bacias Complexas

ARS - Agricultural Research Service

ARSBAM - Agência Reguladora de Saneamento Básico e Ambiental

A_{si} - área superficial da célula para o nível d'água "i"

AutoCAD® - software para desenvolvimento de desenhos técnicos

AutoLISP – linguagem de programação desenvolvida para ambiente AutoCAD®

B – concentração do poluente ao longo do tempo (períodos secos)

BMP – Best Management Practices

C - coeficiente de deflúvio

$C_{REAGENTE}$ - concentração do reagente

C_{B1} - máxima concentração possível do poluente (períodos secos)

C_{B2} - constante de meia saturação do poluente (períodos secos)

C_{W1} - concentração média do poluente na lavagem (períodos úmidos)

CAP - conexão em PVC para fechamento da seção transversal de tubulações

C_o – concentração inicial do reagente

C_{re} - concentração final do reagente

C_e - condutividade elétrica

C_i - concentrações do poluente no tempo "i"

CME - Concentração Média no Evento

CMS - (metros cúbicos por segundo)

CV - coeficiente de variação

d - profundidade da água no reservatório

D/D_L - coeficiente de dispersão longitudinal ou axial

$DBO_{5,20}$ – Demanda Bioquímica de Oxigênio ao 5 dia e a temperatura de incubação de 20 °C

DHI - Danish Hydraulic Institute

dp - profundidade do armazenamento

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EPA - Agência de Proteção Ambiental americana

EPANET® - software desenvolvido para simulação de redes de abastecimento de água

EXTRAN - módulo de propagação do escoamento na rede de condutos no SWMM

f - capacidade de infiltração em função do tempo

f_0 - capacidade de infiltração inicial do solo

f_∞ - capacidade de infiltração mínima do solo

H - altura do meio-fio

h - profundidade do rio

$H(t)$ - altura da lâmina d'água excedente na área do fundo ou frente do lote no tempo " t "

$H(t-\Delta t)$ - altura da lâmina d'água excedente na área do fundo ou frente do lote no tempo " $t-\Delta t$ "

ha – hectares

HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

h_{FRENTE} - altura da lâmina de armazenamento na frente do lote

h_{FUNDO} - altura da lâmina de armazenamento no fundo do lote

I - declividade

i - intensidade da chuva

IDF - Intensidade-Duração-Frequência

Imperv - definição da condição de escoamento superficial partindo da área permeável para a impermeável no ambiente de trabalho do SWMM

IPH/UFRGS - Instituto de Pesquisa Hidráulica/Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ISCO - modelo do equipamento automático para coleta de amostras de água

JAVA – linguagem de programação

K - coeficiente de decaimento da substância

K_R - constante de reação

L - carga do poluente no evento

L_1 e L_2 - largura dos escoamentos na área da seção transversal da sarjeta

LAHC - Laboratório de Hidráulica Computacional

LARHISA - Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

L_R – largura do rio

MAPLU - Manejo de Águas Pluviais Urbanas

MOUSE - Modelling of Urban Sewers

n - coeficiente de rugosidade de Manning

n_R - ordem da reação

NURP - National Urban Runoff Program

OD – Oxigênio Dissolvido

OMS - Organização Mundial da Saúde

Outlet - definição da condição de escoamento superficial partindo da área permeável e da impermeável diretamente para a tomada de água no ambiente de trabalho do SWMM

$P(t)$ - precipitação no tempo “ t ”

PDDMA - Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais

Perv - definição da condição de escoamento superficial partindo da área impermeável para a permeável no ambiente de trabalho do SWMM

pH - potencial hidrogeniônico

P_{TOTAL} - precipitação total

PVC - cloreto de polivinila

Q - vazão

$Q(t)_{CORREDOR}$ - vazão de contribuição das respectivas parcelas do corredor esquerdo e direito do lote no tempo “ t ”

$Q(t)_{TELHADO}$ - vazão de contribuição para 50% da área de telhado no tempo “ t ”

Q_0 – vazão na área da seção transversal da sarjeta

Q_1 - vazão na área da seção transversal 1 da sarjeta

Q_2 - vazão na área da seção transversal 2 da sarjeta

Q_3 - vazão na área da seção transversal 3 da sarjeta

Q_i - ordenadas do hidrograma no tempo “ i ”

$Q_{i,k}$ - vazão entre células adjacentes

R - coeficiente de correlação de Pearson

r - taxa de reação

R - volume total escoado no evento

RH - raio hidráulico da calha do rio

RS - Rio Grande do Sul

Runoff - escoamento superficial

S - declividade da sub-bacia

NRCS – Natural Resources Conservation Service

SEMARH - Secretaria de Estado e Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos

SEMOV - Secretaria Municipal de Obras e Viação

SI - Sistema Internacional

SOBEK - modelo desenvolvido pelo instituto holandês WL | Delft hydraulics

SPRINT - modelo de base física que simula a estrutura tridimensional da vegetação

SWAT - Soil and Water Assessment Tool

SWMM - Storm Water Management Model

t - tempo

U - velocidade

UFC - Universidade Federal do Ceará

UFC2 - módulo de desenho da rede e/ou Adutoras no AutoCAD® e de transferência de dados da rede/adutora para o

UFC3 - módulo de traçado de ligações em redes de abastecimento de água.

UFC4 - módulo de dimensionamento hidráulico (determinação de diâmetros ótimos) de redes de abastecimento de água

UFC5 - módulo de seleção de bombas hidráulicas e traçado da linha piezométrica de adutoras

UFC6 - módulo que simula computacionalmente o Golpe de Aríete em adutoras

UFC7 - módulo de desenho da rede e/ou Adutoras no ArcGIS® e de transferência de dados da rede/adutora para o EPANET®

UFC8 - módulo para traçado de rede de microdrenagem urbana no AutoCAD e de transferência de dados da rede para o SWMM

UFC9 - módulo de traçado e dimensionamento de redes de Esgotamento Sanitário dentro do ambiente AutoCAD®

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

USA - United States of America

USACE - Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América

USEPA - United States Environmental Protection Agency

UTM - Universal Transverse Mercator

v - velocidade de percurso

v* - velocidade de cisalhamento

VBA - Visual Basic for Applications

V_i - volume d'água na célula para o nível "i"

W - largura da sarjeta;

W_B - largura da sub-bacia

WASSP - Water Sector Support Programme

X - coordenadas do eixo x em UTM

Y - coordenadas do eixo Y em UTM

y_0 - altura da lâmina de escoamento na seção de Q_1

y_1 - altura da lâmina de escoamento na seção de Q_2 ou Q_3

Z_0 - cota inicial de fundo na célula

z_0 - declividade transversal da sarjeta na seção de Q_1 ou Q_2

z_1 - declividade transversal da sarjeta na seção de Q_0 ou Q_3

Z_i - cota de nível "i" na célula

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	24
1.1. RELEVÂNCIA.....	26
1.2. JUSTIFICATIVA	29
1.3. OBJETIVOS	32
1.3.1. OBJETIVO GERAL	32
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	34
2.1. DRENAGEM URBANA.....	34
2.1.1. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO.....	34
2.1.2. POLUIÇÃO DIFUSA.....	36
2.2. MODELAGEM HIDRÁULICA-HIDROLÓGICA	45
2.2.1. ANÁLISE PRELIMINAR DE MODELOS EXISTENTES	48
2.2.1.1. MODELO SWAT (SOIL WATER AND ANALYSIS TOOLS).....	49
2.2.1.2. MODELO HEC-HMS (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER)... 51	
2.2.1.3. MODELO SWMM (STORM WATER MANAGEMENT MODEL)	52
2.2.1.4. MODELO UFC	55
2.2.1.5. MODELO SOBEK-URBAN	57
2.2.1.6. MODELO INFOWORKS	58
2.2.1.7. MODELO MOUSE-DHI.....	59
2.2.1.8. MODELO MODCEL	59
2.2.1.9. MODELO ABC	61
2.2.1.10. MODELO IPH	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	66
3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	68
3.2.1. DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO QUANTITATIVO NA ÁREA DE ESTUDO	68
3.2.2. DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO QUALITATIVO NA ÁREA DE ESTUDO	70
4. RESULTADOS DO MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO.....	74
4.1. DADOS DA PLUVIOMETRIA LOCAL	74
4.2. DADOS DOS DEFLÚVIOS ORIGINADOS NA BACIA	75
4.3. DADOS DO MONITORAMENTO QUALITATIVO.....	77
4.3.1. DADOS DA PRIMEIRA FASE (COLETORES MANUAIS)	77
4.3.2. DADOS DA SEGUNDA FASE (COLETOR AUTOMÁTICO ISCO 6712).....	79
4.3.3. DADOS DA TERCEIRA FASE (COLETORES DISTRIBUÍDOS)	82

4.3.4.	TRATAMENTO DOS DADOS QUALITATIVOS PARA MODELAGEM	84
5.	APRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	90
6.	APLICAÇÃO DA MODELAGEM	102
6.1.	APLICAÇÃO DO MODELO SWMM	102
6.1.1.	DADOS DE ENTRADA	102
6.1.2.	PARÂMETROS E AJUSTES DO MODELO	102
6.1.2.1.	AJUSTES GERAIS (UNIDADE DE MEDIDA)	102
6.1.2.2.	AJUSTES GERAIS (METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO)	102
6.1.2.3.	AJUSTES GERAIS (DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DOS DEFLÚVIOS)	104
6.1.2.4.	AJUSTES GERAIS (DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS DE SIMULAÇÃO E DOS INTERVALOS DE CÁLCULO)	104
6.1.3.	FATORES CLIMATOLÓGICOS	104
6.1.4.	PARÂMETROS HIDROLÓGICOS	105
6.1.5.	PARÂMETROS HIDRÁULICOS	116
6.1.6.	PARÂMETROS DE QUALIDADE E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	124
6.1.6.1.	CARACTERIZAÇÃO DO POLUENTE	125
6.1.6.2.	CARACTERIZAÇÃO DO USO DO SOLO	126
6.1.6.3.	CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO SECA	127
6.1.6.4.	CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO ÚMIDA	127
6.2.	CALIBRAÇÃO DO SWMM	128
6.3.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO SWMM	130
6.4.	ASPECTOS DA UTILIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	131
6.4.1.	DADOS DE ENTRADA	131
6.4.2.	RECONHECIMENTO E DISCRETIZAÇÃO DAS PARTES CONSTITUINTES DA BACIA SEGUNDO O MODELO PROPOSTO	132
6.4.3.	UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE DESENHO E GEOPROCESSAMENTO PARA EXPORTAÇÃO DE ARQUIVOS DE TEXTO	135
6.4.4.	CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DA BACIA	138
6.4.5.	TRABALHO NO AMBIENTE DO MODELO	144
6.4.5.1.	INSERÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DA BACIA	144
6.4.5.2.	IMPORTAÇÃO DE ARQUIVOS TEXTO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS	147
6.4.5.3.	IMPORTAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CHUVA	150
6.4.6.	EXCECUÇÃO DO MODELO	151

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	154
7.1. RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO SWMM.....	154
7.2. RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DO SWMM.....	163
7.3. RESULTADO DA SIMULAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA ATRAVÉS DO SWMM	174
8. CONCLUSÃO	181
REFERÊNCIAS.....	185

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos tem-se percebido uma preocupação acentuada com as questões de poluição do meio ambiente, não diferentemente se observa tais inquietações no que condiz com a gestão e gerenciamento dos recursos hídricos. O controle desse recurso tem se tornado uma ferramenta potencial na garantia do desenvolvimento e da sobrevivência da humanidade, passando essa agora a reavaliar a sua condição “ser antrópico” e objetivando o distanciamento de um futuro que, prospectivamente, é observado de uma maneira não amistosa.

Segundo **Von SPERLING (2007)**, os fatores naturais e antrópicos são elementos considerados capazes de alterar, por exemplo, a qualidade da água, sendo essa, portanto, uma função dependente das condições de uso e ocupação do solo e das próprias características naturais de uma região.

Dentro do contexto de modificação do meio, existe, também, uma preocupação com o surgimento dos impactos causados pelo crescimento desordenado dos espaços urbanos. Um reflexo dessa situação é claramente evidenciado pela resposta dos sistemas de infraestrutura existentes como é o caso dos sistemas de drenagem das mais diferentes capitais dos estados do Brasil. Percebe-se que a magnitude e as conseqüentes catástrofes provocadas pelas atuais ocorrências dos eventos hidrológicos explicitam, não somente, o despreparo social para enfrentar tais ocorrências mais também a falta de comprometimento com o correto processo de ordenação urbana e territorial sob o ponto de vista de gestão e gerenciamento do crescimento desses espaços.

GENZ e TUCCI (1995) comentam que o desenvolvimento urbano brasileiro vem ocorrendo sem que exista uma atenção voltada para a ampliação do volume de escoamento superficial, gerado em função da ocupação e uso do solo. A resposta para essa condição é sentida pelos freqüentes problemas de enchentes na maioria das cidades.

TUCCI (2002), afirma que o controle do impacto da urbanização pode ser conseguido através da adoção de um conjunto de ações ordenadas a fim de buscar o equilíbrio entre o desenvolvimento e as condições ambientais das cidades.

Percebe-se então que existe uma necessidade eminente pelo surgimento e aplicação de estudos que viabilizem, do ponto de vista de embasamento técnico e científico, a aplicação de medidas que garantam a tomada de ações de maneira coordenada e integrada.

A urgência na tomada de decisões é fortemente amparada pelo desenvolvimento da tecnologia, onde os métodos e processos tão necessários para efetuar as mais distintas avaliações de uma determinada situação, utilizam, cada vez melhor, resultados reais/representativos do que se afigura na realidade. Esse nível de confiabilidade está aliado, também, a possibilidade de se obter dados/informações sobre o que se deseja analisar, ou em outras palavras, quanto maior for o número de informações disponíveis que permitam a correta caracterização do meio em análise, maior será, evidentemente, a capacidade de poder compreendê-lo e gerar conclusões sobre seus comportamentos.

Quando se trabalha, por exemplo, com avaliações de sistemas que dependem de uma análise das variáveis inseridas em um contexto hidrológico, como é o caso dos sistemas de drenagem, deve-se concordar que a variabilidade das repostas obriga, quem estuda esse tipo de sistema, a estar de posse de uma série de dados que sejam qualitativamente suficientes, fato esse que nem sempre é possível.

A realidade é que uma parte das constantes buscas pelo conhecimento das complexas correlações entre os sistemas na natureza pode ser justificada por uma necessidade fundamentada na solução dos impactos provenientes da interação homem-natureza. Tal interação tem exigido uma preparação para que se identifique o ponto de equilíbrio entre a maximização da utilização dos recursos disponíveis e a convivência harmônica com o meio ambiente. O que a prática e a teoria têm comprovado é que a melhor forma de se trabalhar dentro dessa dualidade é poder prever as respostas do meio diante das possíveis ações sobre esse meio.

A formulação de previsões é algo que está amplamente ligada a integração entre ferramentas computacionais e a ciência da modelagem. Sabe-se que o desenvolvimento da tecnologia agrega a capacidade de criar modelos cada vez mais robustos e relacionados a extensas bases de informações. Essa é uma característica que incentiva a elaboração de modelos e que permite a utilização dessa ferramenta como forma de auxiliar a tomada de ações preventivas e corretivas.

É preciso ter em mente que existe uma urgência na adoção de medidas que viabilizem a utilização, contemplando uma maneira mais racional, dos recursos disponíveis no planeta, principalmente pelo que se apresenta em termos de disponibilidade hídrica. Portanto, torna-se cada vez mais imprescindível a prática de manejo dos recursos hídricos. Nesse sentido, a análise preditiva da ocorrência de eventos se constitui numa das principais formas de solucionar os diversos problemas gerados pelo mau aproveitamento ou uso inadequado da água disponível em uma determinada região.

1.1. RELEVÂNCIA

A cidade de Natal tem como peculiaridade, a formação de algumas bacias fechadas, em que os deflúvios superficiais são acumulados em lagoas naturais ou artificiais, localizadas nos baixios dessas bacias. De acordo com o **PDDMA (2009)** (Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais) da cidade, Natal possui um sistema de drenagem constituído de 20 (vinte) bacias, algumas de pequenas dimensões com áreas, por exemplo, de aproximadamente 100 hectares e outras chegando a ter áreas com valores próximos a 2400 (dois mil a quatrocentos) hectares. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as bacias da cidade de Natal com os respectivos valores de suas áreas de drenagem.

Tabela 1 - Bacias de drenagem da zona norte de Natal

Bacias	Área (ha)	
	Abertas	Fechadas
I Rio Doce	617,5	
II Lagoa Azul	2.417,1	
III Lagoa de Extremoz	100,2	
IV Rio Golandim	181,5	
V Rio Potengi/Salinas	885,4	
VI Redinha	108,2	
Total Zona Norte	4.309,9	

FONTE: Estudos Hidrológicos do PDDMA - 1º Relatório, 2009

Tabela 2 - Bacias de drenagem das zonas leste/oeste/sul de Natal

ZONAS LESTE/OESTE/SUL

Bacias	Área (ha)	
	Abertas	Fechadas
VII Potengi/Rocas-Ribeira	376,3	
VIII Praias urbanas	218,2	
IX Riacho do Baldo	714,8	
X Potengi/Quintas-Base Naval	304,1	
XI Parque das Dunas		1.194,0
XII Rio das Lavadeiras	1.264,8	
XIII Via Costeira	116,2	
XIV Rio Potengi/Felipe Camarão	712,6	
XV Lagoas da Jaguarari		431,8
XVI Rio Pitimbú	1.048,9	
XVII San Vale/Cidade Satélite		1.145,4
XVIII Rio Jundiá/Guarápes	398,0	
XIX Lagoinha		1.016,0
XX Praia de Ponta Negra	949,3	
Total Zonas Leste/Oeste/Sul	6.103,2	3.787,2
Total Natal	10.413,1	3.787,2
TOTAL GERAL	14.200,3	

FONTE: Estudos Hidrológicos do PDDMA - 1º Relatório, 2009

O importante a destacar, de acordo com o que é demonstrado pela Tabela 1 e a Tabela 2, é que as bacias fechadas, sem exutório de escoamento superficial, localizadas nas zonas Oeste e Sul, totalizam uma área de drenagem de 3.787,2 hectares, correspondendo a 26,7% do território municipal. Esse é um fator de extrema importância quando analisados os aspectos de gestão, planejamento e manejo dos recursos hídricos.

Pela falta de planejamento do uso e ocupação da bacia, em muitas dessas bacias, há incompatibilidade entre os volumes pluviais gerados com a capacidade de armazenamento das lagoas. Como solução de engenharia, nas lagoas sub-dimensionadas são implantados sistemas de bombeamento que transferem volumes de água acumulada para outras lagoas de maiores dimensões, num processo de transferência dos pontos mais interiores para as fronteiras do perímetro urbano.

Além de problemas de drenagem causados pelo sub-dimensionamento das lagoas, convivem os problemas de manejo, com ineficácia da preservação da capacidade de infiltração das lagoas, causadas pela sedimentação de partículas e resíduos sólidos carregados pelos deflúvios superficiais, intensificação da ocupação do espaço urbano, depressão ambientalistas para que as águas pluviais sejam preponderantemente infiltradas no solo, a fim de evitar a redução de recarga natural do aquífero de abastecimento de água da cidade. Tem-se, portanto, um conflito entre duas necessidades: a de transferir as águas pluviais excedentes para outros locais e a de manter as águas pluviais nos locais a fim de maximizar o processo de recarga do aquífero urbano.

De acordo com **TUCCI (2004)**, com relação aos aspectos de qualidade das águas pluviais, reconhece-se que as primeiras águas de drenagem urbana, decorrentes do início da precipitação, concentram a maior parcela da carga poluidora, porque lavam a atmosfera e a superfície da bacia (solo, pavimentos, sarjetas, canaletas) carregando o lixo e os esgotos acumulados. Estima-se que 90% da carga poluidora das águas de drenagem, é concentrada nas águas do início das chuvas, até os primeiros 5 ou 25 mm, dependendo das condições da bacia. Removendo-se estas primeiras águas, que podem ser desviadas para reservatórios estrategicamente posicionados no sistema de drenagem, resta o maior volume de água com qualidade muito superior (10% da carga poluidora, ou menos).

Para que se possa expor melhor a relevância do trabalho em questionamento, é possível citar um pouco das primeiras experiências adquiridas com o projeto MAPLU (Manejo de Águas Pluviais Urbanas) desenvolvido pela UFRN (Universidade Federal do

Rio Grande do Norte) na cidade de Natal. O projeto foi aplicado durante o período de 2006 a 2008 contando com a parceria de órgãos municipais e estaduais responsáveis pelos recursos hídricos, drenagem urbana e meio ambiente; respectivamente, a Secretaria de Estado e Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), a Secretaria Municipal de Obras e Viação (SEMOV) e a Agência Reguladora de Saneamento Básico e Ambiental (ARSBAM). A proposta vinha exatamente ao encontro das questões já explicitadas anteriormente, ou seja, a de se analisar, utilizando-se uma área piloto de drenagem, a geração dos deflúvios, o carreamento do material de superfície pelas águas pluviais, a análise temporal da qualidade das águas de deflúvio, da capacidade de infiltração das lagoas de retenção e de infiltração, do manejo das águas acumuladas e de processos de utilização como o da injeção de água no subsolo. A execução do projeto era integralizada por três principais frentes de atividades, sendo elas:

- 1º Caracterização hidrológica, hidrogeológica e ocupacional da área, levantamentos de parâmetros, monitoramento hidrológico e modelagem hidrológica;
- 2º Estudo da qualidade das águas pluviais através de monitoramento e modelagem;
- 3º Estudo da retenção, infiltração e manejo das águas pluviais, em função da quantidade e qualidade.

A pesquisa possuía uma característica de natureza aplicada, com resultados de importância à utilização de parâmetros hidrológicos e de qualidade, modelos distribuídos, técnicas de análise, qualidade das águas pluviais dos hidrogramas de cheia, avaliação temporal das lagoas de retenção e infiltração e experimentos de manejo das águas pluviais em função da qualidade, seja a utilização para o abastecimento de fins menos nobres, seja na infiltração e recarga do aquífero.

Os conhecimentos adquiridos pelo desenvolvimento do projeto MAPLU demonstraram a indiscutível existência de uma série de problemáticas tanto no lado técnico, quando avaliadas as dificuldades em se criar mecanismos para o correto monitoramento dos aspectos quali-quantitativos na bacia, como no lado científico/teórico, onde a busca e reflexão para uma melhor compreensão de fenômenos como a poluição difusa ainda é necessária.

Já para o presente trabalho o que se propõe é à construção de um modelo computacional aplicado a hidrológica de águas pluviais urbanas. Utilizando-se de algumas informações obtidas durante a aplicação do projeto MAPLU, a concepção do modelo deve possibilitar contemplar a variabilidade espacial das características da bacia, tendo a área de um lote como foco para a adoção de práticas de manejo e da influência dessas na

modificação das interações entre os fenômenos hidrológicos e a região de estudo. As observações, através das implementações das práticas de manejo, envolvem não somente a identificação da redução dos impactos sobre os sistemas existentes mais também a constatação de que uma parcela dos deflúvios suscetíveis ao armazenamento dentro do lote é passível de reutilização, tendo-se em mente a caracterização dos recursos armazenados e a consequente identificação das possibilidades de uso.

Desenvolvido em um ambiente de linguagem aberta, o modelo computacional poderá receber a contribuição por parte de outros pesquisadores e ser aprimorado diante do desenvolvimento de novas pesquisas. A ideia é liberar a distribuição do software e disponibilizar um manual contendo as informações de utilização e detalhamento do código elaborado.

1.2. JUSTIFICATIVA

As águas pluviais urbanas podem ser consideradas como recursos hídricos potenciais e também como problemas para o bom funcionamento das múltiplas atividades da cidade, decorrentes do uso e ocupação inadequados do solo, em geral, devido ao planejamento insatisfatório do desenvolvimento da ocupação das áreas, com poucos cuidados com relação aos aspectos ambientais da drenagem dos deflúvios superficiais.

Como premissa básica, existe uma necessidade de se buscar a manutenção dos mecanismos naturais de escoamento em todos os estágios do desenvolvimento de uma área urbana; preservando-se a capacidade de infiltração do solo na escala da área urbana; compreendendo os mecanismos naturais da drenagem, observando e preservando os espaços naturais dinâmicos dos cursos d'água, tanto a calha principal como a secundária. São desafios para uma urbanização sustentada, num convívio harmônico da modernidade desenvolvimentista, em que se coadunam os impositivos econômicos com qualidade ambiental e social.

Na realidade urbana brasileira atual, as águas de drenagem carregam resíduos sólidos e esgotos sanitários acumulados na bacia no período entre duas chuvas, sendo a quantidade de lixo e esgotos maior quanto piores forem as condições de saneamento básico na bacia de drenagem e maior o espaço de tempo entre duas chuvas consideradas. Como consequência, ocorrem frequentes problemas de obstrução nos sistemas de drenagem, dificuldades operacionais nos dispositivos de retenção e detenção devido a má qualidade das águas, e sérios problemas de saúde pública, devido ao aumento de ocorrência de algumas doenças de veiculação hídrica.

Estudos integrados envolvendo a quantidade e a qualidade das águas pluviais são absolutamente necessários para se alcançar o entendimento e a obtenção de tecnologias adequadas envolvendo tanto os aspectos relacionados com os problemas de drenagem quanto os aspectos de uso das águas quando submetidas a um adequado manejo dos deflúvios superficiais, acumulação em reservatórios de detenção com possibilidades de uso em distinta finalidades.

A clareza com que se apresentam os anseios pelo surgimento de estudos, envolvendo técnicas ou práticas no manejo dos recursos hídricos, é agregada pela surgente necessidade da visualização de diferentes cenários, onde os resultados das respostas dadas pelo meio observado são consequências da imposição de eventos com distintas magnitudes. Nesse sentido, a análise preditiva, da ocorrência de eventos se constitui numa das principais formas de solucionar os diversos problemas gerados pelo mau aproveitamento ou uso inadequado da água disponível em uma determinada região. A proposta do presente trabalho objetiva a implementação de um modelo computacional, ajustado às condições reinantes de uma bacia experimental urbana, a fim de possibilitar a realização de simulações hidrológicas de quantidade e qualidade das águas pluviais que afluem a uma lagoa localizada na extremidade de jusante da bacia de drenagem. Para tanto, será utilizado um modelo já consagrado paralelamente a um modelo em desenvolvimento. Esse tipo de atividade servirá como parte da metodologia de calibração e validação. No caso da escolha do modelo consagrado, optou-se pelo modelo distribuído SWMM (Storm Water Management Model) com dados da bacia levantados com a máxima resolução possível a fim de permitir a simulação de cargas difusas, características heterogêneas da bacia tanto em termos de parâmetros hidrológicos e hidráulicos quanto do uso e ocupação do solo.

Com base no contexto desenvolvido entre a necessidade de se prever eventos e as diversas ações do homem sobre o meio ambiente é que se justifica a existência dos modelos numéricos. Segundo **RIBEIRO E ARAÚJO (2002)**, trabalhar com modelos numéricos é estar de posse de uma ferramenta capaz de fornecer subsídios para tomada de decisões, que podem reformular a configuração de diversos sistemas e conseqüentemente garantir, por exemplo, melhorias na qualidade dos recursos hídricos.

Em termos de viabilidade, a proposta do projeto é utilizar, conforme explicitado anteriormente, um modelo hidrológico distribuído, consagrado internacionalmente, e um modelo próprio desenvolvido em linguagem aberta, fatos esses que não requerem ônus no seu processo de aquisição ou construção. É importante ressaltar que existe ainda uma

condição de suporte com relação aos aspectos de disponibilidade de recursos financeiros, informacionais e suporte técnico, tendo-se em mente a necessidade de aquisição de material de informática, bibliográfico e demais fontes em meio digital para o reconhecimento das características do local de estudo.

De maneira concisa, a justificativa da aplicação do projeto pode ser tomada com base nas seguintes considerações:

- 1) A ocupação do solo na região metropolitana do município de Natal exerceu um forte impacto nas condições de infiltração e recarga do manancial subterrâneo. Atualmente, verifica-se a necessidade de uma retomada às condições hidrológicas originais, com ênfase na infiltração da água no solo e recarga do aquífero;
- 2) Fatores relacionados com a qualidade da água pluvial indicam a necessidade de estudos que permitam melhorar os padrões de qualidade da água pluvial que alcança o reservatório. O projeto em questionamento pretende utilizar, mesmo que preliminarmente, as informações adquiridas com o desenvolvimento do projeto MAPLU para que seja possível considerar as primeiras avaliações do processo de formação e propagação de poluentes na bacia. Tais avaliações serão consideradas também dentro do contexto de comportamento dos modelos em utilização;
- 3) A modelagem do escoamento superficial na bacia de drenagem aliada aos primeiros dados de monitoramento das variáveis hidráulicas e hidrológicas deve permitir calibrar parâmetros capazes de refletir as condições locais, fornecendo subsídio para tomada de decisões como, por exemplo, a necessidade da aplicação de modificações sobre bacia, possíveis diagnósticos da qualidade do recurso hídricos armazenados ou definição de atividades que condicionem reutilização desse recurso;

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

A proposta do presente trabalho é a de elaborar um modelo computacional visando à realização de pesquisa voltada ao estudo da hidrologia urbana em uma área piloto da cidade de Natal, no sentido de caracterizar adequadamente a transformação chuva-vazão-qualidade através de modelagem distribuída e da utilização dos resultados dos primeiros experimentos obtidos durante a vigência do projeto MAPLU, sendo esse aplicado em uma área piloto representativa das bacias fechadas da cidade de Natal, com estudo do transporte de resíduos sólidos, sedimentos e contaminantes e do manejo de águas pluviais de melhor qualidade, quando separadas as primeiras águas de lavagem da bacia de drenagem.

De maneira concisa, o objetivo geral do projeto em questionamento é a de estudar os aspectos quantitativos e qualitativos das águas de pluviais em uma área de drenagem piloto na cidade de Natal. Na realização dos estudos, a modelagem será utilizada como ferramenta para análise de cenários, dado a ocorrência de eventos com distintas magnitudes, onde o desenvolvimento de um modelo proposto, elaborado em linguagem JAVA, será aplicado paralelamente a um modelo consagrado. Em linhas gerais, busca-se gerar avaliações sobre as extensas relações entre os aspectos chuva-vazão-poluente e condicionar a elaboração de um modelo que permita melhores observações das respostas da bacia em função da aplicação de atividades de manejo dos recursos hídricos. É importante ressaltar que as atividades de manejo são aplicadas criando-se expectativas no que diz respeito à diminuição dos impactos sobre os sistemas de infraestrutura existentes e na possibilidade de definir destinos de uso para parcelas dos recursos hídricos suscetíveis ao armazenamento na bacia.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitoramento Hidrológico: aquisição e análise dos dados referentes ao monitoramento das componentes hidrológicas em uma bacia piloto, obtidos pelo desenvolvimento do projeto MAPLU, visando o levantamento de hietogramas, hidrogramas e observação dos volumes de infiltração e retenção para a lagoa de captação de águas pluviais existente na área de estudada. Esses dados são imprescindíveis para o processo de calibração e validação do modelo com relação aos aspectos quantitativos;

- Monitoramento da qualidade das águas pluviais: aquisição análise dos dados referentes ao monitoramento das características de qualidade da água de escoamento superficial em uma bacia piloto, obtidos pelo desenvolvimento do projeto MAPLU. Tais informações devem ser utilizadas diante de uma primeira avaliação do comportamento em termos de acúmulo e propagação dos poluentes na área estudada. Essas considerações levam em conta as atividades de construção de um novo modelo computacional e a necessidade de reconhecer as propriedades do modelo consagrado, no que diz respeito ao tratamento desses aspectos;
- Modelagem hidrológica e da qualidade das águas pluviais: iniciar a elaboração de um modelo hidrológico distribuído com utilização paralela de um modelo consagrado a fim de gerar uma compreensão integrada dos fenômenos que envolvem o transporte e, de maneira preliminar, o comprometimento da qualidade da água de escoamento superficial. A construção do modelo computacional deve ser amparada pela observação e análise crítica de modelos existentes e já difundidos na literatura. A modelagem deve permitir realizar simulações que resultem numa caracterização coerente do comportamento hidrológico da bacia, valendo-se, para isso, das atividades de calibração e validação segundo as condicionantes quantitativas e, sob um ponto de vista conceitual, de alguns dos parâmetros qualitativos da água de escoamento superficial gerada na bacia;
- Estudos de manejo: o algoritmo utilizado na concepção do modelo a ser elaborado deve possibilitar a adoção de medidas que viabilizem práticas de manejo dos recursos hídricos, tomando-se como base a unidade de um lote com padrão residencial unifamiliar;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. DRENAGEM URBANA

A tradicionalidade do antigo conceito da drenagem urbana determinava que a aplicação dessa importante ferramenta era designada, apenas, pela necessidade de se transportar os escoamentos superficiais de uma região para outra da forma mais eficiente possível. Sabe-se, entretanto, que esse conceito tradicional, isoladamente, não é viável sob o ponto de vista de aplicação na atualidade. Os desenvolvimentos gerados pelos estudos internacionais na área de drenagem urbana, conforme descrito em **TUCCI (2004)**, refletem que a aplicação das atividades atribuídas a essa área devem estar diretamente relacionadas a uma maior e melhor compreensão integrada do ambiente urbano, agregando-se ainda uma participação mais eficiente por parte dos responsáveis no que condiz com os aspectos legais, institucionais, tecnológicos e sociológicos.

DALTRO FILHO (1995) apresenta uma definição da Organização Mundial da Saúde (OMS), na qual o saneamento ambiental, entendido dentro de sua abrangente configuração, deve ser constituído pelas atividades de abastecimento de água, em quantidade e qualidade suficiente, sistemas de esgotamento sanitário, drenagem das águas, coleta e deposição final do lixo e ainda controle tanto da poluição do ar como da produção de ruídos. A linha de pensamento do saneamento ambiental propõe, portanto, que a drenagem urbana deve ser compreendida como um elemento indispensável na constituição da qualidade de vida da sociedade, tendo-se em vista, que a mesma apresenta um conjunto de ações objetivando assegurar condições de bem estar, saúde e até mesmo segurança a uma população.

2.1.1. IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO

As bacias submetidas a um processo de urbanização sofrem mudanças nas suas características físicas, hidrológicas e hidráulicas, e a magnitude dessas mudanças depende fundamentalmente da intensidade do processo de impermeabilização do solo (**SANCHEZ, 1987**). Nas atuais circunstâncias, as modificações geradas pelo impacto da urbanização nas bacias vêm sendo alvo de estudos constantes pelo grande número de transtornos provenientes dessa condição.

Segundo **GENZ e TUCCI (1995)**, os principais impactos que decorrem do desenvolvimento de uma área urbana sobre os processos hidrológicos estão ligados à forma de ocupação da terra, e também ao aumento das superfícies impermeáveis em

grande parte das bacias que se localizam próximas as zonas de expansão urbana ou inseridas no perímetro urbano.

É de se esperar que o aumento das zonas impermeabilizadas aumente também as vazões de pico e consequentemente o volume total escoado nas bacias. O grande problema advindo dessa condição é que, muitas vezes, os sistemas de drenagem pluvial podem não ter sido projetados para conceber vazões com essa magnitude, fato esse que acaba por agregar ineficiência a própria rede bem como custos elevados pelos impactos de seu mau funcionamento.

Para que se tenha uma melhor ideia do impacto da urbanização, **LEOPOLD (1968)** cita em seus trabalhos, com base na percentagem de alteração da drenagem (condutos e canais) bem como nos níveis de impermeabilização, que a alteração na vazão natural de enchente pode chegar a uma ampliação de até quase sete vezes. Outro fator de extrema importância, referenciado por **TUCCI *et al.* (1995)**, leva em consideração que a própria urbanização também acaba por contribuir na modificação do balanço hídrico da bacia urbana. Segundo o próprio autor, tais mudanças ocorrem pelo aumento do volume do escoamento superficial e a redução da recarga natural dos aquíferos e da evapotranspiração. Faz-se ainda uma ressalva para o fato de que a não existência de rede cloacal implica numa descarga dos efluentes, através de processo de infiltração, no aquífero pelo emprego de fossas sépticas.

Com o crescente e acelerado processo de urbanização a necessidade de planejamento torna-se uma obrigação básica dentro do ponto de vista de uso e ocupação do solo. **MARIN *et al.* (1999)** cita que o planejamento de um sistema de drenagem urbana deve ser concebido e executado dentro de um contexto mais abrangente do planejamento de todo o ambiente urbano em uma bacia hidrográfica, devendo estar de acordo com o Plano Diretor de Drenagem Urbana, o qual indica as principais linhas de ação para a área. Planejar de maneira integrada significa prever o funcionamento simultâneo do sistema de drenagem, com todas as outras partes do sistema de saneamento e desse com outros sistemas do ambiente urbano. As bacias são usadas como unidade de planejamento e gerenciamento não só da água, mas também de outros recursos e atividades econômicas e humanas (**MAKSIMOVIC, 2001**).

2.1.2. POLUIÇÃO DIFUSA

Os recursos hídricos superficiais gerados no Brasil representam 50% do total dos recursos da América do Sul e 11% dos recursos mundiais, totalizando 168.870 m³/s. A distribuição desses recursos no País e durante o ano não é uniforme, destacando-se os extremos do excesso de água na Amazônia e as limitações de disponibilidade no Nordeste (**TUCCI, 2001**).

As preocupações com as disponibilidades dos recursos hídricos superficiais ou mesmo os subterrâneos já são práticas correntes a um certo tempo. Hoje já é possível associar, claramente, urbanização à poluição dos corpos d'água, devido ao esgoto doméstico não tratado e despejos industriais. Voltando os olhares mais atentamente para os centros urbanos desenvolvidos ou em desenvolvimento, é possível compreender que parte dessa poluição apresenta relação com o processo de escoamento superficial, levando-se em conta que a passagem desse escoamento pode tranquilamente entrar contato direto com diversos tipos de camadas superficiais como é o caso das áreas que estejam em fase de construção, depósitos de lixo ou até mesmo de resíduos industriais. Segundo **TUCCI (1995)** o escoamento superficial da água nesses locais acaba por carrear material solto ou solúvel até os corpos d'água. De acordo com o mesmo autor, o material carreado pode apresentar cargas poluidoras bastante significativas.

Os aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas são tratados por **TUCCI (1995)** como uma poluição de origem difusa, onde a contribuição para tal poluição é proveniente do desgaste das ruas pelos veículos, lixo acumulado nas ruas e calçadas, os resíduos orgânicos de pássaros e animais domésticos, as atividades de construção, os resíduos de combustível, óleos e graxas deixados por veículos, poluentes do ar entre outros. **ELLIS (1986)** descreve que os principais poluentes carreados são: sedimentos, matéria orgânica, bactérias, metais como cobre, zinco, manganês, ferro e chumbo, hidrocarbonetos provenientes do petróleo, tóxicos, como os pesticidas e os poluentes do ar que se depositam sobre as superfícies.

É importante salientar que a contaminação pela poluição dita de origem difusa é caracterizada, de acordo com diversos autores, segundo duas situações bem distintas. A primeira delas compreende os períodos em que não ocorrem eventos de precipitação. Para essa fase, os poluentes existentes na atmosfera sofrem um processo contínuo de deposição sobre as superfícies de telhados, ruas e demais áreas do espaço urbano, compreendendo o que se denomina por “deposição seca”. A segunda fase agrega exatamente a ocorrência dos eventos chuvosos. Durante essas ocasiões, os poluentes

acumulados nas superfícies, durante a “deposição seca”, sofrem o efeito de lavagem pelo surgimento dos escoamentos superficiais. Tais poluentes passam a ser carregados pelos escoamentos para pontos mais a jusante da bacia, fato esse que leva a considerar que a descarga dos referidos poluentes são acrescidas por um efeito conjunto no ato de encontro com outros escoamentos na bacia. Evidentemente, é de se esperar que os padrões de contaminação atmosférica na bacia bem como a intensidade e duração das precipitações influam nas características de qualidade do escoamento superficial, levando-se em consideração para isso, por exemplo, o efeito da diluição dos poluentes em função da quantidade precipitada.

Normalmente a contaminação da atmosfera não atinge concentrações capazes de comprometer significativamente a qualidade da água das chuvas e, mesmo em locais fortemente poluídos, a água de chuva quase sempre tem uma boa qualidade química (dureza, salinidade, alcalinidade, etc) para vários usos: irrigação, refrigeração, caldeiras, diluição, lavagens. A contaminação microbiológica na atmosfera é ainda mais rara que a contaminação química. Além disso, após os primeiros minutos de precipitação geralmente a qualidade melhora muito (**ANDRADE NETO, 2003**).

Para **POMPÊO (2000)**, a água exerce um papel fundamental no meio urbano, havendo necessidades de atendimento a demandas diferenciadas, questões relativas à sua qualidade, disponibilidade e escoamento. Segundo **BASTOS (2007)**, a gestão da água no meio urbano constitui grande parte do saneamento urbano, e é um caso particular da gestão dos recursos hídricos, onde, em consequência, a ação institucional deve integrar, por um lado, a gestão dos recursos hídricos e, por outro, o saneamento ambiental.

Todas as conceituações desenvolvidas anteriormente induzem a lembrar e a concordar que determinadas regiões apresentam um enorme potencial com relação ao aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis. Uma constatação simples para o caso está no aproveitamento da água de chuva. De acordo com **MELO (2007)**, a água de chuva já é utilizada há muito tempo como fonte de abastecimento, porém, devido ao pouco conhecimento de suas características e ao preconceito e discriminação gerados em torno do seu consumo, devido ao mau uso da técnica de coleta e armazenamento, ela vem sendo pouco utilizada, desperdiçando-se assim o seu grande potencial.

No nordeste do Brasil a utilização de cisternas para captação de água de chuva no meio rural já é uma prática bastante difundida. Entretanto, no meio urbano, a utilização desse recurso deixa a desejar. Para tentar modificar esse quadro alguns projetos de lei,

ainda em processo de aprovação, prevêem obrigar imóveis novos, residenciais e comerciais, em construção, a possuir dispositivo próprio para captação de águas das chuvas. A proposta é obrigar também a adequação dos imóveis já existentes. A justificativa para a elaboração do projeto de lei está consolidada, conforme já comentado anteriormente, no fato de que a água de chuva no meio urbano pode ser utilizada, por exemplo, para fins secundários, como lavagem de prédios, lavagem de autos, regar jardins, limpeza e descargas de banheiros coletivos atendidos por sistemas isolados. As empresas projetistas e de construção civil podem ser obrigadas a prover coletores, caixa de armazenamento e sistemas de distribuição para água da chuva nos empreendimentos residenciais, voltados para mais de 50 famílias ou nos empreendimentos comerciais com mais de 500 m² de área construída. Por sua vez, os empreendimentos comerciais já existentes, com mais de 500 m², devem passar por uma adequação no caso da aprovação do referido projeto de lei.

Retomando os questionamentos sobre a caracterização da poluição difusa, é necessário concordar que esse tipo de poluição, devido os fatores que influenciam suas ocorrências e propagações, apresenta um grande complexidade no que confere o cálculo de suas magnitudes e previsões da distribuição temporal das concentrações dos poluentes. O esperado para tal distribuição, segundo **TUCCI (1995)**, é que ela acompanhe o comportamento genérico observado no hidrograma, ou seja, credita-se que a distribuição dos poluentes ao longo do evento hidrológico varie conforme se constatarem as vazões em um hidrograma. A esse comportamento dar-se o nome de polutograma.

Na tentativa de encontrar melhores correlações entre as concentrações dos poluentes e os eventos hidrológicos bem como as localidades de suas ocorrências, a NURP (National Urban Runoff Program) realizou uma extensa coleta de dados contemplando 22 cidades americanas durante mais de 2300 eventos de precipitação. O resultado dessa pesquisa demonstrou que tais correspondências não podem ser facilmente obtidas, tendo-se em vista que, para as cidades estudadas, os valores de CME (concentração média no evento) dos poluentes não apresentaram boas correlações com as regiões demográficas avaliadas e com os volumes de escoamento superficial. Outro importante resultado desse estudo foi a constatação de que não se detectou diferenças estatísticas significativas dos valores de CME quando comparadas áreas residenciais e comerciais. A Tabela 3 e Tabela 4 apresentam, respectivamente, os resultados da CME mediana com o correspondente CV (coeficiente de variação) para 10 poluentes e os valores de CME em função do uso do solo.

Tabela 3 - Valores característicos da concentração média do evento

Poluente	Coeficiente de Variação	CME Mediana
Sólidos Totais, mg/L	1 a 2	100
DBO _{5,20} mg/L	0,5 a 1	9
DQO, mg/L	0,5 a 1	65
Fósforo total, mg/L	0,5 a 1	0,33
Fósforo solúvel, mg/L	0,5 a 1	0,12
Nitrogênio Kjeldahl, mg/L	0,5 a 1	1,50
NO ₂₊₃ – N, mg/L	0,5 a 1	0,68
Cobre, µg/L	0,5 a 1	34
Chumbo, µg/L	0,5 a 1	144
Zinco, µg/L	0,5 a 1	160

FONTE: URBONAS E STAHR, 1993

Tabela 4 - Valores de CME de acordo com o uso do solo

Poluente	Residencial		Misto			
	Mediana	CV	Mediana	CV	Mediana	CV
Sólidos Totais, mg/L	101	0,96	67	1,1	69	0,85
DBO _{5,20} mg/L	10	0,41	7,8	0,52	9,3	0,31
DQO, mg/L	73	0,55	65	0,58	57	0,39
Fósforo total, mg/L	0,383	0,69	0,263	0,75	0,201	0,67
Fósforo solúvel, mg/L	0,143	0,46	0,056	0,75	0,080	0,71
Nitrogênio Kjeldahl, mg/L	1,9	0,73	1,29	0,5	1,18	0,43
NO ₂₊₃ – N, mg/L	0,736	0,83	0,558	0,67	0,572	0,48
Cobre, µg/L	0,033	0,99	0,027	1,3	0,029	0,81
Chumbo, µg/L	0,144	0,75	0,114	1,4	0,104	0,68
Zinco, µg/L	0,135	0,84	0,154	0,78	0,226	1,1

FONTE: URBONAS E STAHR, 1993

Segundo **TUCCI (1995)**, o valor da concentração média no evento (CME) tem sido utilizado para indicar a carga poluidora total, tendo-se em mente que o polutograma apresenta diferenças bastante significativas quando comparado entre eventos de precipitação. A formulação para trabalhar com a concentração média no evento é designada por:

$$CME = \frac{L}{R} \quad (1)$$

$$L = \sum_{i=1}^n Q_i C_i \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

Onde:

- CME: representa a concentração média no evento de um dado poluente, expresso em mg/L;
- L: representa a carga (massa total) do poluente no evento, expresso em mg;
- R: representa o volume total escoado no evento, expresso em litros;
- Qi: representa as ordenadas do hidrograma, expresso em litros por segundo;
- Ci: corresponde as concentrações do poluente, expresso em mg/L;

Pode-se observar que a avaliação da poluição difusa através dos valores de CME representa uma tentativa de englobar a variabilidade dos eventos em uma bacia. É importante ressaltar também que as formulações apresentadas anteriormente são designadas apenas para fornecer os valores das cargas totais produzidas nas distintas áreas do local estudo, em outras palavras, não se pode, pela utilização dos equacionamentos propostos até o presente momento, verificar, no caso de substâncias não conservativas, o processo de degradação dos poluentes. Esse é um fenômeno que deve ser considerado levando-se em conta a justificativa de que os poluentes influem na qualidade da água dos corpos receptores como é o caso, por exemplo, dos recursos hídricos existentes em rios e canais nos meios urbanos ou rurais, e que é possível avaliar a degradação natural desses poluentes observando os impactos sobre os recursos presentes nesses meios. Em linhas gerais, o processo de avaliação das sucessivas interações entre os poluentes e os corpos receptores é algo que pode ser necessário ou até mesmo indispensável, tendo-se em mente que as ocorrências dessas interações podem ser observadas facilmente em diversos locais.

A literatura exhibe uma série de modelos capazes de gerar informações sobre o comportamento das condições de poluição e autodepuração de rios. O que se faz comumente, segundo os autores, é elaborar modelos matemáticos que representam a hidráulica de rios como reatores biológicos. Conforme apresentado em **von SPERLING (2007)**, os rios podem ser tratados como reatores biológicos utilizados para o tratamento de esgotos. Os reatores são caracterizados pelo tipo de fluxo e padrão da mistura, sendo essa última dependente da forma geométrica do reator.

Em sequência estão apresentados os principais modelos utilizados para a representação de rios como reatores.

REATOR DE FLUXO EM PISTÃO

A conceituação de rios como reatores de fluxo em pistão parte da condição de predominância linear de um corpo d'água como, por exemplo, um rio. A nomenclatura empregada para caracterizar o fluxo, diante de condições ideais, indica que ao longo do curso do corpo receptor não há dispersão longitudinal. Nesse caso, o transporte das substâncias é explicado pelo fenômeno da advecção.

Cada seção transversal funciona como um êmbolo (ou um pistão), no qual a qualidade da água é a mesma em todos os pontos. À medida que o êmbolo flui para jusante, nele vão se processando as diversas reações de transformação dos constituintes **(von SPERLING, 2007)**.

As reações de transformação dos constituintes são governadas pelas propriedades envolvidas na cinética de reações, onde a variação da concentração de um composto em determinado meio depende da taxa de reação do composto. De maneira concisa, quanto maior for a taxa de reação de um composto maior será a variação de sua concentração em um meio. A Tabela 5 apresenta as equações utilizadas para expressar a concentração ao longo do reator em questionamento demonstrando também as devidas taxas de reação.

Tabela 5 - Equações para cálculo da concentração ao longo do reator de fluxo pistão ideal (condições estacionárias)

Reação	Concentração ao longo do reator (em um dado tempo)
Substância conservativa ($r^*=0$)	$C_{REAGENTE} = C_0$
Substância biodegradável (reação de ordem 0 (zero); $r^* = -K_R$)	$C_{REAGENTE} = C_0 - \frac{K_R d}{v}$
Substância biodegradável (reação de ordem 1 (um); $r^* = -K_R \cdot C$)	$C_{REAGENTE} = C_0 \cdot e^{-K_R d/v}$

FONTE: Adaptado de von SPERLING, 2007

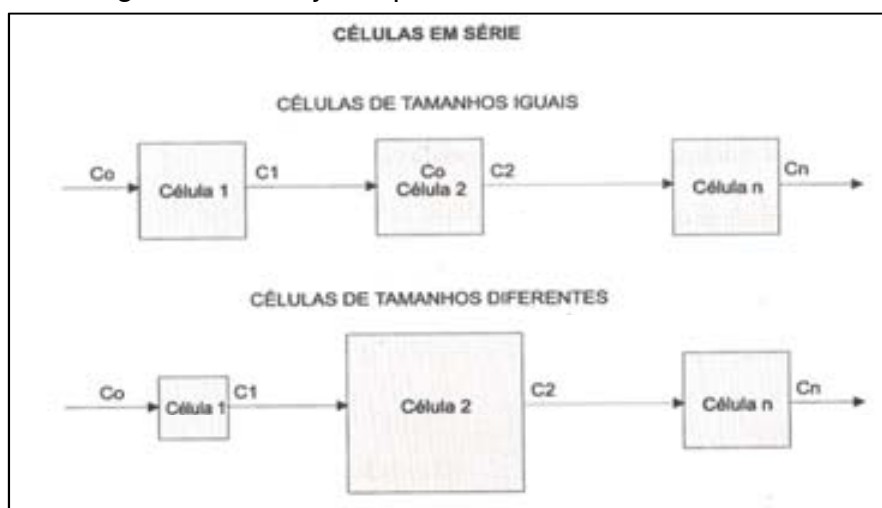
* $r = -K_R \cdot C^{n_R}$; r = taxa de reação ($ML^{-3} \cdot T^{-1}$); K_R = constante de reação (T^{-1}); $C_{REAGENTE}$ = concentração do reagente (ML^{-3}); n_R = ordem da reação;

REATOR DE MISTURA COMPLETA EM SÉRIE

O modelo de reator de mistura completa em série é amplamente utilizado quando se deseja representar condições hidráulicas estabelecidas entre o modelo de mistura completa e o de fluxo pistão. Vale salientar que o comportamento hidráulico do sistema de mistura completa não é ideal para representar rios, tendo-se em vista que o mesmo considera a total dispersão dos poluentes de forma instantânea em qualquer ponto, fato que obriga com que a mistura água e poluentes apresentem a mesma concentração em todo o trecho do rio.

Segundo **DEKSISSA *et al.* (2004)**, fazendo-se uma analogia ao sistema de mistura completa e de fluxo pistão, os reatores de mistura completa em série tendem a esse último sistema se for considerado um número infinito de células, no caso contrário, apenas uma célula, representa um reator de mistura completa.

Figura 1 - Arranjo esquemático de células em série



FONTE: von SPERLING, 2007

Evidentemente, o arranjo para o número de células envolvidas nesse sistema pode variar tanto em condições de número quanto com relação ao volume. A Figura 1, apresentada abaixo, demonstra possíveis configurações para a consideração de células em série.

Conforme o comentário realizado anteriormente sobre a cinética de reações, sabe-se que a variação da concentração de um composto em determinado meio depende da taxa de reação desse composto. Essa consideração também é importante quando se estuda a variação da concentração de um composto em reatores de mistura completa em série. A

Tabela 6 apresenta as equações utilizadas para expressar a concentração ao longo do reator em questionamento demonstrando também as devidas taxas de reação.

Tabela 6: Equações para cálculo da concentração ao longo do reator e do efluente final no caso de reatores de mistura completa em série (condições estacionárias)

Reação	Concentração ao longo do reator (em um dado tempo)	Concentração do efluente
Substância conservativa ($r^*=0$)	$C_{re} = C_0$	$C_{re} = C_0$
Substância biodegradável (reação de ordem 0 (zero); $r^* = -K$)	$C_{re} = C_0 - K_R \cdot t_h$	$C_{re} = C_0 - K_R \cdot t_h$
Substância biodegradável (reação de ordem 1 (um); $r^* = -K \cdot C$)	$C_{re} = \frac{C_0}{[(1 + K_R \cdot t_1) + (1 + K_R \cdot t_2) + \dots (1 + K_R \cdot t_n)]}$	$C_{re} = \frac{C_0}{(1 + K_R \cdot t_1)^n}$ $= \frac{1}{(1 + K_R \cdot t_n/n)^n}$

FONTE: Adaptado de von SPERLING, 2007

* $r = -K_R \cdot C^{n_R}$; r = taxa de reação ($ML^{-3} \cdot T^{-1}$); K_R = constante de reação (T^{-1}); $C_{REAGENTE}$ = concentração do reagente (ML^{-3}); C_{re} = concentração final do reagente (ML^{-3}); C_0 = concentração inicial do reagente (ML^{-3}); n_R = ordem da reação;

FLUXO DISPERSO

Quando se trabalha com modelos como o de fluxo em pistão e o de mistura completa se está considerando que o comportamento do fluxo dentro do meio ocorre de forma ideal. Na realidade essa ocorrência não é verificada, sendo o fluxo mais próximo nas condições naturais representado pela dispersão, onde determinadas partes movimentam-se com velocidades diferentes da média do fluxo.

A mistura resultante das variações de velocidade e concentração a partir da média na direção longitudinal é o principal mecanismo de dispersão. Assim, para cursos d'água, "D" é também referido como coeficiente de dispersão longitudinal ou axial (**ARCEIVALA, 1981**). Em algumas bibliografias o coeficiente de dispersão longitudinal pode apresentar a notação " D_L ".

Segundo **CHAPRA (1997)**, a difusão é devida ao movimento aleatório da água no tempo, ao passo que a dispersão é devida ao movimento diferencial da água no espaço.

É importante concordar que para modelos ideais como o de fluxo em pistão a dispersão é nula enquanto que no de mistura completa esse parâmetro tende a infinito.

A Agência de Proteção Ambiental americana (EPA) estabelece uma relação que permite avaliar a desconsideração ou não do efeito da dispersão. Tal equação pode ser apresentada conforme segue adiante:

$$\frac{K \cdot D_L}{U^2} < 0,04 \text{ (reação adimensional)} \quad (4)$$

Onde:

- D_L = coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/dia);
- U = velocidade (m/dia);
- K = coeficiente de decaimento da substância (dia^{-1});

O coeficiente de dispersão em recursos hídricos pode ser determinado a partir de experimentos com traçadores. Apesar da determinação a partir de medições em campo gerar valores mais precisos, a sua execução pode se tornar operacionalmente proibitiva. Isso porque, além de demandar bastante tempo e maior recurso financeiro, o método de campo gerará valores que representarão a dispersão nas condições do ponto de medição e no momento da medição, de forma que em se alterando as medidas de campo espacialmente e temporalmente, o coeficiente de dispersão gerado pode ser bem distinto do anterior.

Por outro lado, o coeficiente de dispersão também pode ser determinado por métodos analíticos que relacionam o coeficiente “ D_L ” com certas variáveis que caracterizam o corpo hídrico, como vazão, profundidade, largura etc.

Segundo **von SPERLING (2007)**, a fim de estimar um valor de “ D_L ” representativo da realidade, é interessante que se executem algumas medições de campo cujos resultados possam ser usados para validar, após confrontamento, o melhor método analítico para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal a ser usado no modelo global de autodepuração.

Abaixo estão representadas metodologias utilizadas para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal:

Método de Fischer

$$D_L = 0,011 \cdot \frac{v^2 \cdot B^2}{h \cdot v^*} \quad (5)$$

$$v^* = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \quad (6)$$

Método de Mc Quivey e Keefer

$$D_L = 0,059 \cdot \frac{Q}{I \cdot B} \quad (7)$$

Método de Liu

$$D_L = \beta \cdot \frac{Q^2}{v^* \cdot R_H} \quad (8)$$

$$L_R = 0,18 \cdot \left(\frac{v^*}{v} \right)^{1,5} \quad (9)$$

Onde:

- D_L = coeficiente de dispersão longitudinal (m²/s);
- Q = vazão do rio (m³/s);
- L_R = largura do rio (m);
- h = profundidade do rio (m);
- v = velocidade de percurso (m/s);
- v^* = velocidade de cisalhamento (m/s);
- I = declividade do rio (m/m);
- R_H = raio hidráulico da calha do rio (m);

2.2. MODELAGEM HIDRÁULICA-HIDROLÓGICA

Na literatura existem várias definições para o que entende por “modelos” ou “modelos numéricos/matemáticos”. **von SPERLING (2007)** apud **LEE (1973)** define modelo da seguinte forma: os modelos podem ser entendidos como uma representação da realidade; uma tradução simplificada e generalizada do que se afigura como sendo as características mais importantes de uma situação do mundo real; uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual – a variedade e complexidade do mundo real a um nível que se pode entender e representar.

Os significados dados por **LEE (1973)** expõem, em linhas gerais, as possíveis traduções para o que seria um modelo matemático, ressaltando que a modelagem, como área de estudo do conhecimento técnico e científico, apresenta aplicação nas mais diversas áreas da ciência, e que por esse fato, pode agregar distintas definições diante de sua aplicação em outras áreas afins.

Nos estudos da hidrologia urbana, conforme relatado por **TUCCI (1995)**, um modelo de escoamento superficial urbano simula a resposta da bacia hidrográfica para um evento de precipitação, representando o movimento da água e os processos de transporte dos poluentes. Além de atenderem ao detalhamento requerido na avaliação de

cada caso, modelos permitem a repetição da simulação para que se avaliem diversas alternativas para a solução e o gerenciamento do problema. Pode ser analisado o comportamento da bacia hidrográfica sob condições variáveis, como alterações no uso do solo, diferentes períodos sem chuva entre eventos de precipitação, eventos chuvosos de diferentes durações e intensidades.

BASTOS (2007) apud MELLER (2004) afirma que os modelos de drenagem urbana são compostos basicamente por duas partes sequenciais conectadas: um modelo hidrológico onde é feita a transformação da precipitação em escoamento superficial e um modelo hidráulico de propagação do escoamento em redes de condutos e canais.

Para **RIGHETTO (1998)**, a elaboração de modelos hidráulico-hidrológicos é baseada na compreensão física da hidrologia, onde as equações que regem a conservação de massa e o movimento são utilizadas em sua plenitude ou simplificadas de alguma forma. Ainda segundo **RIGHETTO (1998)**, a abordagem física da hidrologia, através da modelagem, aliada ao crescimento das facilidades na aquisição dos dados de uma bacia hidrográfica implica na formação de uma tendência em se utilizar modelos de alta resolução, onde a discretização dos domínios são cada vez mais detalhadas.

CIRILO (2003) classifica os modelos de propagação do escoamento em modelos de armazenamento e hidrodinâmicos. Os modelos de armazenamento, como o próprio nome indica, consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação da quantidade do movimento. Os modelos que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos, e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com a consideração ou não dos termos da equação da quantidade do movimento.

Existem diversos modelos de simulação computacional para eventos hidrológicos em bacias urbanas. A seleção de um modelo a ser utilizado em um determinado estudo deve ter, por objetivo, buscar aquele que mais se adapte aos objetivos do estudo e também às condições locais, principalmente no que se refere a disponibilidade de dados.

HAN (1982) apud DAW e LICHTY (1968) já citavam que a escolha de um modelo hidrológico poderia ser feita pela observação de quatro critérios:

- Precisão das previsões;
- Simplicidade do Modelo;
- Consistência dos parâmetros estimados;

- Sensibilidade dos resultados diante das escolhas dos valores dos parâmetros;

Além dos critérios a serem observados na escolha de um modelo é imprescindível lembrar que os resultados apresentados pela modelagem são passivos da ocorrência de diversos tipos de erros, valendo-se da condição de que podem existir simplificações e estimativas, respectivamente, dos equacionamentos e parâmetros utilizados para obtenção desses resultados. Esse aspecto é tratado por **LENER (1990)**, onde a precisão, por exemplo, das estimativas de recarga em um aquífero, são norteadas por fatores como:

- Modelo conceitual incorreto: para esse caso o erro na escolha do modelo ocorre quando o fenômeno a ser modelado não é perfeitamente compreendido ou englobado, fazendo com que seja o modelo erroneamente designado ou construído para o evento;
- Negligência na variabilidade espacial e temporal: desconsiderar a variabilidade temporal e espacial dos parâmetros de um modelo é concordar que os fenômenos existentes na natureza seguem comportamentos homogêneos e lineares, fato esse que não necessariamente ocorre no meio ambiente;
- Erros de medição: esse é um tipo de erro governado pelas propriedades/característica do equipamento ou metodologia utilizada para obter o resultado do parâmetro analisado. Os erros de medição também podem ser associados a falhas humanas pela falta de habilidade ou conhecimento técnico de um operador;
- Erros de cálculo: essa é uma condição atribuída a possibilidade do surgimento de erros de cálculo diante da utilização dos equacionamentos de um modelo;

É necessário compreender que todo o questionamento referente ao processo de reconhecimento e escolha de modelos deve estar bem norteado pela importância em utilizá-los. Esse é um princípio que dará ao usuário a capacidade de observar a relevância e a potencialidade da ferramenta como uma forma de aprimorar o seu campo de visão, e, conseqüentemente, o tipo e número de decisões para análise dos sistemas e a resolução dos problemas.

Dentro desse contexto, segundo **MACHADO (2002)**, os modelos matemáticos são capazes de integrar o conhecimento existente dentro de princípios lógicos de

procedimentos e relações, permitindo sua utilização tanto para estabelecer conhecimentos sobre os sistemas ambientais quanto como um meio de testar hipóteses, auxiliando, dessa forma, na escolha de um método para predizer o manejo desses ecossistemas.

TUCCI (1998) e OHNUMA JR. (2005) citam que os modelos hidrológicos são ferramentas indispensáveis para o gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente quando o planejador necessita de informações que diagnosticam processos quantitativos em distintos momentos, onde tais informações são imprescindíveis para que se possa antecipar a ocorrência de eventos e, conseqüentemente, permitir tomar a escolha da(s) melhor(es) medidas preventivas em função, por exemplo, dos impactos provenientes da urbanização em uma bacia.

BENINI (2005) apresenta a idéia de que os modelos não devem ser utilizados apenas para a formulação de cenários diante da imposição de eventos com distintas magnitudes. Segundo esse autor, o emprego do modelo deve ser compreendido como uma parcela do aprendizado na compreensão do sistema e, em função disso, um mecanismo para propor soluções de maneira sustentável.

MACHADO (2002) relata que a vantagem em se utilizar modelos matemáticos está na justificativa, geralmente, de seu baixo custo. Basta idealizar que o custo referente ao processo de investigação experimental é, na maioria das vezes, superior ao de se executar um software.

2.2.1. ANÁLISE PRELIMINAR DE MODELOS EXISTENTES

A importância em se avaliar modelos existentes, sejam eles designados para simular fenômenos em áreas urbanas ou rurais, está na possibilidade de se observar e extrair o grau de maturação com que tais fenômenos estão sendo considerados. Durante a atividade de observação é plausível constatar, em alguns casos, os equacionamentos empregados, as novas ferramentas implementadas e como a evolução tecnológica influencia fortemente na capacidade desses modelos. Partindo-se do princípio que a elaboração de novos softwares é uma tendência inevitável; poder observar o progresso dessa ciência e a maneira com que essa avalia o meio ambiente deve ser traduzido como uma garantia na continuidade do desenvolvimento.

2.2.1.1. MODELO SWAT (SOIL WATER AND ANALYSIS TOOLS)

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold e sua equipe do Agricultural Research Service (Serviço de Pesquisa na Agricultura – ARS, ligado ao USDA). Esse modelo, de acordo com **NEITSCH *et al.* (2006)** foi concebido para ser utilizado como uma ferramenta na previsão de impactos provenientes de atividades do uso do solo, água, sedimentos e compostos químicos da agricultura, onde um conjunto de bacias com diferentes características e condições de utilização podem ser analisadas por longos períodos de tempo.

Em linhas gerais, a subdivisão das bacias pelo modelo é considerada tomando-se como referência as questões topográficas conjuntamente aos aspectos de tipo e uso do solo. Essa é uma forma de considerar a variabilidade espacial dos parâmetros, para o caso da macrobacia, e a homogeneidade dos mesmos quando observadas cada uma das subbacias.

Ao invés de trabalhar com equações de regressão, para descrever o relacionamento entre variáveis, o SWAT requer informações específicas sobre água, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gerenciamento da terra que ocorrem na bacia. Fisicamente o processo é associado ao movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento das plantas, ciclagem de nutrientes, os quais são diretamente modelados pelo SWAT, usando estes dados de entrada (**NEITSCH *et al.*, 2006**).

Em função dos esclarecimentos feitos até o presente momento, percebe-se, tendenciosamente, que o modelo em questionamento é empregado para simular eventos de longo prazo, tendo-se em vista que o período para análise e desenvolvimento de tais fenômenos ocorrem, geralmente, em maiores escalas de tempo. Essa é uma condição, segundo **NEITSCH *et al.* (2006)**, que inviabiliza o uso do SWAT para simular simples eventos de cheia.

Conforme descrito por **MACHADO & VETTORAZZI (2003)** e **NEITSCH, ARNOLD & WILLIAMS (2005)**, o SWAT apresenta sua estrutura como modelo hidrológico dividida da seguinte forma: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas.

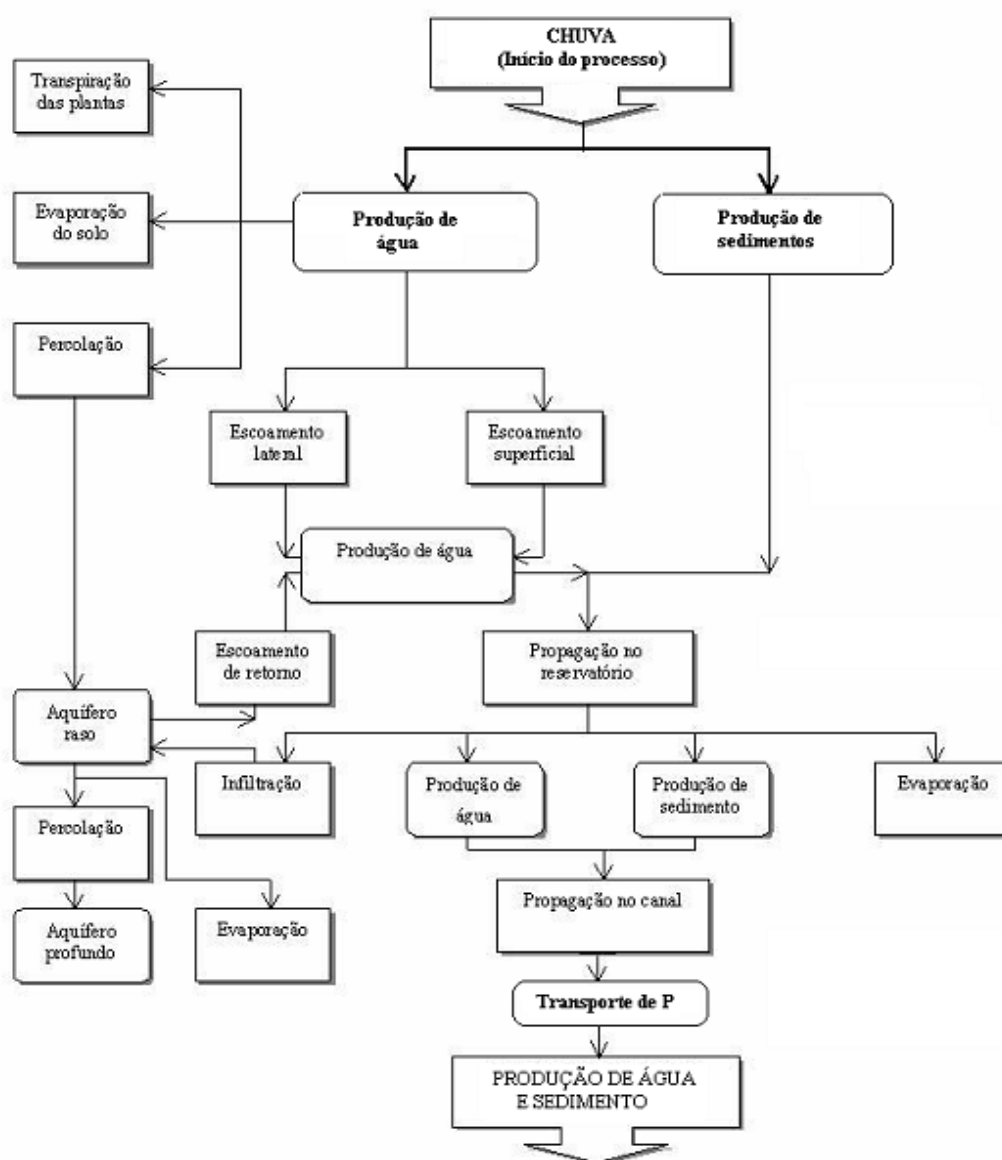
De maneira concisa, a simulação hidrológica pelo SWAT é considerada através de duas fases, onde na primeira delas acontecem os fenômenos de formação dos deflúvios, carreamento de nutrientes e pesticidas todos direcionados para o canal principal de cada sub-bacia. Na segunda fase, ocorrem os processos de propagação dos materiais de primeira fase ao longo dos canais das sub-bacias, sendo os mesmo direcionados para os

respectivos exutórios. Na Figura 2 são apresentados, de forma resumida, alguns dos processos modelados pelo SWAT.

O SWAT é um dos modelos de simulação disponíveis, sendo considerado o mais indicado para prever os efeitos do uso e manejo do solo, na produção de sedimentos, água e compostos químicos em bacias hidrográficas, especialmente aquelas sem histórico de monitoramento (USEPA, 1997).

GRIENSVEN (2007) comenta que desde a versão 2005 do SWAT existe uma rotina interna para executar a autocalibração. Essa é uma característica extremamente importante na utilização do SWAT, tendo-se em mente que esse modelo permite considerar a variabilidade espacial de uma série de parâmetros ao longo de uma bacia.

Figura 2 – Resumo dos fenômenos simulados através do SWAT



FONTE: Adaptado de MACHADO & VETTORAZZI, 2003

2.2.1.2. MODELO HEC-HMS (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER)

Nas décadas de 1950 e 1960 foram desenvolvidos muitos modelos matemáticos em Engenharia Hidrológica. O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (US Army Corps of Engineers) contribuiu significativamente com a criação de programas, os quais foram reunidos na família HEC (Hydrologic Engineering Center). Podem ser citados: HEC-1 – Modelagem de bacias hidrográficas para eventos de chuvas com aplicações em estudos de cheias; HEC-2 – Problemas de simulação de linhas de água em rios e canais para estudo de planícies de inundação; HEC-3 – problemas de operação e dimensionamento de sistemas de reservatórios e qualidade de águas; e HEC-6 – transporte e deposição de sedimentos (**CAMPOS, 2009**). Avanços tecnológicos propiciaram transformações da família HEC, destacando-se aqui a conversão do HEC-1 para o HEC-HMS.

O HEC-HMS é projetado para simular os processos de transformação chuva-vazão em sistemas de bacias dendríticas. A concepção do modelo permite avaliações como a análises de rios para suprimento de água em uma bacia e estudos de inundações em meios urbanos ou escoamentos em bacias naturais. Destaca-se o fato de que os resultados gerados pelo software podem utilizados em outros programas, fato esse que amplia a capacidade de originar maiores avaliações.

O funcionamento do HEC-HMS é condicionado à definição de certos componentes. Dentro desse processo de definição ocorre a caracterização de um modelo de bacia, um modelo meteorológico e a especificação das condições de controle bem como dos dados de entrada. De maneira concisa, o desenvolvimento da simulação realiza a conversão chuva-vazão empregando os dados do modelo meteorológico e as condições de controle para a restrição do período de abrangência do evento modelado.

Segundo **CAMPOS (2009)**, reconhecer a estrutura do HMS significa economizar tempo na resolução de problemas futuros. De acordo com o mesmo autor, o HMS foi concebido em seis principais componentes, sendo denominados de gerenciadores conforme as descrições apresentadas em sequência:

- Gerenciador do Modelo de Bacias (Basin Model Manager): esse gerenciador foi desenvolvido para que seja possível caracterizar a bacia hidrográfica, podendo essa ter uma ou mais subbacias. É nessa mesma etapa que se faz a definição dos processos e elementos hidrológicos associados a essa da bacia;
- Gerenciador do Modelo Meteorológico (Meteorological Model Manager): nesse nível são definidos os modelos meteorológicos que representam a forma da

chuva e as estações pluviométricas utilizadas. O HEC HMS permite que mais de um modelo meteorológico seja criado para permitir que sejam verificadas as repostas da bacia diante de distintos eventos de precipitação;

- Gerenciador de Especificações de controle (Control Specification Manager): esse gerenciador é utilizado para especificar o período de abrangência do evento simulado e na definição do intervalo de cálculo a ser empregado pelo modelo na formulação dos resultados;
- Gerenciador de Dados de Séries Temporais (Time-Series Data Manager): aqui são implementados os dados das estações pluviométricas, fluviométricas, estações de níveis, evaporimétricas entre outras;
- Gerenciador de Dados em Grade (Paired Data Manager): esse gerenciador é utilizado para informar ao HMS dados como curvas cota x volume de reservatórios, curvas cota x vazão e curvas dos hidrogramas unitários;
- Gerenciador de Dados em Grade (Grid Data Manager): esse gerenciador é empregado para que seja possível informar dados em grades, ou seja, representam dados de entrada caracterizando informações de uma maneira distribuída ao longo de um espaço. Um exemplo para o caso são os dados de chuva obtidos pela utilização de radares;

Em linhas gerais, o programa apresenta uma potencial capacidade de realizar simulações hidrológicas, permitindo o emprego de uma série de metodologias já reconhecidas no âmbito da engenharia hidrológica. É preciso destacar ainda a existência de uma ferramenta para o cálculo automático de parâmetros atribuídos a esses métodos e a possibilidade de conexão com um sistema de informação geográfica (SIG), sendo esse um fato consolidado pela criação do HEC-GeoHMS.

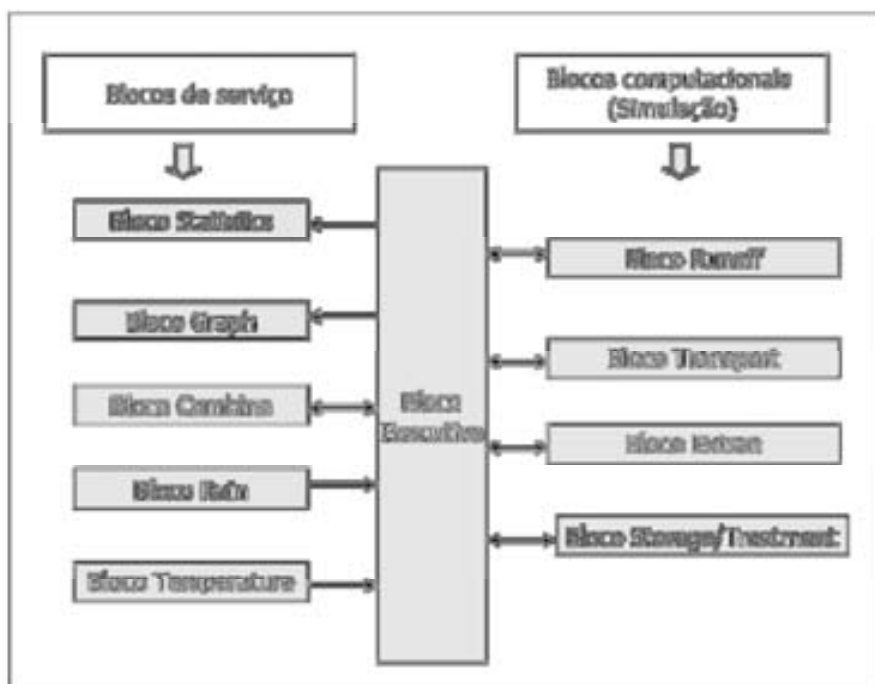
2.2.1.3. MODELO SWMM (STORM WATER MANAGEMENT MODEL)

Um forte exemplo para um modelo de armazenamento/hidrodinâmico é o SWMM (Storm Water Management Model). Esse modelo foi originalmente desenvolvido pela Metcalf & Eddy Inc., Universidade Federal da Flórida, e a Water Resource Engineers, encomendado pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) e, posteriormente, aperfeiçoado pela Universidade da Flórida. O SWMM é o mais detalhado e abrangente modelo de simulação para eventos de escoamento através de tubulações e estruturas de armazenamento/tratamento e com considerável resolução espacial e temporal, podendo ser utilizado, também, para períodos longos de simulação.

Segundo **GARCIA (2005)** foi o primeiro modelo computacional para análise quali-quantitativa associada ao escoamento gerado em áreas urbanas. O SWMM é o aplicativo mais utilizado para simulação da drenagem urbana, principalmente por ser de domínio público e ter seu código de programação aberto, permitindo modificações ao longo dos últimos 30 anos. O aplicativo permite análise quali-quantitativa dos problemas relacionados à drenagem e à investigação de alternativas de controle do escoamento, fornecendo subsídios para estimativas de custo para estruturas de armazenamento e tratamento. As soluções adotadas podem ser avaliadas através de simulações que fornecem como resultados hidrogramas, polutogramas e cargas de poluentes.

A estrutura do SWMM é composta pelo funcionamento de um conjunto de blocos, sendo eles: módulos/blocos de serviços, módulos/blocos computacionais (simulação hidrológica/hidráulica) e o módulo/bloco executivo. Os módulos de serviços são responsáveis pela entrada e tratamento dos dados (entrada de dados de precipitação, temperatura, formulação de gráficos, aplicação de estatística, etc). Os módulos computacionais são onde se encontram os próprios modelos hidrológicos para a transformação da chuva e em vazão e os modelos de propagação hidrodinâmica do escoamento na rede. Entre os módulos hidrológicos/hidráulicos se destaca o módulo Extran. O módulo EXTRAN faz a propagação do escoamento na rede de condutos. O modelo resolve as equações completas de Saint Venant para simulações de remansos, confluências, sobrecargas e fluxo sob pressão na rede. O módulo executivo permite estabelecer ligações entre os elementos do bloco de serviço e os elementos do bloco computacional. Tais ligações são estabelecidas na medida em que os blocos computacionais necessitam, por exemplo, dos dados armazenados nos blocos de serviço ou quando os blocos de serviço utilizam os resultados gerados pelos blocos computacionais para formulação de gráficos ou estatísticas. A Figura 3 apresenta as inter-relações existentes entre os módulos do SWMM.

Figura 3 – Módulos estruturais do modelo SWMM



FONTE: BASTOS, 2007

A bacia é representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados. A área de cada sub-bacia é subdividida em três subáreas: impermeável com armazenamento, permeável com armazenamento e permeável sem armazenamento. O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada subárea representado pela combinação das equações de Manning e da continuidade, resolvidas pelo processo iterativo de Newton- Raphson (**BASTOS, 2007**).

O SWMM representa uma potencial ferramenta na realização de simulações para avaliações dos fenômenos hidráulicos/hidrológicos em bacias urbanas, entretanto, a utilização desse modelo em bacias urbanas brasileiras está muito aquém da que vem sendo empregada na modelagem de sistemas urbanos, relatados na literatura internacional. Sendo um modelo livre, seu emprego seria amplamente disseminado não fosse o grau de detalhamento exigido pelo modelo e informações de parâmetros de difícil determinação quando se considera a heterogeneidade espacial da bacia. Um emprego bem sucedido do SWMM é relatado por **GARCIA e PAIVA (2005)** na bacia urbana do Arroio Cancela na cidade de Santa Maria, RS.

2.2.1.4. MODELO UFC

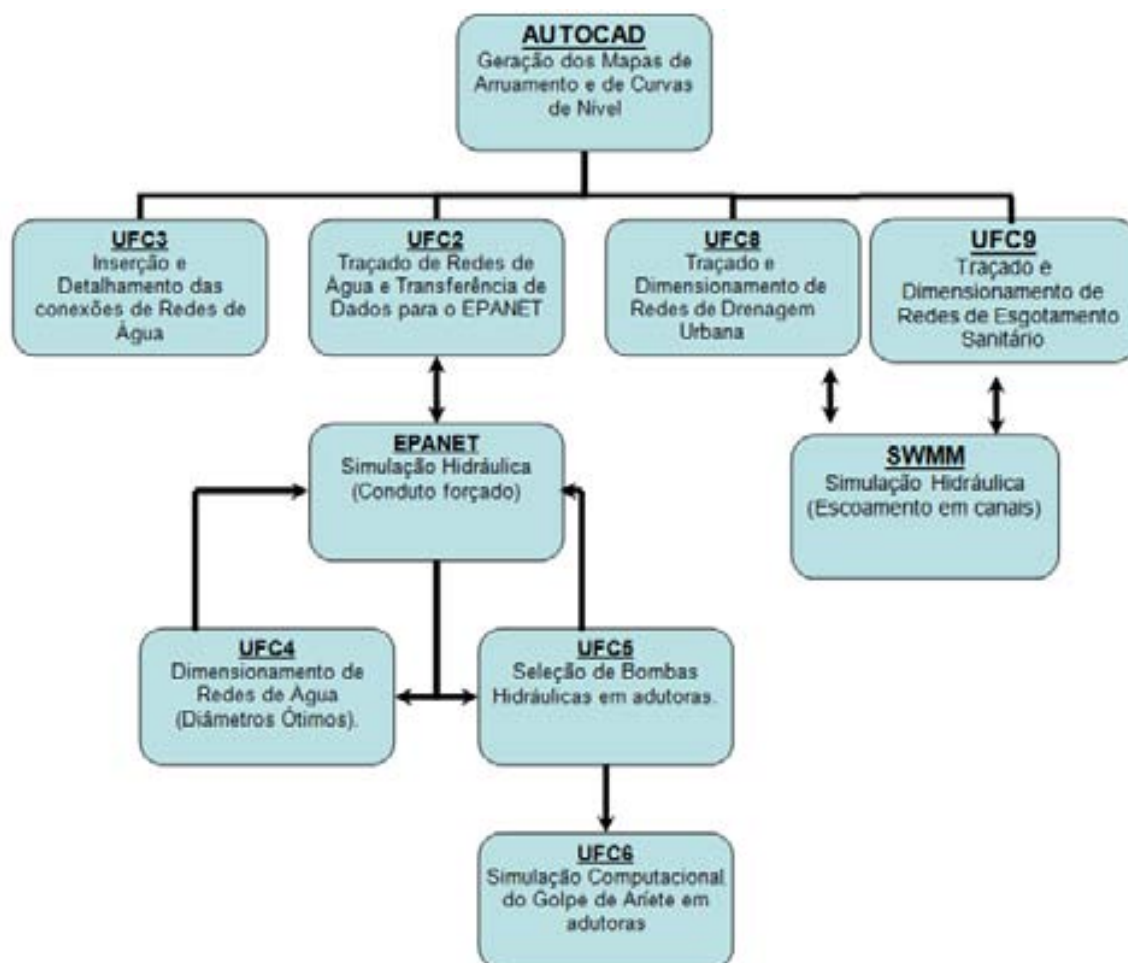
O Sistema UFC foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará através da equipe do Laboratório de Hidráulica Computacional (LAHC). Esse sistema é constituído de um conjunto de softwares elaborados em linguagens de programação como AutoLISP e VBA (Visual Basic for Applications). Os módulos desse sistema são utilizados, por exemplo, para o traçado e dimensionamento hidráulico de redes de abastecimento de água, redes de drenagem urbana, adutoras e redes de esgoto sanitário.

Em linhas gerais, o Sistema UFC é composto pelos seguintes módulos estruturais:

- UFC2: Módulo de desenho da rede e/ou Adutoras no AutoCAD® e de transferência de dados da rede/adutora para o EPANET®;
- UFC3: Módulo de traçado de ligações em redes de abastecimento de água.
- UFC4: Módulo de dimensionamento hidráulico (determinação de diâmetros ótimos) de redes de abastecimento de água;
- UFC5: Módulo de seleção de bombas hidráulicas e traçado da linha piezométrica de adutoras;
- UFC6: Módulo que simula computacionalmente o Golpe de Aríete em adutoras;
- UFC7: Módulo de desenho da rede e/ou Adutoras no ArcGIS® e de transferência de dados da rede/adutora para o EPANET®;
- UFC8: Módulo para traçado de rede de microdrenagem urbana no AutoCAD e de transferência de dados da rede para o SWMM;
- UFC9: Módulo de traçado e dimensionamento de redes de Esgotamento Sanitário dentro do ambiente AutoCAD®;

A Figura 4 apresenta um fluxograma demonstrando as funcionalidades dos módulos estruturais do Sistema UFC bem como as possibilidades de interface com outros softwares consagrados.

Figura 4 – Funcionalidades e interfaces dos módulos estruturais do Sistema UFC



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Diante dos estudos em questionamento é conveniente destacar a importância do módulo UFC8, tendo-se em vista a existência da interface entre o AutoCad® e o SWMM. Ressalta-se que importância dessa associação reside no fato de que o emprego de uma ferramenta como o AutoCad®, valendo-se de suas habilidades para o desenho e para o georreferenciamento, elimina uma série de trabalhos manuais pelo número de parâmetros necessários ao se utilizar isoladamente o SWMM.

Para mensurar melhor os benefícios do módulo UFC8, pode-se recorrer à consideração de que tal módulo foi elaborado para ser um aplicativo do AutoCAD®, ou seja, funciona internamente no ambiente desse software podendo utilizar parte de suas ferramentas. Em função dessa condição, além do AutoCad® ser um software bastante difundido, o usuário possui uma maior facilidade para fazer projetos de redes de drenagem, tendo-se em mente que o UFC8 é capaz de unificar instrumentos de desenho e de cálculo em único software. Utilizando o programa, com auxílio de ferramentas de desenho, é possível delimitar as bacias de contribuição, traçar os tubos da

rede, inserir singularidades como poços de visita, caixas de visita, bocas-de-lobo e outros. Ao realizar a inserção desses elementos o software coleta automaticamente valores de variáveis como comprimentos, declividades, posição no espaço, áreas entre outros, fato esse que acaba por economizar um tempo precioso diante do ponto de vista da modelagem. As precipitações empregadas para a geração de vazões e consequentemente no dimensionamento dos elementos responsáveis pela drenagem, podem calculadas através de métodos como o de Pfafstetter, Equações de Chuva ou Taborga Torrico. O software apresenta uma planilha de cálculos capaz de dimensionar a rede para trechos circulares ou retangulares. Após o traçado e inserção dos elementos da rede de drenagem, o módulo UFC8 permite que todas as informações pertencentes a elaboração de rede sejam exportados para o SWMM. Nesse ponto, o SWMM torna-se disponível para aplicar todas as suas ferramentas enquanto modelo de simulação.

2.2.1.5. MODELO SOBEK-URBAN

O modelo SOBEK foi desenvolvido pelo instituto holandês WL | Delft hydraulics em parceria com Instituto Holandês de Gerenciamento de Águas Interiores e Tratamento de Águas Servidas (Dutch Institute of Inland Water Management and Wastewater Treatment (RIZA)) e empresas holandesas de consultoria em recursos hídricos (**WL | DELFT Hydraulics, 2004**).

Para **MELLER (2004)** o aplicativo foi desenvolvido para o dimensionamento e verificação de rede de condutos. De acordo com o mesmo autor, a rede de condutos pode apresentar uma série de trechos conectados podendo ainda simular eventos envolvendo inversões de fluxo, fluxo sob pressão, emprego de bombas, vertedores, comportas, orifícios, deposição de sedimentos na rede entre outros. Existem ainda módulos paralelos conhecidos como SOBEK-Rural e SOBEK-River, onde é possível realizar a simulação da transformação contínua de chuva em vazão, operação de reservatórios, fenômenos de cheia, avaliação das questões de qualidade da água e transporte de sedimentos em rios.

Conforme descrito em **BASTOS (2007)**, o software em questionamento está subdividido em três módulos, sendo esses responsáveis pelas seguintes análises:

- Módulo Rainfall Runoff: empregado na transformação chuva-vazão para uma diversidade de superfícies através do método racional associado ao modelo de infiltração de Horton;

- Módulo Water Flow: designado para realizar a propagação do escoamento. Nesse módulo as equações de Satin Venant são resolvidas integralmente permitindo simular fenômenos de inundações, escoamento supercrítico, simulação de redes multiplamente conectadas e ressaltos hidráulicos;
- Módulo Time Control: mostra a que extensão a infraestrutura existente pode ser usada da melhor maneira. Permite a simulação de um complexo controle central de sistemas de esgoto em tempo real e que o sistema reaja otimizadamente aos níveis, às descargas e a altura pluvial em qualquer lugar no sistema de esgoto ou em seu ambiente, controlando as portas, as represas, a descarga da bomba, as bacias de retenção, etc.

2.2.1.6. MODELO INFOWORKS

MELLER (2004) relata que o modelo InfoWorks foi idealizado inicialmente para realizar simulações em rede de condutos denominadas de Mainframe baseado no desenvolvimento do programa WASSP concebido em 1982. A base operacional do aplicativo está fundamentada em sua quinta versão, o **HydroWorks PM (1994)**. Através desse software é possível simular questões de qualidade da água na rede de drenagem, elaboração de hidrogramas e hietogramas de projeto e a propagação do escoamento em rede de condutos e canais. Toda essa capacidade é controlada pelos 5 módulos estruturais do programa. Vale destacar que o módulo chuva-vazão está subdividido em outros dois, sendo um deles responsável pela separação do escoamento e o outro para a propagação desse nas superfícies.

BASTOS (2007) descreve que o aplicativo em questionamento pode executar a separação do escoamento através de seis metodologias, sendo elas: Horton, Green-Ampt, Soil Conservation Service (USA) e mais três modelos que utilizam coeficientes baseados nas características da superfície do solo. Para o caso da propagação do escoamento superficial, pode-se escolher modelos como: “double linear reservoir” (reservatório linear duplo), “large contributing area” (ampla área de contribuição), SPRINT (modelo de base física que simula a estrutura tridimensional da vegetação), “desbordes runoff model” (modelo de cheias no escoamento superficial) e SWMM runoff model.

2.2.1.7. MODELO MOUSE-DHI

O MOUSE (Modelling of Urban Sewers) foi elaborado durante os anos de 1984 e 1985 através de um trabalho desenvolvido entre o Departamento de Engenharia Sanitária da Universidade Técnica da Dinamarca e o DHI (Danish Hydraulic Institute). **MELLER (2004)** relata que o modelo foi idealizado inicialmente para análises de sistemas de águas servidas, onde um módulo computacional e um avançado funcionavam como sistemas de banco de dados.

Atualmente o MOUSE-DHI é compreendido como um modelo hidrodinâmico que utiliza um esquema implícito de diferenças finitas para a resolução das equações de Saint Venant. Essa condição comporta a possibilidade de simular o escoamento em redes malhadas, efeitos de jusante, inversões de fluxo e perdas de carga nos poços de visita.

BASTOS (2007) comenta que o MOUSE destaca-se por apresentar propriedades que tornam sua utilização mais operacional, sendo essas atribuídas aos processos de melhorias na interface gráfica que acabaram por facilitar atividades de entrada e modificação de séries de dados e até mesmo a identificação de erros em função da incoerência ou ausência de parâmetros.

Com relação à modelagem dos aspectos de qualidade, o acúmulo de poluentes sobre a bacia presente no meio urbano é avaliada com base em uma relação exponencial. Para o caso do arrasto desses poluentes, as cargas são associadas aos sedimentos e modeladas através de fatores de proporcionalidade.

Em linhas gerais, o modelo em questionamento apresenta módulos para a simulação da transformação chuva-vazão, propagação do escoamento, qualidade da água, transporte de sedimentos, simulação de sistemas em tempo real e análise estatística dos resultados gerados. Informações detalhadas podem ser encontradas em **DHI (2002a)** e **DHI (2002b)**.

2.2.1.8. MODELO MODCEL

Para **CABRAL et al. (2009)**, a modelagem de enchentes em bacia urbanas vem apresentando forte indicações para a implementação de modelos com características sistêmicas, onde a capacidade de representar hidráulica e hidrologicamente a superfície da bacia é considerada de uma forma distribuída. De acordo com o mesmo autor, essa tendência é amparada pela concepção de células de escoamento, em que a representação do espaço urbano através dessas células como compartimentos

homogêneos é uma maneira de avaliar a integração dos espaços urbanos da bacia em função dos escoamentos que ocorrem sobre ela.

No Brasil, trabalhos com modelação por células foram inicialmente abordados por **MIGUEZ (1994)** onde os resultados acabaram por gerar outras publicações como é o caso de **MASCARENHAS & MIGUEZ (2002)** e **MIGUEZ (2001)**, em que as considerações sobre os aprimoramentos do modelo estão devidamente retratados.

Em linhas gerais, para que se possa ter uma compreensão das características do MODCEL, apresenta-se em sequência, conforme descrito fielmente por **CABRAL et al. (2009)**, as considerações desse modelo no que confere as hipóteses de células para cheias urbanas:

- A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos e interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são divididas em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca;
- Na célula, a área da superfície livre líquida depende da elevação do nível d'água no interior da mesma, e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma: $V_i = V(Z_i)$ e $V_i = A_{si} \times (Z_i - Z_0)$ em que Z_0 é a cota do fundo da célula e A_{si} é a área superficial da célula;
- O modelo proposto articula as células em *loop* (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada;
- Cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para a transformação da chuva em vazão;
- As vazões trocadas com as células vizinhas somam-se Às vazões resultantes da transformação da chuva;
- O escoamento entre células pode ser calculado por meio de leis hidráulicas, conhecidas como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros livres ou afogados, a equação do escoamento através de orifícios e de bueiros, entre outras várias;
- O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e a outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria. Nas galerias, o escoamento é

considerado inicialmente em superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento passando a ser considerado sobre pressão;

- A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja, $Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$;
- As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalente, simples ou compostas;
- Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula;
- Cada célula se comunica hidraulicamente com células vizinhas, as quais são arranjadas em um esquema topológico e constituídas por grupos formais, em que a célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura;

2.2.1.9. MODELO ABC

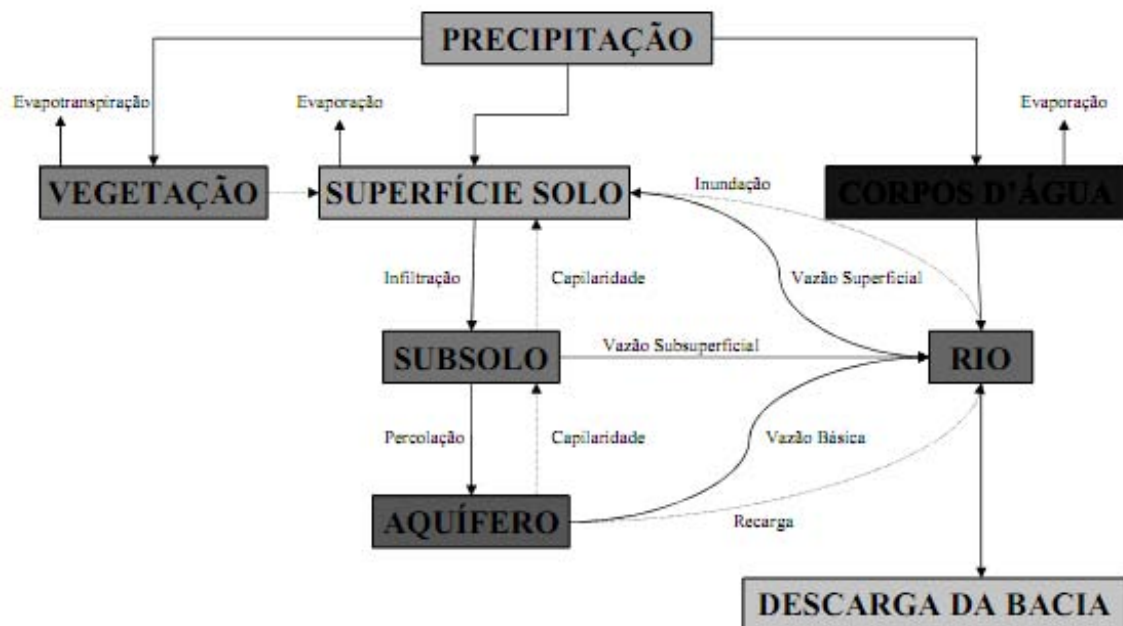
O modelo ABC (Análise de Bacias Complexas) foi desenvolvido pela Escola Politécnica da USP. A primeira versão do aplicativo data de 1985, passando para a versão ABC4 em 1990, ABC5 em 1996 e ABC6 no ano de 2000. Atualmente a finalidade do modelo ABC6 pode ser representada pelos seguintes itens:

- Agregar um conjunto de modelos de transformação chuva vazão;
- Criar um banco de dados de equações IDF (Intensidade-Duração-Frequência);
- Auxiliar na obtenção de parâmetros não conhecidos através de equações;
- Automatizar o cálculo da simulação hidrológica, uma vez que este processo se torna muito trabalhoso com o aumento do número de bacias;
- Auxiliar no ensino da hidrologia, levando a prática de projeto aos alunos;

ZAHED e MÉLLO (2011) descrevem que o modelo pode calcular o tempo de concentração empregando formulações como a de Bransby – Willians, Dooge, Kerby, Kirpich I e II, onda cinemática e o NRCS (Natural Resource Conservation Service). De acordo com os mesmos autores, a entrada dos dados de precipitação pode ser feita manualmente, caso o usuário conheça o evento de chuva ou através de equações IDF (Intensidade-Duração-Frequência). O cálculo da infiltração pode ser avaliado pelo modelo de Horton, Green – Ampt e NRCS.

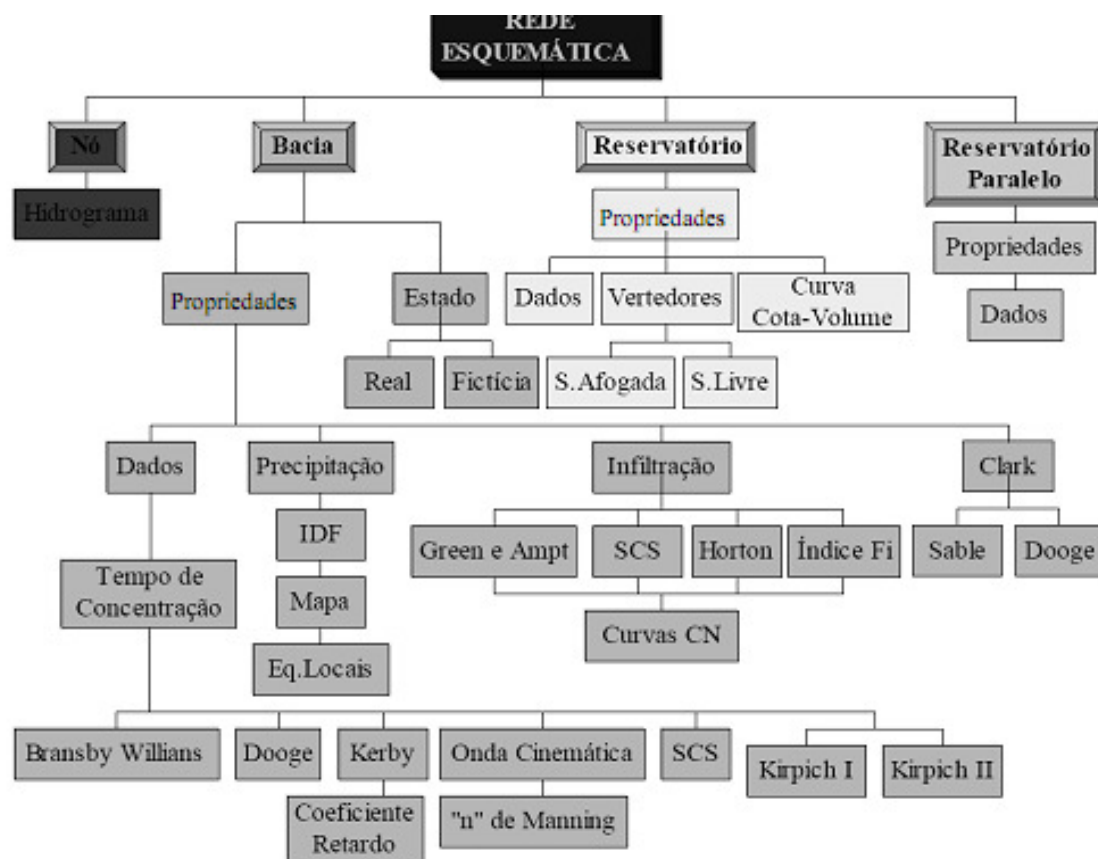
A Figura 5 mostra como o ABC compreende o ciclo hidrológico e a Figura 6 representa o esquema da entrada de dados desse mesmo modelo.

Figura 5 – Compreensão do ciclo hidrológico através do modelo ABC



FONTE: ZAHED e MÉLLO, 2011

Figura 6 – Esquema da entrada de dados do modelo ABC



FONTE: ZAHED e MÉLLO, 2011

2.2.1.10. MODELO IPH

Elaborado pelo IPH/UFRGS (Instituto de Pesquisa Hidráulica/Universidade Federal do Rio Grande do Sul) no final a década de 70, o modelo está inserido numa família de aplicativos desenvolvidos pelo IPH, representando um modelo matemático do tipo determinístico para a simulação da transformação chuva-vazão.

TUCCI *et al.* (1981) bem como **TUCCI e CAMPANA (1993)** esclarecem que o IPH foi desenvolvido com o objetivo de buscar um modelo com o máximo de parcimônia e que pudesse ser utilizado em bacias de diferentes tamanhos e características. Os algoritmos utilizados são conhecidos na literatura, da mesma forma que seus parâmetros.

De maneira concisa, o IPH II tem como uma de suas características, ser um modelo simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseado em metodologias bem difundidas, sendo, dessa forma, composto pelos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação, separação de escoamento, propagação dos escoamentos superficiais, propagação do escoamento subterrâneo e otimização dos parâmetros.

Ainda segundo **TUCCI e CAMPANA (1993)**, o algoritmo de perdas considera observações entre os valores de evaporação e precipitação para determinar a componente hidrológica que atenderá o déficit. Nesse contexto, a evaporação inicialmente é retirada da precipitação quando lhe for inferior, caso contrário, a evaporação potencial é atendida pelo reservatório de interceptação (áreas permeáveis e depressões). Na condição de esgotamento do reservatório, o déficit de evaporação potencial passa a ser atendido pela água contida no solo através de uma relação linear.

A separação do escoamento utiliza a equação da continuidade aplicada a zona superior do solo. Através dessa equação, a variação do armazenamento de água na camada superior e função da taxa de infiltração e da percolação, sendo essas representadas, respectivamente, pela equação de Horton e Berlot.

A formulação proposta para a propagação do escoamento superficial utiliza a equação da convolução associada ao hidrograma unitário instantâneo e a precipitações em intervalos discretos como entradas desse equacionamento.

Para o caso da propagação do escoamento subterrâneo, emprega-se a mesma expressão desenvolvida para o escoamento superficial trocando-se a constante de recessão do escoamento superficial pelo coeficiente de recessão do escoamento subterrâneo e a precipitação efetiva pelo volume percolado, sendo esse último o termo representativo da entrada d'água no aquífero.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme as elucidações feitas anteriormente, a proposta do presente trabalho é desenvolver um modelo voltado para a área de hidrologia de águas pluviais urbanas, onde, de maneira paralela, será utilizado um modelo consagrado, denominado SWMM, no intuito de aprimorar a capacidade de reconhecer e compreender os fenômenos existentes na área de estudo bem como dos resultados gerados pelas simulações. Para que seja possível realizar essas atividades é necessário que as características representativas da área em análise, tanto em termos das propriedades físicas como para as peculiaridades dos eventos hidrológicos, estejam bem ajustadas internamente através dos modelos.

Em linhas gerais, a metodologia para a aplicação do trabalho está baseada em duas principais frentes de trabalho, sendo elas:

- 1ª Frente de trabalho: aquisição dos parâmetros referentes à caracterização hidrológica, hidrogeológica e ocupacional da área bem como dos dados de monitoramento hidrológico com posterior execução da modelagem hidrológica;
- 2ª Frente de trabalho: estudo preliminar da qualidade das águas pluviais através da análise dos dados do monitoramento qualitativo e a aplicação da modelagem;

É importante ressaltar que as duas frentes de trabalho apresentadas anteriormente devem utilizar os dados de monitoramento quantitativo e qualitativo que foram adquiridos durante o período de vigência do projeto MAPLU (Manejo de Águas Pluviais Urbanas) da UFRN, cujas informações também podem ser encontradas em **RIGHETTO et al. (2009)**. Os demais parâmetros, mesmo que também adquiridos no período do referido projeto, foram extraídos a partir de informações em meio digital ou através de visitas *in locu*, sendo, portanto, de livre acesso.

De maneira concisa, todas as atividades que envolvem o processo final de simulação computacional foram agrupadas em procedimentos metodológicos básicos, com o intuito de otimizar racionalmente a fundamentação teórica e prática, segundo os itens apontados a seguir:

- Reconhecimento da área de estudo incluindo: levantamento dos elementos responsáveis pela drenagem da bacia, observação e obtenção das condições topográficas, determinação das características e dos padrões de ocupação da área, caracterização das vias de tráfego e de sua superfície de cobertura, avaliação das condições de impermeabilização do solo e dos aspectos de poluição;

- Aquisição dos dados do monitoramento quali-quantitativo do projeto MAPLU com o levantamento da metodologia empregada para a execução dessa atividade; Essa etapa deve ser precedida de uma análise crítica das informações adquiridas bem como das práticas adotadas, objetivando o reconhecimento de possíveis erros de medição/monitoramento sob o ponto de vista de efetuar ponderações/avaliações dos resultados gerados através das simulações;
- Modelagem hidrológica atribuindo-se a definição e ajuste dos parâmetros coletados para o desencadeamento das simulações segundo modelo a ser elaborado com posterior execução de calibração e validação. O processo de calibração deve estar apoiado numa correlação com os dados de monitoramento;
 - O já comentado modelo consagrado deve, dentro das possibilidades, ser o mais detalhado e abrangente, para que seja viável tratar, de eventos relacionados ao escoamento superficial em áreas urbanas, considerando a possibilidade de propagação dos deflúvios através de condutos e armazenamento em estrutura como lagoas de captação de águas pluviais. Segundo **TUCCI (1995) apud HUBER e DICKINSON (1988) e ROESNER et al. (1988)** as necessidades propostas anteriormente caracterizam um modelo de nível III, apresentando complexidade de média a alta;
- Estudos de manejo: a concepção para a adoção das práticas de manejo deve estar voltada para a aplicação de técnicas na unidade de um lote com padrão de ocupação do tipo residencial unifamiliar;

Para possibilitar um melhor embasamento antes de explicitar o desenvolvimento das atividades de simulação, serão demonstradas a seguir algumas informações contendo a caracterização da área em estudo e parte das metodologias adotadas pelo projeto MAPLU, no que confere o levantamento dos dados do monitoramento quali-quantitativo.

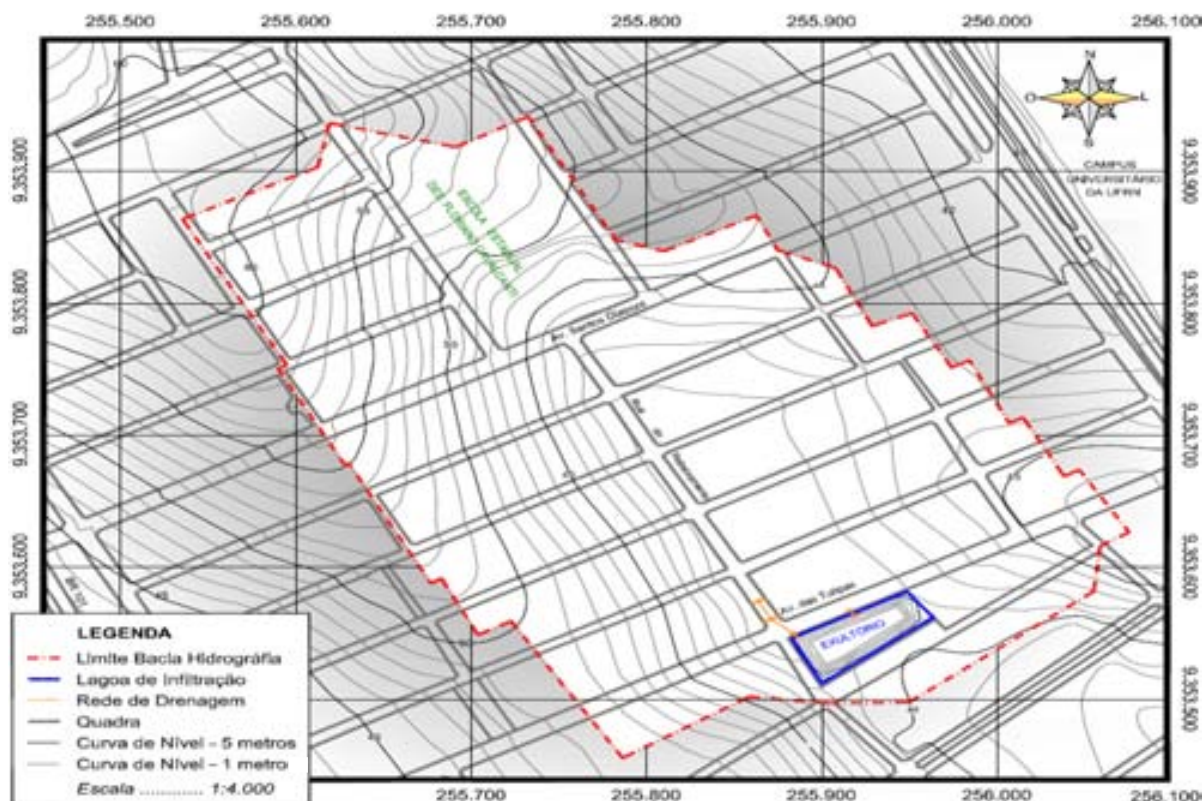
Após o embasamento, apresenta-se uma descrição dos procedimentos da modelagem, relatando inicialmente o emprego do SWMM e, posteriormente, a concepção e aplicação do modelo elaborado.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia experimental encontra-se localizada no Município do Natal e abrange parte dos bairros de Cidade Jardim, Conjunto Mirassol e Campus Universitário. O relevo da bacia é representativo da região com o predomínio de formação lacustre associada à presença de dunas. A camada de solo superficial, fracamente arenoso, apresenta altas taxas de infiltração. O horizonte B do solo é formado por um perfil de baixa permeabilidade, denominado de Formação Barreiras. Vale citar a alta capacidade de armazenamento da região. O local do projeto está inserido no polígono formado pelas coordenadas geográficas 9352900-9353700S e 255380-256700W (UTM). A área da bacia é igual a 0,14 km², a altitude máxima é de 61,10 metros e a altitude na extremidade de jusante é de 34,90 metros. O fluxo das águas do escoamento superficial é direcionado para uma Lagoa de Detenção e Infiltração (Lagoa Mirassol-Cidade Jardim), que está situada na região com cota topográfica inferior aos demais locais da bacia. Há somente um pequeno trecho de coletores de drenagem, situado algumas dezenas de metros da Lagoa. A entrada das águas pluviais se dá através de uma tubulação com diâmetro de 1,00 metro, que recebe o pequeno trecho de galeria e as bocas de lobo da entrada da lagoa, conforme ilustra a Figura 7.

Após uma determinada cota da lagoa, o escoamento superficial excedente é vertido através de um trecho de galeria conectado a uma outra lagoa a jusante. O padrão de ocupação é do tipo residencial unifamiliar classe B e C, com predomínio de lotes de 200m². A sua localização privilegiada enseja alterações de melhoria da paisagem e mudança gradual para residências de padrão tipo A. Figura 7 propicia a visualização da abrangência da área de estudo.

Figura 7 – Delimitação da área de drenagem

FONTE: RIGHETTO *et al.*, 2009

As observações por visitas *in locu* diagnosticaram uma grande densidade de ocupação, condição predominante de revestimento das vias executadas em paralelepípedo, excetuando-se apenas uma das vias que apresenta revestimento asfáltico, prevalecendo arruamentos de classificação secundária. Apenas um dos arruamentos e de classificação do tipo principal. O padrão de ocupação observado indica tendenciosamente um alto grau de impermeabilização, fato que é atenuado pela escassez de áreas verdes. Por se tratar de região de dunas a bacia apresenta uma série de trechos com grandes declividades. A lagoa de detenção/infiltração, presenciada no exutório da bacia, demonstrou, nas atuais condições, densa vegetação e deposição de resíduos sólidos (lixo) em sua área interna.

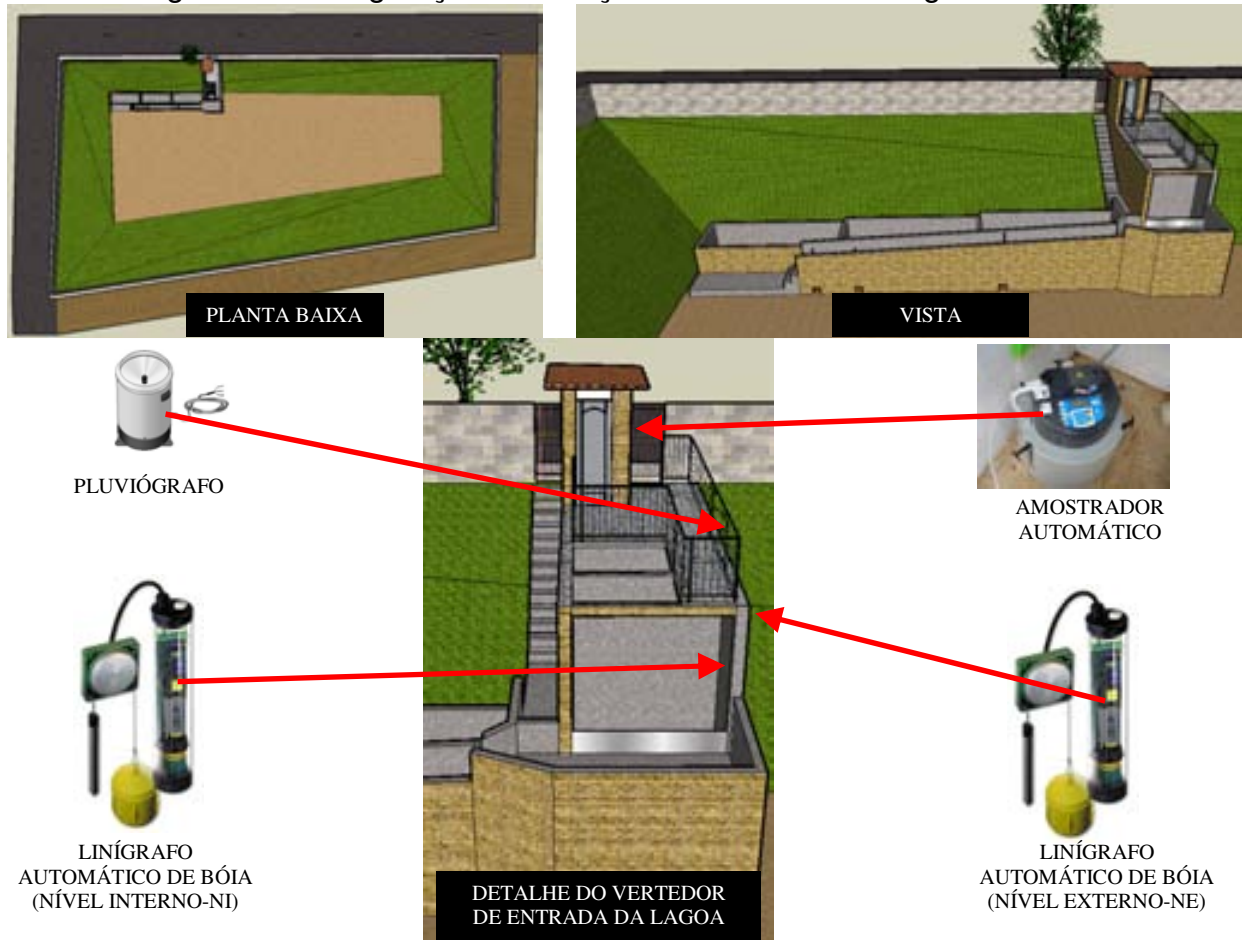
Com embasamento nas afirmações anteriores é que se estabelece a primeira etapa da metodologia do trabalho. A realização de visitas, ainda vigentes, aos diferentes pontos da bacia experimental corrobora as conclusões sobre a geologia e a geomorfologia, permitindo ainda, valendo-se do contexto quantitativo do trabalho, a observação dos elementos responsáveis pela captação e direcionamento dos escoamentos superficiais gerados.

3.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.2.1. DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO QUANTITATIVO NA ÁREA DE ESTUDO

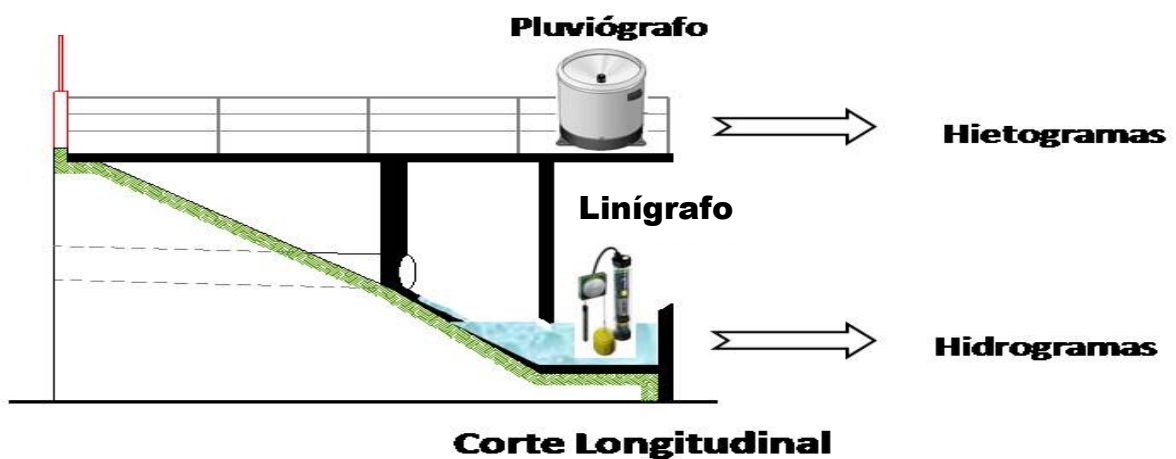
O monitoramento quantitativo das variáveis hidrológicas foi elaborado com o intuito de gerar análises sobre o processo de transformação chuva-vazão e na coleta dos dados indispensáveis para a modelagem da bacia (calibração e validação do modelo SWMM). Aproveitando-se a estrutura já existente na lagoa de retenção/infiltração, foi instalada uma estação hidrológica composta por um pluviógrafo da báscula, dois linígrafos de boia e um datalogger para registro e armazenamento das informações. Os dados de precipitação medidos na lagoa foram utilizados conjuntamente com os dados monitorados pela estação meteorológica do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – LARHISA, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, a fim de utilização em metodologia específica para definição da precipitação na área da bacia. Um dos linígrafos foi empregado para registrar o nível da lâmina d'água na lagoa e o outro para armazenar a altura da água em uma calha vertedora, que precedia o reservatório de acumulação localizado na entrada dessa lagoa. A partir dos valores da lâmina vertida e através de equacionamento hidráulico, para determinação da vazão associada ao vertedor em questionamento, foi possível estabelecer relações entre as precipitações e o escoamento superficial produzido na bacia e armazenado na lagoa ao longo do tempo. Dessa maneira, as instalações dos equipamentos para configuração da estação hidrológica resultaram num processo sistemático para o levantamento de hietogramas e hidrogramas de eventos, assim como os volumes de retenção, de infiltração e de utilização e demais componentes que compõem o balanço hídrico da lagoa. Para monitoramento dos aspectos qualitativos, a ser comentado posteriormente, foi empregado um amostrador automático da água de escoamento superficial, devidamente instalado no abrigo da estação hidrométrica. A Figura 8 apresenta um esquema da estação com os equipamentos de monitoramento e a Figura 9 um corte longitudinal dessa mesma estação.

Figura 8 – Configuração da estação hidrométrica na Lagoa Mirassol



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 9 – Corte longitudinal da estação hidrológica da Lagoa de Mirassol



FONTE: RIGHETTO *et al.*,2009

3.2.2. DESCRIÇÃO DO MONITORAMENTO QUALITATIVO NA ÁREA DE ESTUDO

Os dados do monitoramento qualitativo, os quais serão posteriormente empregados na modelagem bem como na avaliação da propagação dos poluentes na bacia, partiram dos resultados das análises laboratoriais de coletas das águas de escoamento superficial, realizadas durante o período de vigência do projeto MAPLU. Tais coletas foram realizadas na Lagoa Mirassol, com o auxílio do amostrador automático ISCO 6712 (Figura 8), e em pontos de amostragem distribuídos na bacia. Após a realização das coletas, todas as amostras retiradas eram levadas ao laboratório onde os parâmetros de qualidade da água como pH, DQO, sólidos sedimentáveis, óleos e graxas, zinco, cobre e chumbo passavam por metodologias laboratoriais padronizadas para permitir avaliar as concentrações de cada um desses elementos.

Os locais de amostragem para monitoramento da qualidade da água do escoamento superficial na área em questionamento compreendem a Lagoa Mirassol e 04 (quatro) pontos distribuídos na bacia de drenagem, como se pode observar na Figura 10

Figura 10 – Pontos de coletas do monitoramento qualitativo (M1, M2, M3, M4 e M5)



FONTE: RIGHETTO *et al.*, 2009

Para evitar as perdas bem como garantir o correto monitoramento dos aspectos qualitativos ao longo da bacia, o projeto estabeleceu condições para utilização e distribuição dos coletores na área de estudo. Tais critérios são descritos pelas considerações apresentadas em sequência.

1º CRITÉRIO: COLETORES MANUAIS NA LAGOA DE INFILTRAÇÃO

Na perspectiva de evitar perda de amostras nos eventos em que não seja possível utilizar o amostrador automático, foi desenvolvido um dispositivo de coletores manuais constituído de PVC (tubos de 75mm de diâmetro e 30cm de comprimento; e CAP nas partes inferior e superior, contendo, este último um orifício para entrada de água), fixados nas alturas de 15, 30, 45, 60, 75 e 90cm no tanque de acumulação, antes do vertimento (Figura 11). A amostragem ocorre na medida em que a lâmina do tanque de acumulação é elevada em função da captação do escoamento superficial, devendo representar, dessa forma, a variação da qualidade da água ao longo da duração do evento chuvoso.

A fim de impedir troca de água dos coletores com o reservatório de acumulação após enchimento dos mesmos, cada coletor possuía uma esfera de isopor em seu interior objetivando garantir a integridade da amostra armazenada através do fechamento de seu orifício de entrada. O processo de fechamento ocorre quando o aumento do volume da amostra armazenada no coletor obriga, por questões de densidade e empuxo, a esfera de isopor a ser pressionada contra o orifício (ver Figura 11 a).

Figura 11 – a) Coletor e detalhe da tampa; b) Suporte para os coletores de água no tanque da lagoa de infiltração



FONTE: RIGHETTO *et al.*, 2009

2º CRITÉRIO: COLETOR AUTOMÁTICO – ISCO 6712

O monitoramento da qualidade das águas de escoamento que convergem a lagoa contou com o auxílio do amostrador automático ISCO 6712 (Figura 12). O amostrador apresenta capacidade para coleta de 24 amostras isoladas com no máximo 1 litro por recipiente. Cada coleta era retirada através de uma tubulação de sucção que conecta o amostrador a galeria de entrada da lagoa. Todo processo foi efetuado automaticamente pelo equipamento, onde era possível estabelecer a frequência de tempo para retirada das amostras. A primeira coleta realizava-se após o início das precipitações segundo a frequência de tempo estabelecida (tempo de coleta de 05 minutos entre amostras), onde o início desse evento chuvoso é sinalizado ao equipamento através do pulso elétrico enviado pelo pluviômetro de báscula conectado ao mesmo por um cabo apropriado.

Figura 12 – Amostrador automático, com detalhe para a disposição das garrafas em seu interior



FONTE: RIGHETTO *et al.*, 2009

3º CRITÉRIO: COLETORES DISTRIBUÍDOS

Para que fosse possível gerar avaliações sobre o comportamento da qualidade da água de escoamento superficial em termos espaciais, o projeto MAPLU estabeleceu 04 pontos de monitoramento, sendo dois do tipo simples e dois do tipo composto, como explicado adiante, estrategicamente distribuídos na bacia.

A definição de pontos de amostragem levou em consideração a tentativa de avaliar a influência das áreas de contribuição na mudança da qualidade da água de drenagem diante de um evento de precipitação.

Após definido os pontos de monitoramento dos aspectos qualitativos, partiu-se para a elaboração dos amostradores. A solução adotada para o caso foi a elaboração de dois modelos de amostradores, sendo os mesmos instalados em compartimento enterrados nas sarjetas das vias locais. O primeiro deles, denominado de amostrador simples (Figura

13), era designado para coleta pontual, constituindo-se de um tubo de PVC Φ 150mm, dotado de um CAP na parte inferior, suspensório para retirada no momento da coleta e grade de ferro detentora de resíduos sólidos.

Figura 13 – a) Localização de um ponto de coleta simples (M2); b) Amostrador Simples instalado na sarjeta; c) Detalhe do procedimento para coleta de dados da amostra



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

O segundo amostrador, denominado composto, foi confeccionado objetivando armazenar amostras capazes de diagnosticar, quando analisadas em laboratório e relacionadas aos respectivos hidrogramas dos eventos de precipitação, a variação temporal da qualidade da água.

O dimensionamento hidráulico das tubulações levou em consideração a precipitação na área e a vazão do escoamento superficial, obtida através do monitoramento hidrológico. O dispositivo foi instalado no sentido da inclinação da rua. A água é captada por um tubo instalado verticalmente e, logo em seguida, direcionado a 4 (quatro) respectivos coletores que possuem volumes correspondentes a 3 litros, sem que haja mistura dessas águas. O que não for coletado será descartado por um extravasor voltado para a superfície (Figura 14).

Figura 14 – a) Amostrador composto instalado na sarjeta; b) Detalhe da retirada do tubo vertical no momento da coleta c) Coletores dispostos na sarjeta



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

4. RESULTADOS DO MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO

4.1.DADOS DA PLUVIOMETRIA LOCAL

Como resultado da pluviometria local, foram armazenadas informações durante os anos de 2007 e 2008, totalizando 36 (trinta e seis) eventos de interesse. Esses eventos foram analisados conjuntamente com os dados de vazão para a determinação do coeficiente de deflúvio na bacia. A Tabela 7 apresenta um resumo dos eventos de pluviometria registrados durante o período de 2007 a 2008 com os respectivos valores da precipitação total.

Tabela 7 - Resumo dos eventos de precipitação durante o período de 2007 a 2008

Nº DO EVENTO	DATA DE REFERÊNCIA	P _{TOTAL} (mm)
1 ,2 e 3	16/06/2007	114,30
4	18/06/2007	6,60
5, 6 e 7	18/06/2007	46,50
8	27/06/2007	6,10
9 e 10	27/06/2007	11,7
11	30/06/2007	29,50
12 e 13	02/07/2008	14,50
14	05/07/2008	14,70
15, 16 e 17	22/07/2007	47,5
18	14/08/2007	4,60
19	16/08/2007	4,10
20, 21 e 22	20/08/2007	34,30
23 e 24	07/09/2007	14,50
25	13/11/2007	6,90
26	07/05/2008	4,82
27	09/05/2008	1,52
28	29/05/2008	3,048
29	30/05/2008	33,27
30	01/07/2008	108,97
31	08/07/2008	2,79
32	09/07/2008	17,53
33	18/07/2008	8,63
34	22/07/2008	8,128
35	25/07/2008	50,80
36	22/08/2008	5,59

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

4.2. DADOS DOS DEFLÚVIOS ORIGINADOS NA BACIA

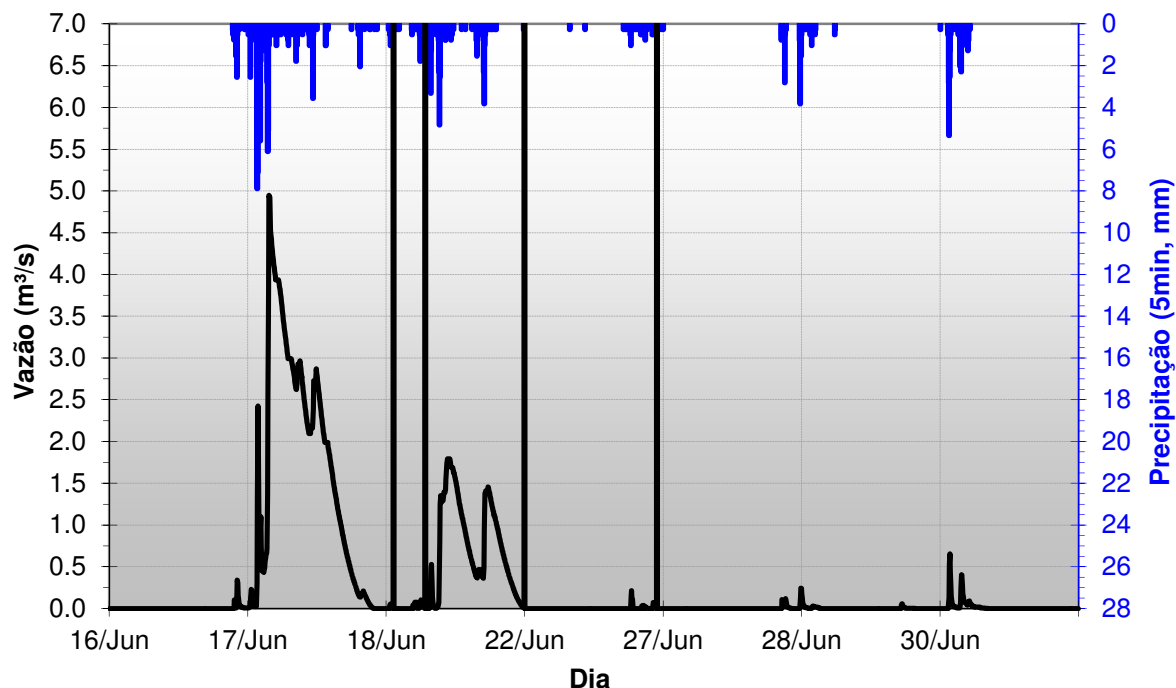
Conforme elucidado anteriormente, os dados representativos dos deflúvios da bacia são provenientes do cálculo das vazões das lâminas em uma calha vertedora que precede o reservatório de acumulação na entrada da lagoa da área de estudo (exutório da bacia), tendo-se em vista que as águas de escoamento superficial geradas na bacia convergem, evidentemente, para esse ponto.

Com a utilização dos linígrafos no reservatório de acumulação e na lagoa bem como o emprego do pluviógrafo para registro dos dados chuva, o projeto MAPLU realizou o levantamento dos hietogramas e hidrogramas correspondentes. Em virtude de problemas técnicos, os meses de janeiro e fevereiro de 2008 foram descartados.

A Figura 15 e a Figura 16 apresentam o resultado do hietograma e hidrograma para o mês de junho dos anos de 2007 e 2008.

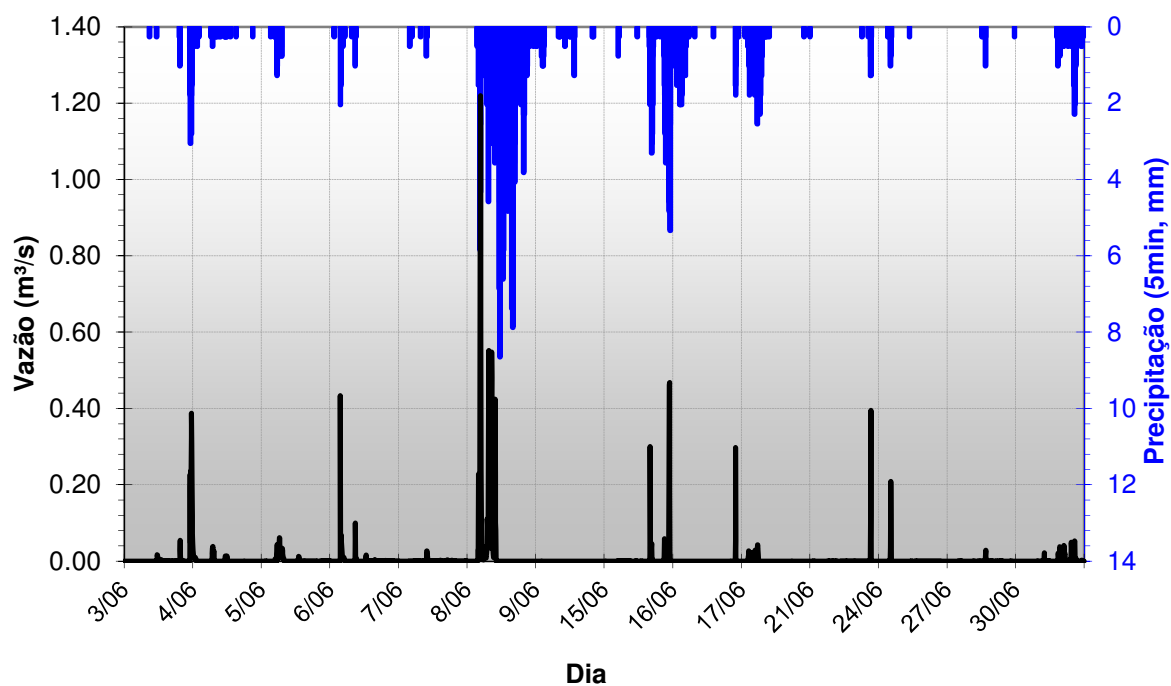
É importante ressaltar que os equipamentos utilizados para registrar valores de precipitação e de vazão foram programados para coletar tais informações em intervalos de 05 (minutos), portanto, diante desse intervalo de análise, a chuva está expressa em mm/5min (milímetros em cinco minutos) e a vazão em m³/s (metros cúbicos por segundo no final de cada intervalo)

Figura 15 - Hietograma e hidrograma para os eventos de mês de junho de 2007



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 16 - Hietograma e hidrograma para os eventos de mês de junho de 2008



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A partir dos dados de precipitação e vazão foi possível encontrar o coeficiente de deflúvio associado a cada um dos eventos monitorados na bacia. Realizando-se uma média aritmética simples entre os valores encontrados, desprezando os eventos de baixa precipitação, chegou-se ao coeficiente de deflúvio “C” numericamente igual a 0,46 ou 46%.

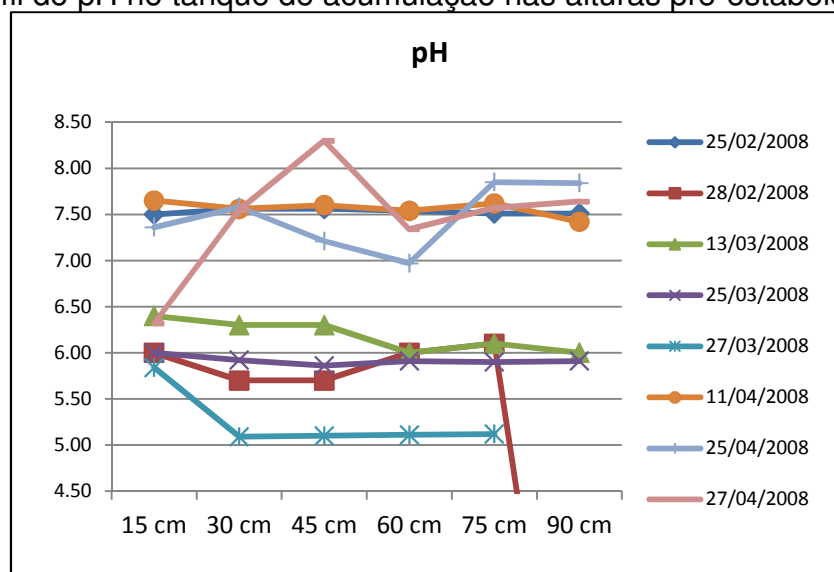
4.3. DADOS DO MONITORAMENTO QUALITATIVO

A seguir consta uma apresentação resumida dos resultados referentes ao monitoramento qualitativo das águas de escoamento superficial, elaborado pelo projeto MAPLU, valendo-se da primeira, segunda e terceira fase atribuída a essa etapa.

4.3.1. DADOS DA PRIMEIRA FASE (COLETORES MANUAIS)

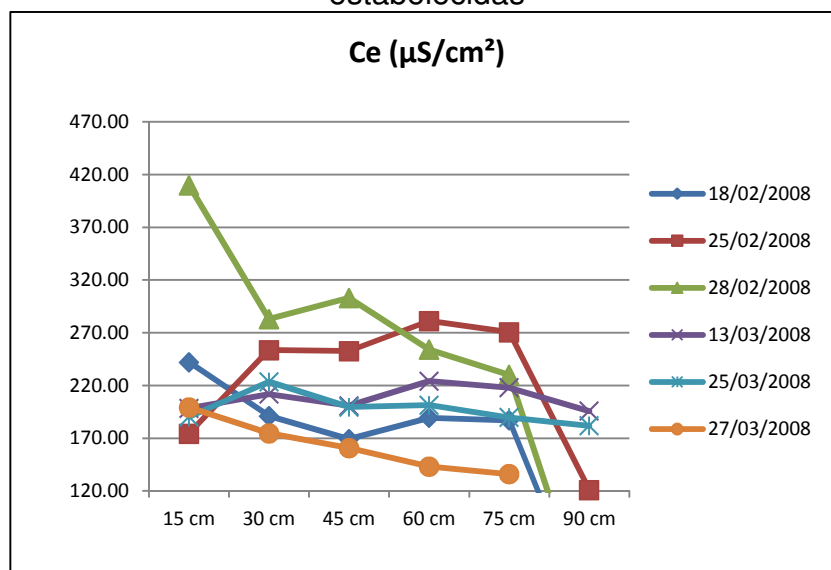
As figuras Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20, demonstradas a seguir, ilustram o comportamento dos parâmetros monitorados, por evento, para essa fase do monitoramento.

Figura 17 - Perfil do pH no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas



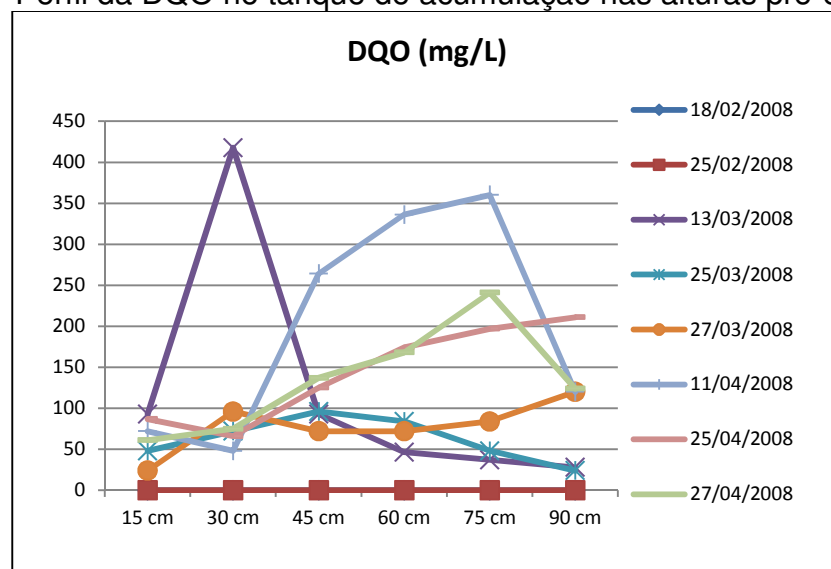
FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 18 - Perfil da condutividade elétrica no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas



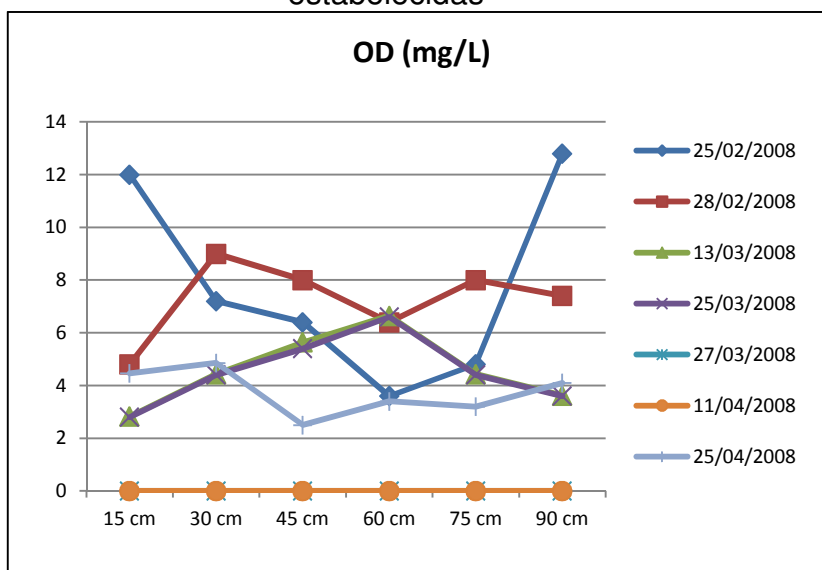
FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 19 - Perfil da DQO no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecida



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 20 - Perfil do oxigênio dissolvido no tanque de acumulação nas alturas pré-estabelecidas



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

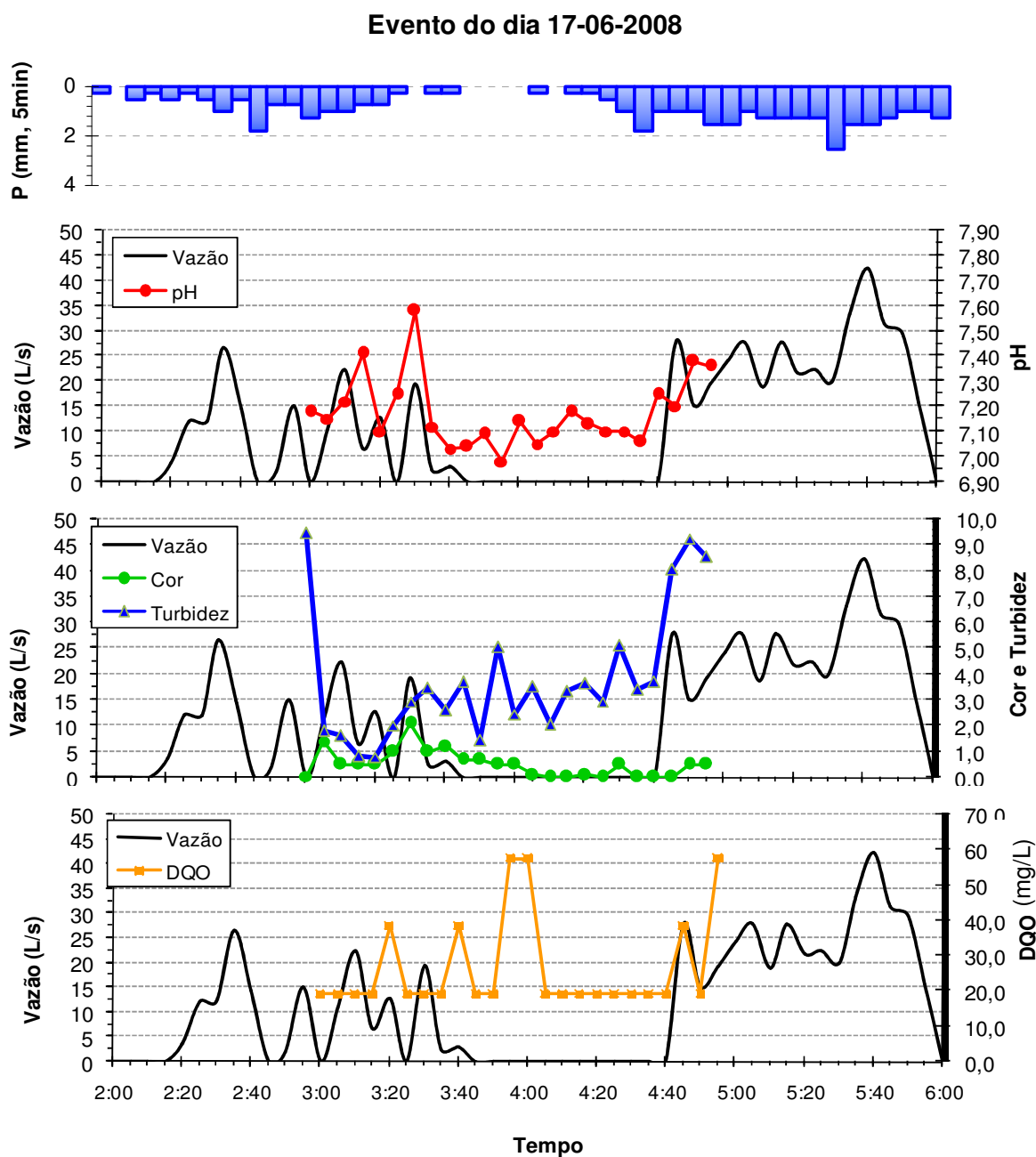
Segundo consta em **RIGHETTO *et al.* (2009)**, os dados coletado nessa fase do monitoramento indicaram uma inexistência na tendência no decaimento da concentração dos poluentes ao longo do tempo. A explicação para o ocorrido, de acordo com o próprio autor, reside no fato do pequeno volume entre amostras, em função das alturas em que os coletores foram dispostos, e também do volume representativo do último coletor, ou seja, além dos intervalos entre as amostras ser pequeno, o último coletor recolhe uma amostra para um volume de 2,72m³ (dois vírgula setenta e dois metros cúbicos) do reservatório de acumulação (valor demasiadamente baixo comparado ao volume total escoado na bacia).

4.3.2. DADOS DA SEGUNDA FASE (COLETOR AUTOMÁTICO ISCO 6712)

A Figura 21 e Figura 22 apresentam alguns dos resultados encontrados pela execução da segunda fase. De acordo com os relatórios de acompanhamento do projeto, os valores demonstrados pela Figura 21 foram obtidos em uma condição em que o intervalo de coleta adotado para o amostrador automático não foi ideal, fato esse que acabou por gerar uma amostragem defasada em termos temporais do período em que se desejava realmente monitorar. Ainda segundo o próprio relatório, tal problema foi solucionado pela adaptação de um pluviógrafo ao amostrador automático, permitindo com que o mesmo fosse capaz de identificar o início dos eventos de precipitação e, por questões de programação interna, iniciar as atividades de coleta. É importante ressaltar

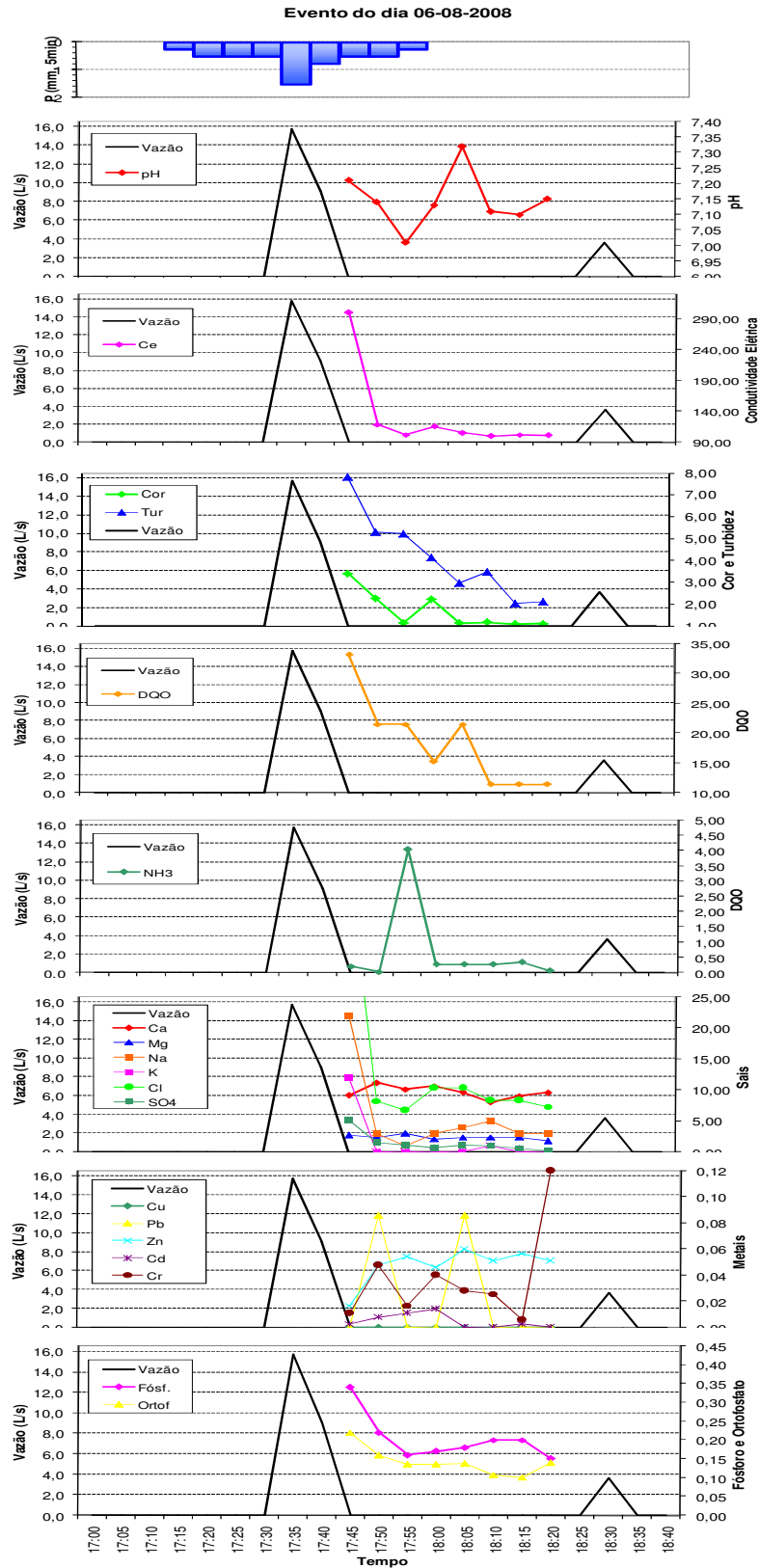
os eventos registrados pela Figura 22 estão enquadrados no final do período chuvoso da região de estudo.

Figura 21 - Polutograma “multi-variáveis” – Evento do dia 17.06.2008



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 22 - Polutograma “multi-variáveis” – Evento do dia 06.08.2008



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

4.3.3. DADOS DA TERCEIRA FASE (COLETORES DISTRIBUÍDOS)

De acordo com **RIGHETTO *et al.* (2009)**, nessa fase foram encontrados resultados bastante aleatórios, chegando-se ao ponto da desconsideração da hipótese de que a lavagem da bacia, através das águas pluviais, ocorre nos primeiros milímetros. Consta no relatório de acompanhamento do projeto, que ensaios realizados para verificação do funcionamento dos coletores compostos indicaram que os mesmos apresentaram problemas com relação ao comportamento hidráulico na coleta das amostras. Para não descartar os dados, o projeto aplicou um tratamento estatístico adotando-se a média dos parâmetros encontrados em cada uma dos recipientes de coleta do amostrador composto. Na aplicação do tratamento estatístico, mesmo possuindo informações sobre o comportamento de alguns parâmetros, o ponto M3 foi excluído em virtude das constantes obstruções desse local pelo carreamento de sedimentos e outros materiais.

A Figura 23 apresenta o resultado do perfil da DQO para os pontos onde foram instalados os coletores distribuídos, considerando-se a precipitação acumulada em 1, 3 e 7 dias antecedentes aos eventos monitorados.

A Tabela 8 demonstra o resultado numérico do tratamento estatístico aplicado aos eventos monitorados através dos pontos dos coletores distribuídos.

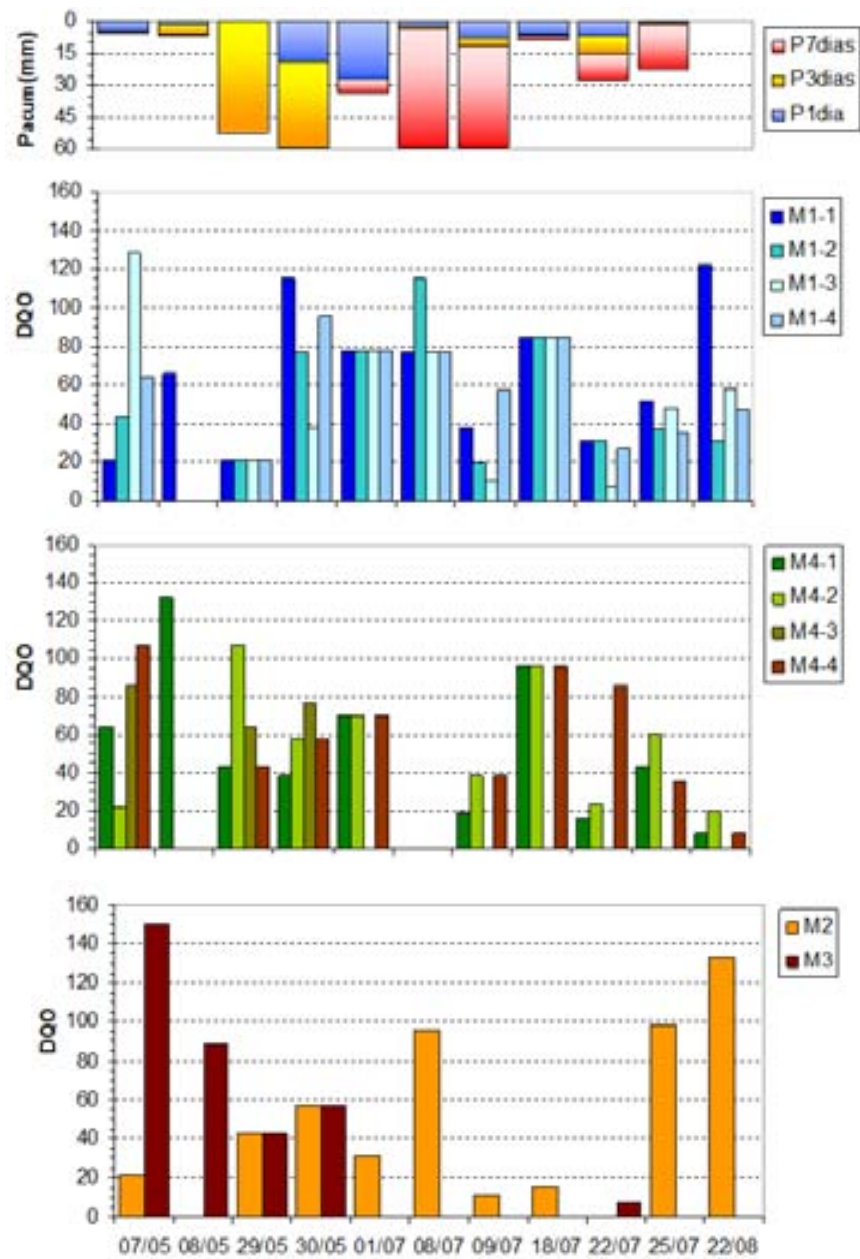
Tabela 8 – Estatística descritiva dos valores de DQO para os dos coletores distribuídos

Ponto	*Mínimo	*Máximo	*Média Aritmética	*Média Geométrica	*Mediana	*Desvio Padrão
M1	21,44	86,40	58,74	52,87	64,70	24,56
M2	10,40	133,33	56,28	41,07	42,88	43,40
M4	11,76	132,50	61,54	51,84	60,96	34,48

**Obs: valores expressos em mg/L (miligramas por litro)*

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 23 - Perfil da DQO nos pontos espaciais distribuídos nas bacias Mirassol e Cidade Jardim em função da precipitação acumulada em 1, 3 e 7 dias antecedentes ao evento



Obs: valores de DQO expressos em mg/L (miligramas por litro)

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

4.3.4. TRATAMENTO DOS DADOS QUALITATIVOS PARA MODELAGEM

Conforme expresso no item 3.2.2, os dados apresentados anteriormente para a concentração da DQO foram retirados das análises laboratoriais das águas de escoamento superficial, coletadas em pontos distribuídos ao longo da bacia. A Tabela 9 indica os valores da DQO para os pontos distribuídos na bacia segundo os eventos de precipitação registrados.

Tabela 9 - Valores da DQO para as águas de escoamento superficial de acordo com os eventos monitorados

Parâmetro	Pontos	7/5/2008	8/5/2008	29/5/2008	30/5/2008	1/7/2008	8/7/2008
DQO mg/L	M1	64,31	66,24	21,44	81,60	78,12	86,40
	M2	21,44	-	42,88	57,60	31,25	96,00
	M3	150,10	88,32	42,88	57,60	-	-
	M4	69,68	132,5	64,32	57,60	70,31	-
Parâmetro	Pontos	9/7/2008	18/7/2008	22/7/2008	25/7/2008	22/8/2008	
DQO mg/L	M1	31,40	84,61	24,22	43,10	64,70	
	M2	10,40	15,38	-	98,20	133,33	
	M3	-	-	7,75		-	
	M4	33,60	96,15	32,94	46,55	11,76	

Obs: os espaços vazios para o ponto M3 representam problemas na coleta de dados

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Considerando-se que cada um dos pontos distribuídos ao longo da bacia é representativo de uma determinada área dessa mesma bacia, foi possível realizar um equacionamento a fim de transformar a concentração da DQO de mg/L (miligramas por litro) para Kg/ha (quilogramas por hectare). Tal transformação é imprescindível tendo-se vista a necessidade de informar a concentração máxima do poluente nas formulações que descrevem a “deposição seca” diante da utilização do SWMM como modelo de simulação dos aspectos quali-quantitativos.

Na subdivisão da bacia, em termos de área de contribuição por amostrador, considerou-se os sentidos de fluxo das águas de escoamento, a disposição das quadras e, evidentemente, o posicionamento de cada um dos amostradores.

A Tabela 10 mostra o resultado encontrado para as áreas de contribuição e conversão das mesmas para as unidades de trabalho do SWMM.

Tabela 10 - Área de contribuição dos pontos de coleta distribuídos ao longo da bacia

AMOSTRADOR	ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO.		
	M²	KM²	HA
M1	46.773,57	0,0468	4,68
M2	26.370,15	0,0264	2,64
M3	81.166,18	0,0811	8,11
M4	116.210,55	0,1162	11,62

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A Figura 24 e Figura 25 esclarecem, em linhas gerais, o procedimento adotado para o cálculo das áreas de contribuição por amostrador.

A partir dos dados de precipitação total por evento e com o auxílio das áreas de contribuição, calcula-se o precipitado total em litros para cada uma das áreas representativa dos amostradores. A Tabela 11 explicita o valor da precipitação total em milímetros associado aos eventos onde o parâmetro DQO foi monitorado através dos coletores distribuídos.

Tabela 11 - Precipitação total em milímetros para os eventos associados à DQO

EVENTO	P _{TOTAL} (mm)
7/5/2008	4,83
8/5/2008	0,13
29/5/2008	3,04
30/5/2008	33,27
1/7/2008	108,90
8/7/2008	2,79
9/7/2008	17,52
18/7/2008	8,63
22/7/2008	8,12
25/7/2008	50,80
22/8/2008	5,58

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A Tabela 12 e Tabela 13 utilizam os resultados fornecidos pela Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 para a obtenção da DQO expressa em kg/ha (quilogramas por hectare).

Tabela 12 - Resultado da DQO (kg/ha) por amostrador segundo os eventos registrados

AMOSTRADOR	EVENTO 7/5/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,004826	225.729,24	64,31	0,46	1,43
M2	0,004826	127.262,34	21,44	0,46	0,48
M3	0,004826	391.708,01	150,1	0,46	3,33
M4	0,004826	560.832,12	69,68	0,46	1,55
AMOSTRADOR	EVENTO 29/5/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,003048	142.565,84	21,44	0,46	0,30
M2	0,003048	80.376,22	42,88	0,46	0,60
M3	0,003048	247.394,53	42,88	0,46	0,60
M4	0,003048	354.209,76	64,32	0,46	0,90
AMOSTRADOR	EVENTO 1/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,108966	5.096.728,63	78,12	0,46	39,16
M2	0,108966	2.873.449,76	31,25	0,46	15,66
M3	0,108966	8.844.354,61	-	0,46	-
M4	0,108966	12.662.998,90	70,31	0,46	35,24
AMOSTRADOR	EVENTO 9/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,017526	819.753,56	31,4	0,46	2,53
M2	0,017526	462.163,25	10,4	0,46	0,84
M3	0,017526	1.422.518,57	-	0,46	-
M4	0,017526	2.036.706,12	33,6	0,46	2,71
AMOSTRADOR	EVENTO 22/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,008128	380.175,56	24,22	0,46	0,90
M2	0,008128	214.336,58	-	0,46	-
M3	0,008128	659.718,76	7,75	0,46	0,29
M4	0,008128	944.559,36	32,94	0,46	1,23
AMOSTRADOR	EVENTO 22/8/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,005588	261.370,70	64,7	0,46	1,66
M2	0,005588	147.356,40	133,33	0,46	3,43
M3	0,005588	453.556,65	-	0,46	-
M4	0,005588	649.384,56	11,76	0,46	0,30
AMOSTRADOR	EVENTO 8/5/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,000127	5.940,24	66,24	0,46	0,039
M2	0,000127	3.349,01	-	0,46	-
M3	0,000127	10.308,11	88,32	0,46	0,051
M4	0,000127	14.758,74	132,5	0,46	0,077
AMOSTRADOR	EVENTO 30/5/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,033274	1.556.343,71	81,6	0,46	12,49
M2	0,033274	877.440,37	57,6	0,46	8,82
M3	0,033274	2.700.723,67	57,6	0,46	8,82
M4	0,033274	3.866.789,87	57,6	0,46	8,82

AMOSTRADOR	EVENTO 8/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,002794	130.685,35	86,4	0,46	1,11
M2	0,002794	73.678,20	96	0,46	1,23
M3	0,002794	226.778,32	-	0,46	-
M4	0,002794	324.692,28	-	0,46	-
AMOSTRADOR	EVENTO 18/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,008636	403.936,53	84,61	0,46	3,36
M2	0,008636	227.732,62	15,38	0,46	0,61
M3	0,008636	700.951,18	-	0,46	-
M4	0,008636	1.003.594,32	96,15	0,46	3,82
AMOSTRADOR	EVENTO 25/7/2008				
	P _{TOTAL} (m)	P _{TOTAL} (L)	DQO MEDIÇÃO (mg/L)	C*	DQO (kg/ha)
M1	0,0508	2.376.097,26	43,1	0,46	10,07
M2	0,0508	1.339.603,62	98,2	0,46	22,95
M3	0,0508	4.123.242,24	-	0,46	-
M4	0,0508	5.903.495,99	46,55	0,46	10,88

C representa o coeficiente de deflúvio, obtido através de uma média aritmética dos valores encontrados para os eventos de precipitação*

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Finalmente, foi realizada uma média aritmética com os valores da DQO (kg/ha) demonstrados pela Tabela 12, configurando os resultados da Tabela 13.

Tabela 13 - Valores médios da DQO (kg/ha)

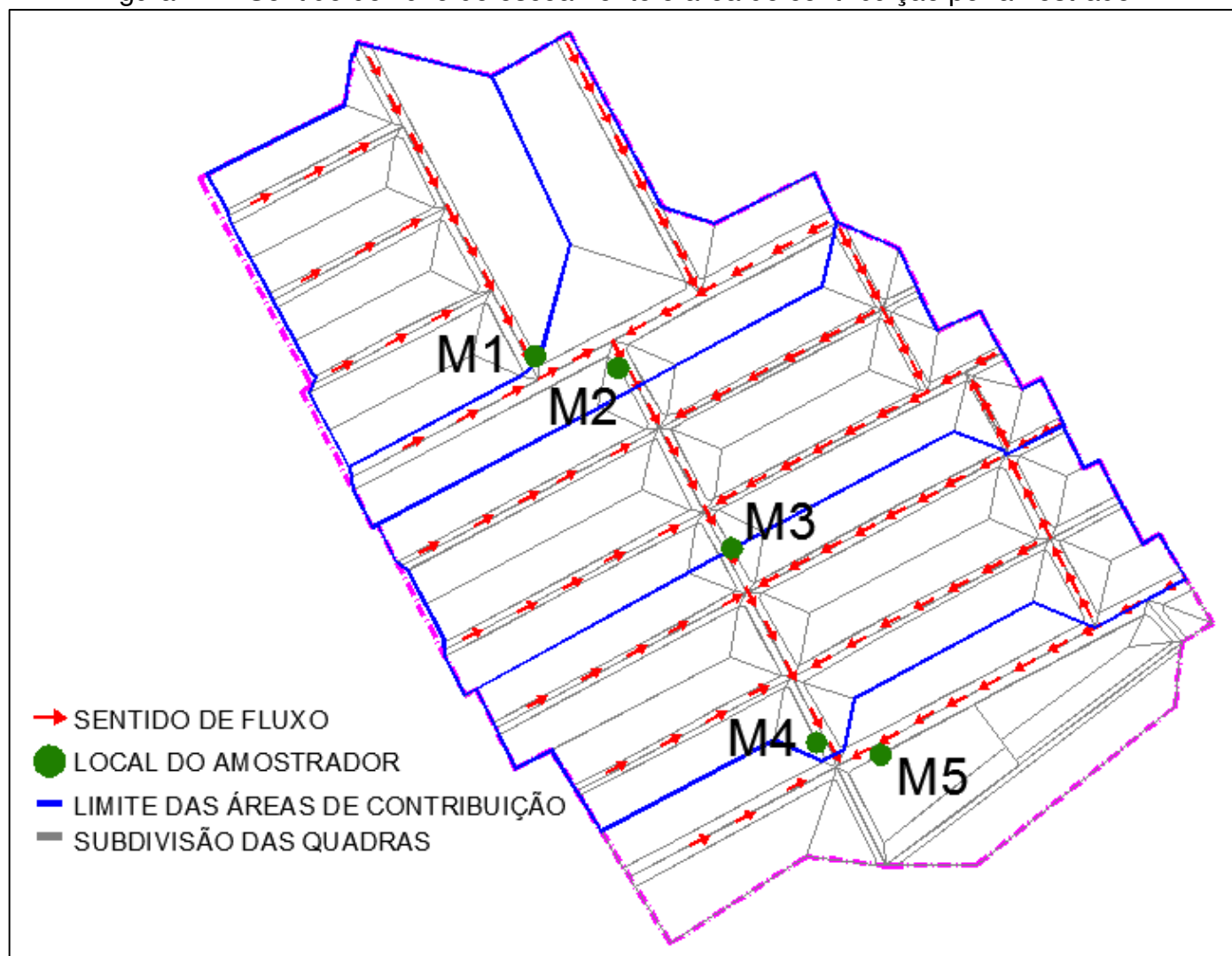
AMOSTRADOR	MÉDIA POR AMOSTRADOR	MÉDIA GERAL
M1	6,64	5,47
M2	6,07	
M3	2,62	
M4	6,55	

FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

A média geral será empregada para indicar a concentração máxima da DQO (kg/ha) na equação de acúmulo do poluente presente no “editor de uso de terra” do SWMM.

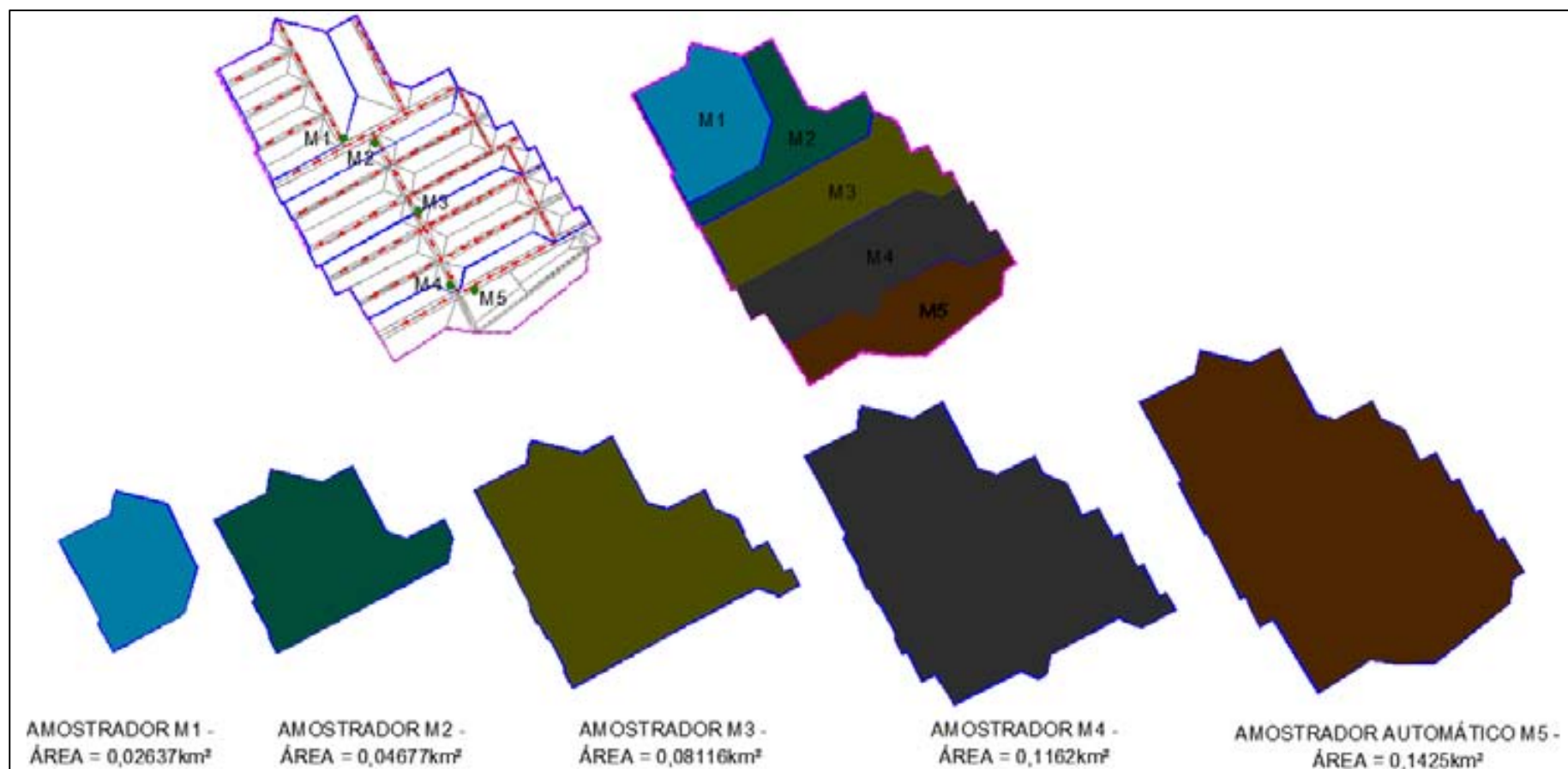
Cabe ressaltar que os dados e procedimentos empregados no presente estudo para o desencadeamento das simulações no âmbito qualitativo foram executados com o intuito de gerar conclusões do ponto de vista acadêmico sobre o comportamento da poluição difusa na bacia. Esse argumento leva em consideração as problemáticas vivenciadas na coleta de dados durante o projeto MAPLU e a própria complexidade do fenômeno do qual se deseja simular.

Figura 24 – Sentido de fluxo do escoamento e área de contribuição por amostrador



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 25 – Resultado da decomposição da área de contribuição por amostrador



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

5. APRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo, não diferentemente do que se encontra para outros softwares, está disponível para maiores aprimoramentos e, inicialmente, foi concebido para gerar avaliações quantitativas no âmbito da microdrenagem. Para tanto, o modelo considera que a bacia de estudo é compreendida como uma área formada pela associação de lotes, quadras e demais elementos/dispositivos que caracterizam o sistema de drenagem local.

Tratando-se de um modelo voltado exclusivamente para bacias urbanas, cada lote é designado para representar a configuração de uma residência de padrão unifamiliar, satisfazendo distintas condições de uso e ocupação da área desse lote na qual se estabelece a referida residência.

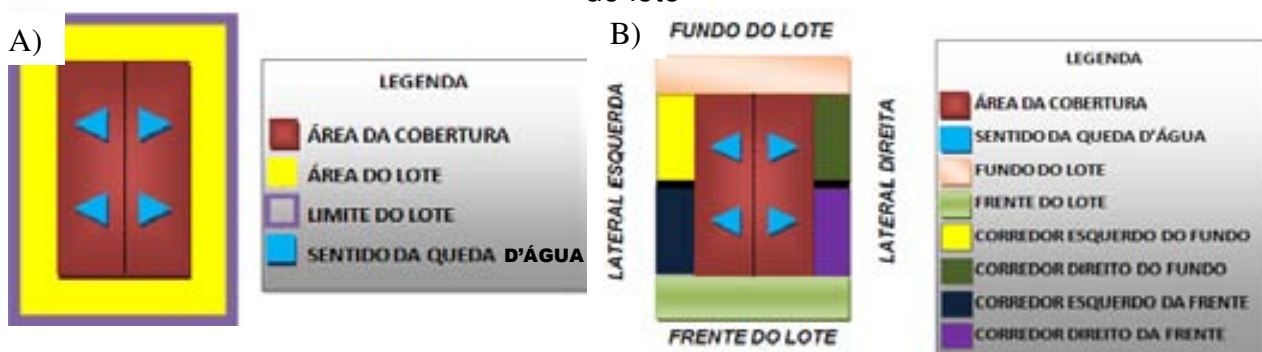
É permitida a caracterização das superfícies na qual se desenvolvem os escoamentos, levando-se em consideração a adoção de coeficientes que expressam a rugosidade dessas superfícies bem como de suas capacidades de absorção dos escoamentos.

No interior do lote, a arquitetura do algoritmo permite considerar a transferência dos deflúvios, de uma maneira direta e unidirecional, pela passagem desses escoamentos de áreas impermeáveis para permeáveis e de áreas impermeáveis para impermeáveis. O transporte dos escoamentos entre as áreas citadas pode ocorrer, diante apenas de uma constatação prática, pela utilização de condutos (tubos, calhas e similares) com diferentes perfis longitudinais e transversais.

Para que seja possível caracterizar a área do lote optou-se por uma discretização constituída pelas seguintes partes: corredor esquerdo da frente, corredor esquerdo do fundo, corredor direito da frente, corredor direito do fundo, frente do lote, fundo do lote e área da cobertura.

A Figura 26 representa, em linhas gerais, o sistema a ser modelado diante das condições elucidadas anteriormente.

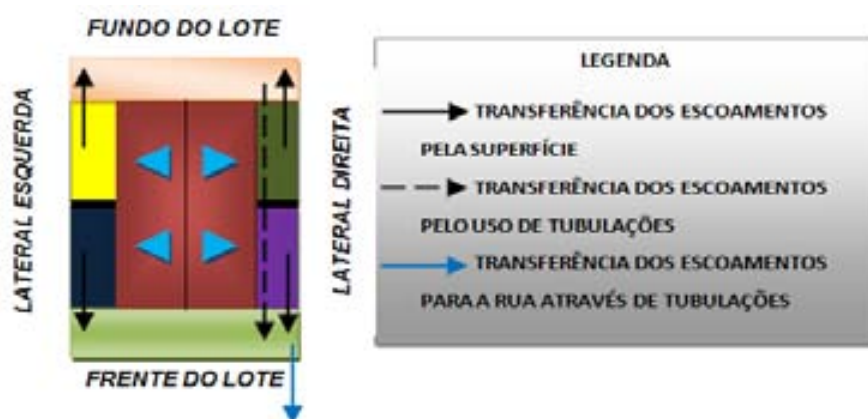
Figura 26 – A) Apresentação da área do lote com a edificação; B) Discretização da área do lote



A escala de tempo, para a avaliação sucessiva da formação e transporte dos escoamentos a partir do interior do lote, foi definida como sendo de 01 (um) minuto, tendo-se em vista a necessidade de registrar adequadamente os processos hidráulicos e hidrológicos para essa pequena unidade de observação.

Levando em consideração os aspectos quantitativos da formação dos deflúvios em cada uma das áreas discretizadas, a transferência/passagem dos escoamentos entre essas áreas ocorre conforme estabelecido pela Figura 27.

Figura 27 – Transferência dos escoamentos entre as áreas discretizadas



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Para gerar e registrar os deflúvios em função do tempo, no caso das áreas de corredor e cobertura, o modelo em questionamento emprega o método racional compatibilizado para apresentar os resultados na escala de litros por minuto. A equação 10 demonstra o método racional utilizado pelo modelo para gerar as vazões na escala de litros por minuto.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{60} \quad (10)$$

Sendo:

- Q = vazão (l/min);
- C = coeficiente de “runoff” (adm);
- i = intensidade da chuva (mm/h);
- A = área de contribuição (m²);

O fundo bem como a frente do lote são compreendidos como áreas permeáveis nas quais ocorrem processos infiltração. Conforme demonstrado pela Figura 27, cada uma das áreas em questionamento recebe 50% das contribuições dos escoamentos provenientes do corredor e da cobertura. Evidentemente, as referidas áreas também propiciam a formação de deflúvios através da precipitação direta. No âmbito da avaliação

dos deflúvios nos espaços permeáveis do lote, no que diz respeito às constantes interações entre as descargas de chegada, saída e a precipitação direta, o modelo executa um balanço hídrico permitindo o surgimento de uma lâmina de armazenamento na frente e no fundo do lote. Tal lâmina é iterativamente calculada ao longo do tempo em função dos deflúvios afluentes e da infiltração no local. A transferência dos escoamentos da área do fundo para a frente do lote e dessa para a via pública é definida por um limite na altura máxima da lâmina de armazenamento. A Figura 28 expõe a sistemática adotada para a efetivação do balanço no interior do lote e as variáveis consideradas no evento.

A equação 11 representa a formulação adotada no algoritmo do modelo para o cálculo da lâmina armazenada no fundo do lote em função do tempo. Esse mesmo equacionamento é utilizado para a efetivação do balanço na frente do lote.

$$H(t) = H(t - \Delta t) + \left(\frac{Q(t)_{\text{CORREDOR}}/10}{A_c} \right) + \left(\frac{\frac{Q(t)_{\text{TELHADO}}/2}{10}}{A_c} \right) + \frac{P(t)}{600} - f(t) \quad (11)$$

Onde:

- $H(t)$ = altura da lâmina d'água excedente na área do fundo ou frente do lote no tempo "t" (cm);
- $H(t-\Delta t)$ = altura da lâmina d'água excedente na área do fundo ou frente do lote no tempo "t-Δt" (cm);
- $Q(t)_{\text{CORREDOR}}$ = vazão de contribuição das respectivas parcelas do corredor esquerdo e direito do lote no tempo "t" (L/min);
- $Q(t)_{\text{TELHADO}}$ = vazão de contribuição para 50% da área de telhado no tempo "t" (l/min);
- A_c = área de contribuição do fundo ou frente do lote (m²);
- $P(t)$ = precipitação no tempo "t" (mm/h);
- $f(t)$ = infiltração no tempo "t" (cm/min);

A infiltração atribuída ao parâmetro " $f(t)$ ", equação 11, é tratada pelo método de Horton, permitindo, dessa forma, considerar a variabilidade da capacidade de infiltração em função do tempo. A equação empírica de infiltração desenvolvida por Horton (equação 12) e implementada no algoritmo do modelo considera que:

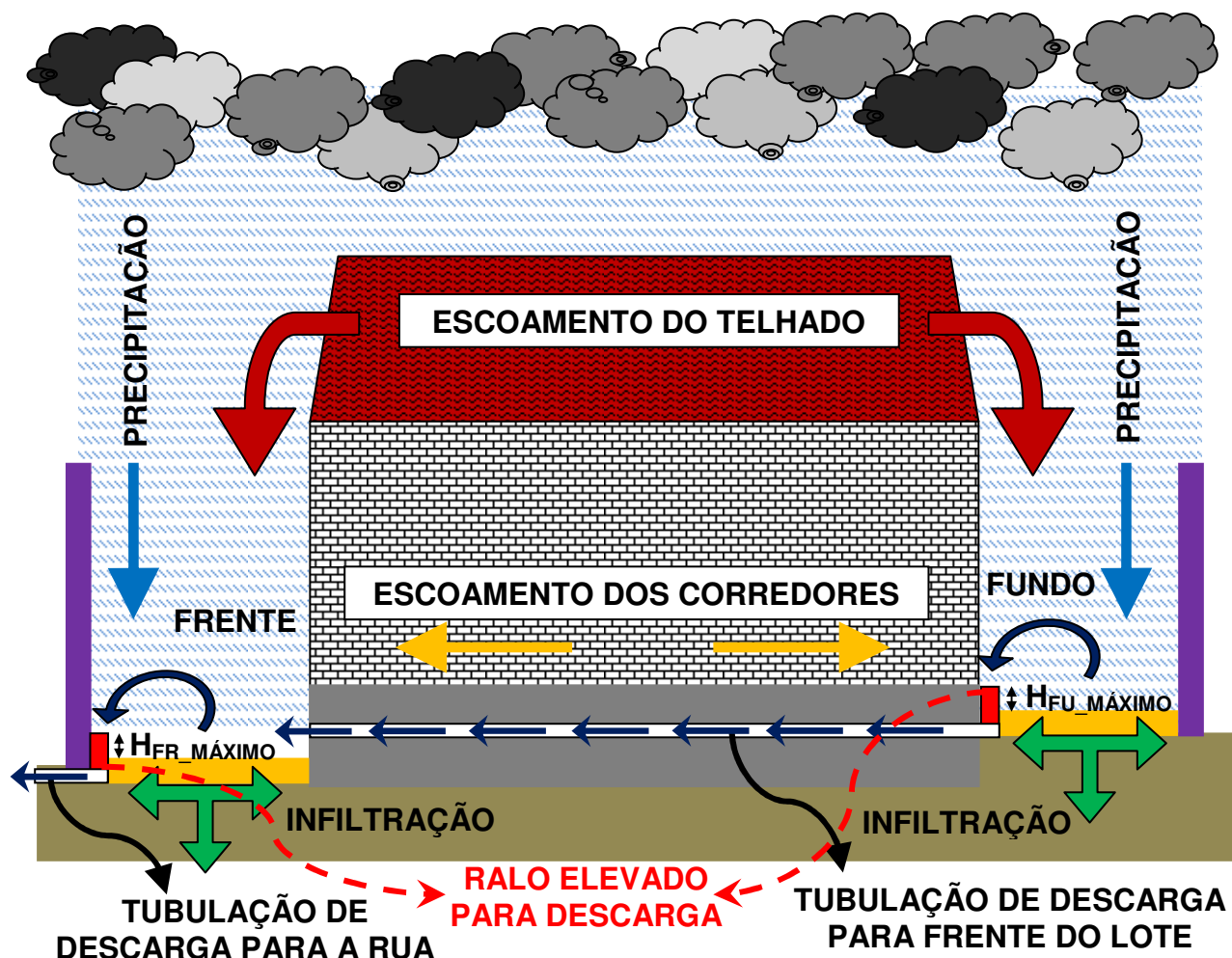
$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (12)$$

Sendo:

- f = capacidade de infiltração em função do tempo (cm/min);
- f_0 = capacidade de infiltração inicial do solo (cm/min);
- f_{∞} = capacidade de infiltração mínima do solo (cm/min);

- α = coeficiente de decaimento (min^{-1});
- t = tempo (min);

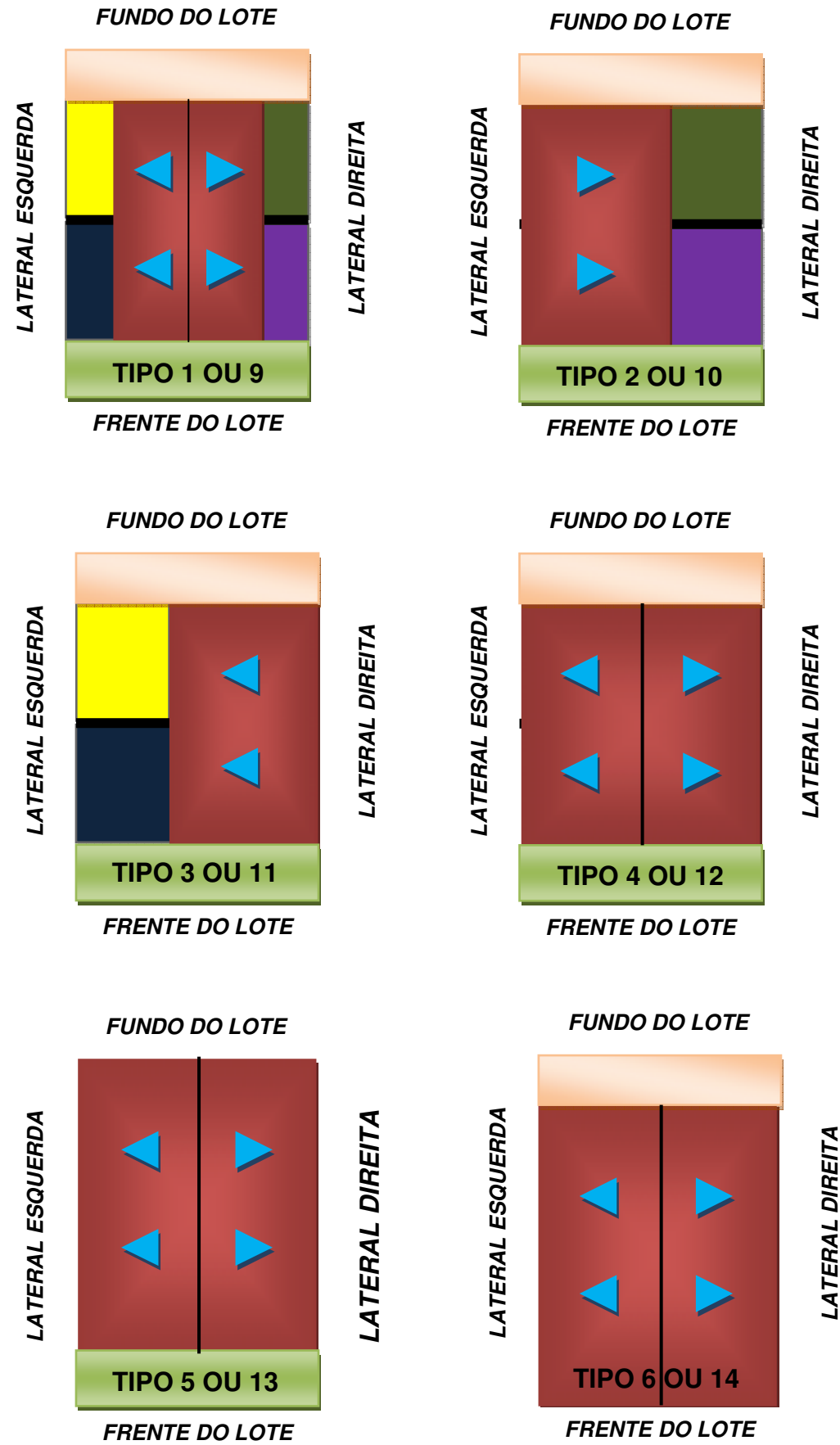
Figura 28 – Fenômenos considerados no balanço hídrico da frente e do fundo do lote

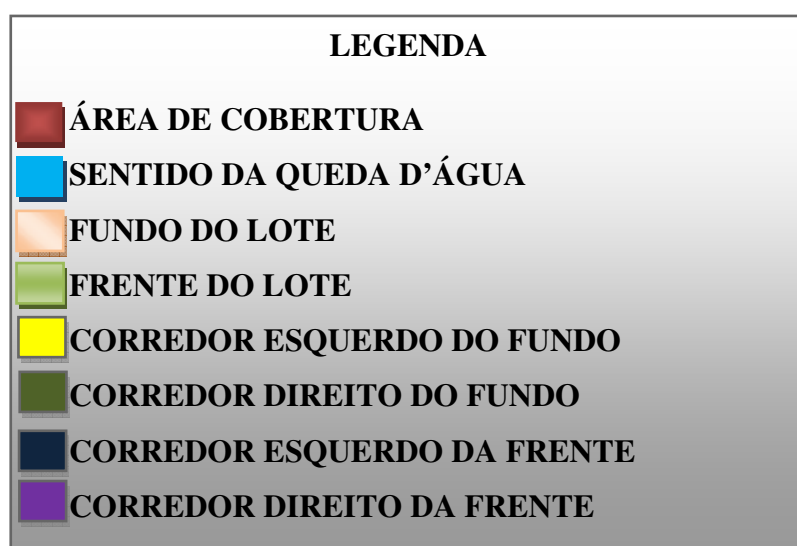
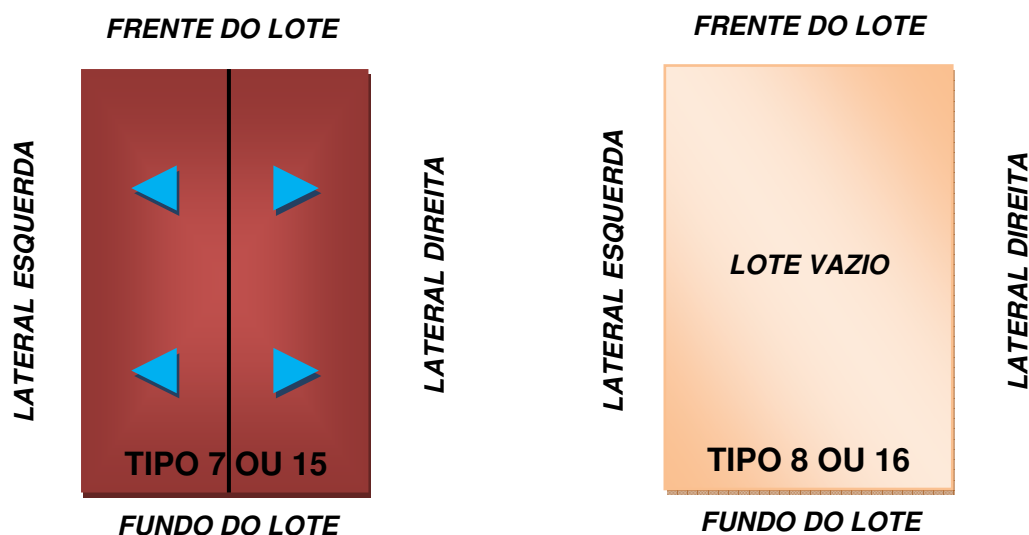


FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Na tentativa de avaliar coerentemente a heterogeneidade das possíveis configurações dos lotes na bacia, o modelo comporta que o usuário realize um cadastro de 02 (dois) padrões de dimensão da área do lote e 16 (dezesseis) tipos de ocupação dessa área. Os tipos de ocupação vão desde residências que utilizam integralmente o espaço do lote até a disposição do terreno vazio. A Figura 29 apresenta os tipos de ocupação considerados e a Figura 30 a interface de trabalho do programa com as janelas que auxiliam na caracterização das dimensões e dos coeficientes representativos das superfícies dos lotes.

Figura 29 - Consideração das possibilidades de ocupação da área do lote

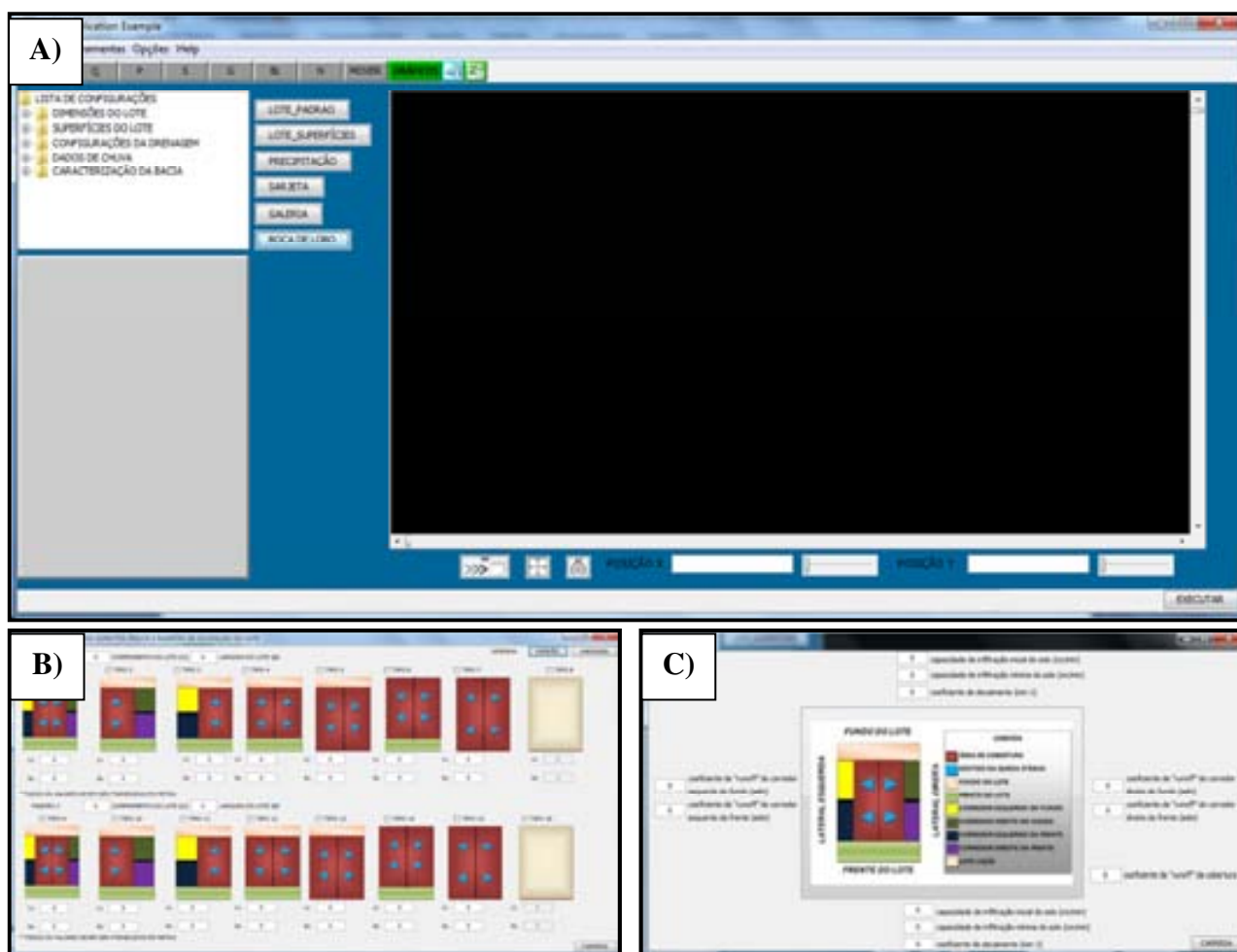




FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Cabe ressaltar que o modelo proposto permite que dois padrões de tamanho do lote sejam cadastrados. Nesse sentido, cada possibilidade de ocupação do lote (Figura 29) pode ser utilizada para representar a utilização de tais padrões. Assim sendo, para um primeiro padrão cadastrado teremos os tipos de 01 (um) a 08 (oito) como possibilidades de ocupação e para o segundo padrão os tipos de 09 (nove) a 16 (dezesesseis).

Figura 30 – A) Apresentação da interface do modelo; B) Janela para configuração dos padrões e tipos de lote; C) Janela de inserção dos parâmetros para caracterização das superfícies do lote



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Os deflúvios excedentes lançados nos arruamentos, após a execução do balanço no interior dos lotes, são propagados ao longo dos elementos de drenagem através do método da onda cinemática. Nessa circunstância, o modelo utiliza-se de uma planilha para gerenciar a transferência dos deflúvios entre os trechos de montante e jusante ao longo de toda a rede.

Para facilitar o processo de inserção dos coeficientes e demais características físicas dos elementos que representam a bacia, foi desenvolvida uma ferramenta de desenho, inserida no próprio ambiente de trabalho do modelo, na qual é possível representar simbolicamente o posicionamento dos nós da rede, lotes, quadras, sarjetas, galerias e bocas de lobo.

Ressalta-se que algoritmo desenvolvido para o modelo permite que o usuário possa importar arquivos de texto contendo informações de algumas propriedades e também sobre a localização dos elementos ao longo da bacia. Nesse caso, softwares de desenho

e geoprocessamento podem ser empregados para auxiliar o usuário na coleta de tais informações, tendo-se em vista que diversos programas já desenvolvidos nessa área permitem extrair e salvar em formato conveniente os dados necessários para desencadeamento de tal processo. A Figura 31 mostra o exemplo da utilização de um software de geoprocessamento contemplando o resultado da discretização da bacia.

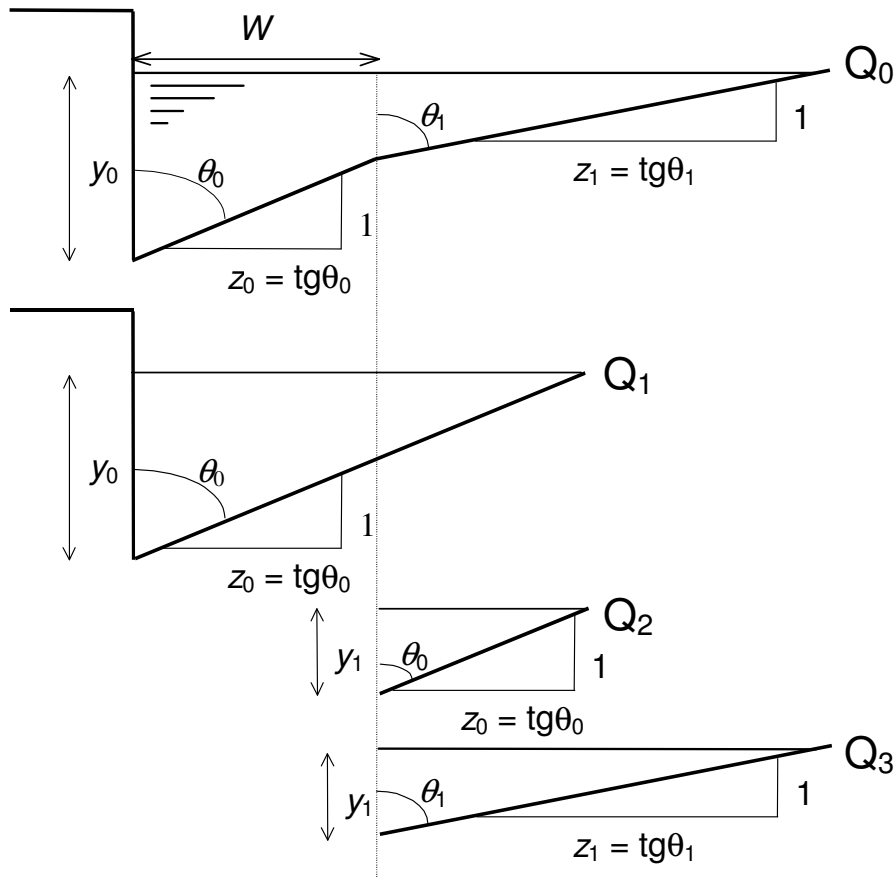
Figura 31 – Resultado da representação da bacia através de software de geoprocessamento



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Na condição de transporte dos escoamentos através de sarjetas optou-se por empregar tipos com seção transversal composta (Figura 32). A metodologia de cálculo das vazões para esse tipo de seção está fundamentada de acordo com o que consta na Figura 32.

Figura 32 – Metodologia de cálculo da vazão para sarjeta de seção composta



FONTE: MOREIRA, 2007

O equacionamento 13 propõe a obtenção da vazão de projeto para sarjetas de seção composta.

$$Q_0 = Q_1 - Q_2 + Q_3 \quad (13)$$

Onde:

$$Q_1 = 0,375 \cdot y_0^{8/3} \left(\frac{z_0}{n} \right) \cdot \sqrt{I} \quad (14)$$

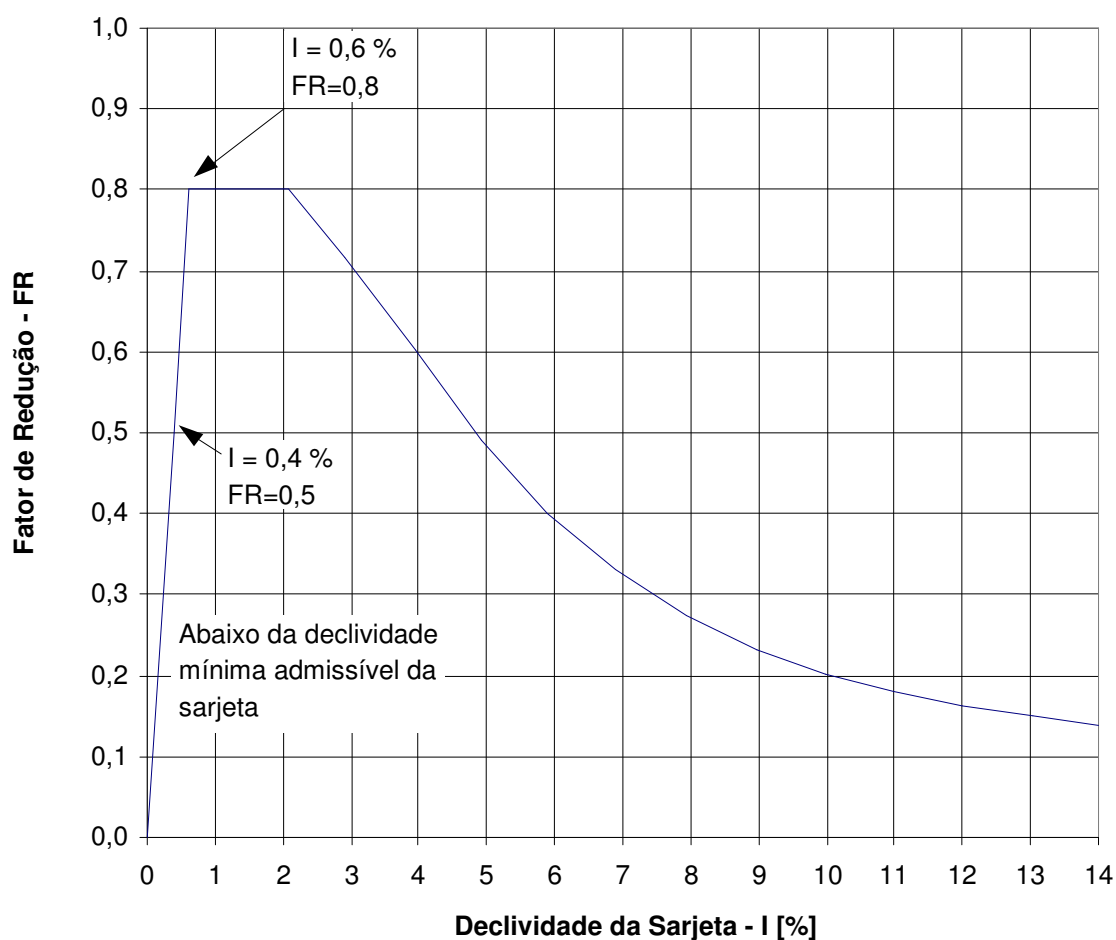
$$Q_2 = 0,375 \cdot y_1^{8/3} \left(\frac{z_0}{n} \right) \cdot \sqrt{I} \quad (15)$$

$$Q_3 = 0,375 \cdot y_1^{8/3} \left(\frac{z_1}{n} \right) \cdot \sqrt{I} \quad (16)$$

- W = largura da sarjeta (m);
- y_0 = altura da lâmina de escoamento na seção de Q_1 (m);
- y_1 = altura da lâmina de escoamento na seção de Q_2 ou Q_3 (m);
- n = número de Manning ($m^{-1/3}.s$);
- z_0 e z_1 = declividades transversais da sarjeta (m/m);
- I = declividade longitudinal da sarjeta (m/m);

No caso das sarjetas, uma vez calculada a capacidade teórica, multiplica-se o seu valor por um fator de redução que leva em conta a possibilidade de obstrução de sarjetas de pequena declividade por sedimentos. Essa ação tem como objetivo avaliar, em virtude dos processos de simulação, a capacidade de transporte das sarjetas diante das condições naturais de utilização. A Figura 33 representa a curva do fator de redução de acordo com a declividade longitudinal da sarjeta.

Figura 33 – Fator de redução da sarjeta

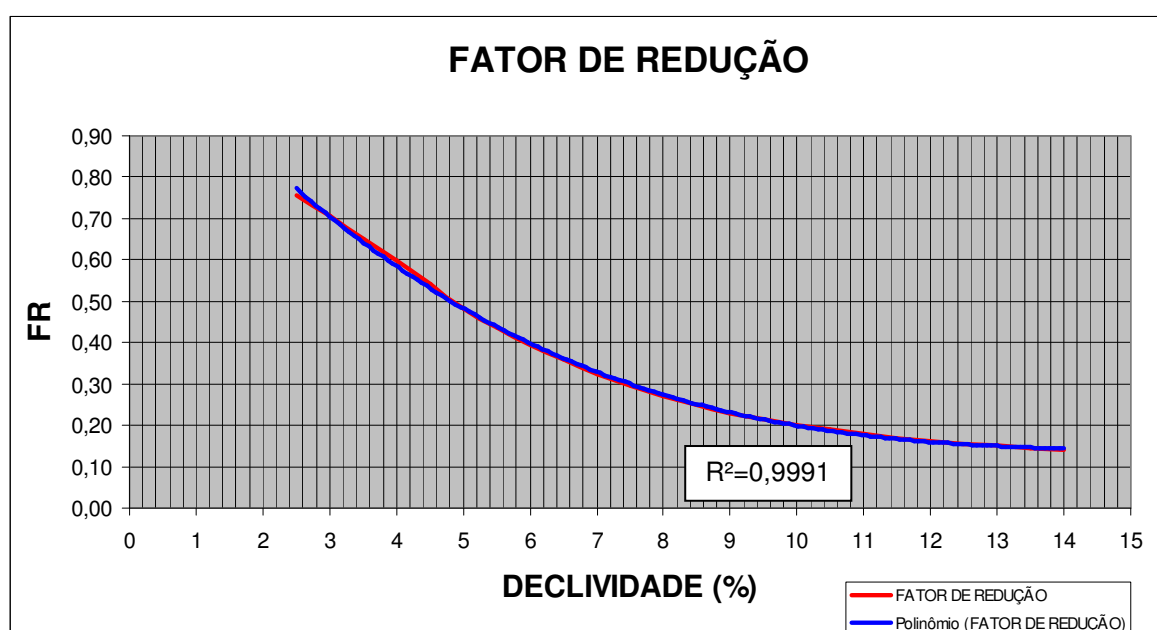


De forma genérica, deve-se ter:

- Declividade $I < 0,4\% \rightarrow FR = 0,5$;
- $0,6\% < I < 2\% \rightarrow FR = 0,8$;
- Outras declividades $\rightarrow FR$ dependerá do tipo de via e de sua relação com outras vias;

Como forma de otimizar a obtenção do fator de redução foi construída, com auxílio de planilha eletrônica, a curva demonstrada pela Figura 34. A partir da elaboração gráfica determinou-se a expressão do polinômio que a representa através da metodologia de ajuste de curvas. A Figura 34 mostra o resultado desses procedimentos.

Figura 34 – Determinação do polinômio para a curva do fator de redução



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A curva do polinômio presente na Figura 34 é caracterizada pelo equacionamento 17.

$$FR = - 0,0003.(I^3) + 0,0126.(I^2) - 0,1982.(I) + 1,1935 \quad (17)$$

Onde:

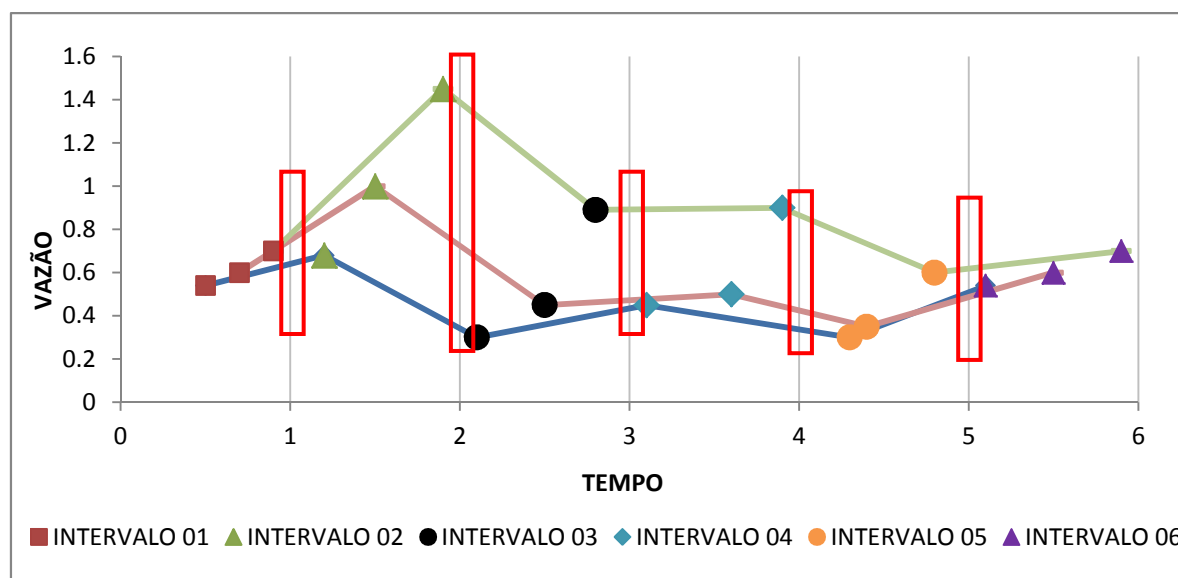
- FR = fator de redução;
- I = declividade longitudinal da sarjeta em percentagem;

Após as maiores definições da seção transversal e do cálculo das vazões de contribuição no trecho, de acordo com os esclarecimentos feitos anteriormente, o modelo determina o tempo de percurso para a propagação dessas vazões pelo método da onda cinemática. Nesse contexto, para cada vazão de contribuição no trecho, observada no período de 01 (um) minuto, determina-se a área da seção transversal correspondente

utilizando-se o método da tentativa e erro. A partir do quociente estabelecido entre a vazão de contribuição e a área da seção transversal correspondente encontra-se a velocidade média. Na determinação do tempo de percurso efetua-se a divisão do comprimento do trecho pela velocidade média.

Evidentemente, um único trecho pode receber contribuições por parte de vazões a montante, descargas de lotes ou quadras e em função também da precipitação que incide diretamente sobre os arruamentos. Para informar a vazão no nó de jusante de um trecho, a cada intervalo de tempo, o modelo utiliza-se de interpolações entre os valores encontrados em intervalos sucessivos. Após encontrar os resultados das interpolações para cada deflúvio que converge ao nó, o modelo realiza o somatório dessas considerando tal resultado como sendo a vazão no nó de jusante do trecho. Caso o tempo de propagação de qualquer um dos deflúvios seja superior ao intervalo de resolução do modelo, ela passa a ser considerada somente no intervalo subsequente, em outras palavras, se uma vazão possui tempo de propagação igual a 4,5 (quatro vírgula cinco) minutos ela só deve ser avaliada ao início do quarto minuto de simulação. A Figura 39 mostra a aplicação de tais conceituações.

Figura 35 – Metodologia adotada para a contabilização das vazões segundo intervalo de análise do modelo proposto



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Fica claro que existe certo prejuízo na contabilização das vazões ao final de cada intervalo, tendo-se em vista que vazões cujo período de propagação é menor do que 01 (um) minuto são “transladadas” para esse tempo. De qualquer forma cabe lembrar que está se tratando aqui de um intervalo de resolução consideravelmente baixo.

6. APLICAÇÃO DA MODELAGEM

6.1. APLICAÇÃO DO MODELO SWMM

A seguir são apresentados os principais procedimentos adotados nas definições dos métodos e dos demais aspectos dentro da modelagem em função da utilização do SWMM (Storm Water Management Model).

6.1.1. DADOS DE ENTRADA

Conforme mencionado anteriormente, o SWMM é um modelo que requer uma quantidade de dados de entrada bastante significativa. Portanto, é necessário fornecer, além dos aspectos de ajuste intrínsecos à utilização do próprio modelo, os parâmetros para as caracterizações climatológicas, hidrológicas, hidráulicas, qualidade e uso e ocupação da bacia. Os itens prescritos em sequência relacionam a inserção dos parâmetros considerados na modelagem.

6.1.2. PARÂMETROS E AJUSTES DO MODELO

6.1.2.1. AJUSTES GERAIS (UNIDADE DE MEDIDA)

Ao implementar os dados no modelo é preciso observar e definir o sistema de unidades em que se deseja trabalhar. Para a localidade em que se desenvolve o estudo, somando-se ainda as referências bibliográficas comumente consultadas, optou-se por adotar as unidades em CMS (metros cúbicos por segundo “m³/s”) incorporando-se por consequência ao sistema internacional SI.

6.1.2.2. AJUSTES GERAIS (METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO)

Outro aspecto de ajuste é a escolha do método de infiltração. O SWMM permite a escolha de três diferentes processos, sendo eles: equação de Horton, fórmula de Green-Ampt e a utilização do método NRCS (Natural Resource Conservation Service) com o emprego do CN (número de curva).

Para o caso da área de estudo foi aplicado o método de Horton. O referido método considera a variação da taxa de infiltração ao longo do tempo segundo as condições proposta pelo equacionamento 18.

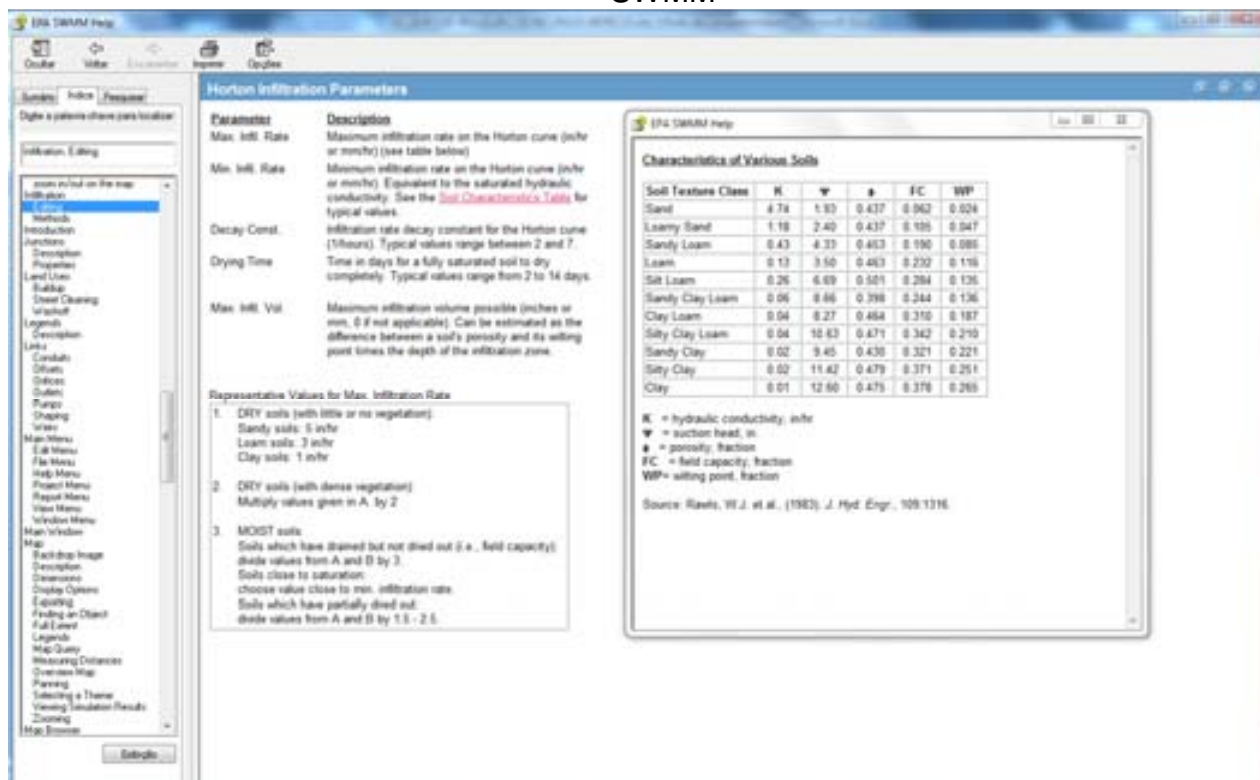
$$f = f_{\infty} + (f_0 - f_{\infty}) \cdot e^{-a \cdot t} \quad (18)$$

Sendo:

- f = capacidade de infiltração em função do tempo ($[L].[T^{-1}]$);
- f_0 = capacidade de infiltração inicial do solo ($[L].[T^{-1}]$);
- f_{∞} = capacidade de infiltração mínima do solo ($[L].[T^{-1}]$);
- a = coeficiente de decaimento ($[T^{-1}]$);
- t = tempo ($[T]$);

O SWMM emprega o modelo de infiltração para o domínio permeável considerado em cada sub-bacia. Nessa definição, tratando-se exclusivamente da área em questionamento, a adoção dos valores para cada um dos parâmetros apresentados na equação de Horton leva em conta a observação básica das características geológicas e dos fatores de uso e ocupação do solo. Nas primeiras avaliações da infiltração foram utilizados os valores sugeridos pelo próprio modelo, sendo esses obtidos de acordo com os quadros apresentados na Figura 36. O resultado final dos parâmetros de Horton encontrados para cada uma das áreas permeáveis consideradas na bacia pode ser visualizado no item de calibração do modelo.

Figura 36 – Valores sugeridos para os parâmetros da equação de Horton segundo o SWMM



FONTE: ROESNER, L. A. *et al.*, 1988

6.1.2.3. AJUSTES GERAIS (DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DOS DEFLÚVIOS)

Na determinação do processo de propagação dos deflúvios ao longo da bacia foi selecionado o método de onda cinemática. Vale salientar que, para a área em estudo, a transferência das águas de drenagem dos pontos de montante para os mais a jusante na bacia ocorre através da utilização de sarjetas como elementos de drenagem. Evidentemente, as sarjetas recebem as descargas provenientes de cada uma das respectivas subáreas.

6.1.2.4. AJUSTES GERAIS (DEFINIÇÃO DOS PERÍODOS DE SIMULAÇÃO E DOS INTERVALOS DE CÁLCULO)

Um último elemento importante para os ajustes dos aspectos gerais de simulação é a definição das datas de simulação e do intervalo de cálculo a ser utilizado na contabilização dos fenômenos hidrológicos através do modelo. Com base nisso, as datas de início e término de uma simulação são referenciadas a partir dos eventos registrados na estação hidrológica, apresentando, dessa forma, coerência com os períodos de duração das precipitações monitoradas na bacia.

Na definição dos intervalos de cálculo foi atribuído o tempo de 05 (cinco) minutos para a contabilização dos fenômenos de “runoff” tanto para os períodos em que se observa a ocorrência das precipitações como para os que não ocorrem. O tempo adotado para a avaliação da propagação dos fluxos e dos aspectos de qualidade da água de drenagem foi de 05 (cinco) segundos.

6.1.3. FATORES CLIMATOLÓGICOS

Quando se trata de localidades em que se verificam fenômenos hidrológicos envolvendo conjuntamente precipitação e o derretimento de neve, os parâmetros climatológicos apresentam-se como um importante fator para as questões relacionadas ao acúmulo e propagação de poluentes nesse meio, levando-se ainda em conta a influência na contribuição do escoamento superficial.

Tendo-se em vista que a área objeto de estudo não apresenta eventos hidrológicos desse tipo, os fatores climatológicos como a temperatura, velocidade dos ventos, acúmulo e derretimento de neve podem ser dispensados da inserção de dados. Tal omissão não

implica em qualquer interferência negativa nos resultados gerados pelo SWMM para a área de estudo.

6.1.4. PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

Os fatores hidrológicos do modelo envolvem a quantificação e caracterização de todas as subáreas e a inserção dos dados pluviométricos da bacia.

No processo de quantificação e caracterização de todas as subáreas da bacia, para o caso do trabalho em questionamento, são definidos valores para as seguintes propriedades:

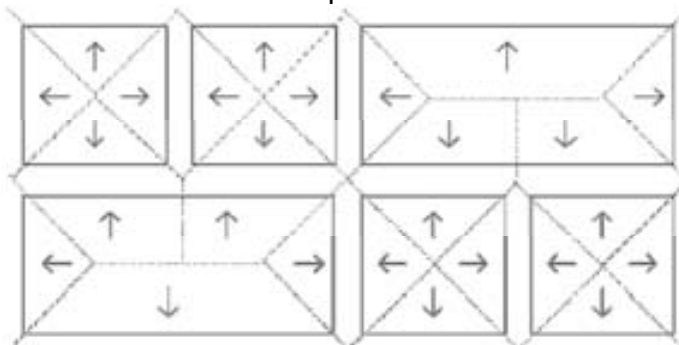
- Pluviógrafo associado;
- Nó de saída;
- Largura do escoamento;
- Declividade;
- Porcentagem de área impermeável;
- Número de Manning para a área impermeável;
- Número de Manning para a área permeável;
- Profundidade do armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis;
- Profundidade do armazenamento nas depressões das áreas permeáveis;
- Porcentagem da área impermeável sem armazenamento;
- Método de propagação do escoamento entre a área permeável e impermeável dentro da sub-bacia;
- Porcentagem do escoamento transferido entre as áreas dentro da sub-bacia;
- Escolha do método de infiltração e determinação dos respectivos parâmetros;

O nível de discretização adotado para a subdivisão da área da bacia seguiu de acordo com o conceito tradicional desenvolvido em projetos de micro drenagem, onde cada quadra em uma bacia urbana é dividida tomando-se como semelhança um telhado de 04 (quatro) águas. Cada uma dessas águas deve ser compreendida como áreas de contribuição, sendo, portanto, responsáveis pela formação e direcionamento dos deflúvios excedentes a um elemento de drenagem localizado nas vias públicas. De acordo com **POMPÊO (2001)**, na maior parte dos casos, as estimativas de vazões são realizadas em cruzamentos de ruas, considerados como pontos de análise da rede de drenagem, devendo-se, nessas condições, delimitar a área de contribuição a montante de cada um destes pontos de análise. Segundo o mesmo autor, para contornar a complexidade da

análise, adota-se que cada trecho de sarjeta receba as águas pluviais da quadra adjacente, exceto quando a topografia for muito acentuada, impossibilitando esta hipótese. A Figura 37 exemplifica o procedimento envolvido nesse conceito para delimitação das áreas de contribuição.

A subdivisão proposta pela Figura 37 permite criar uma sistematização para a quantificação das áreas contribuintes ao longo da bacia. Esse método foi empregado na subdivisão da área de estudo para a condição de utilização do modelo consagrado.

Figura 37 - Subdivisão das quadras em áreas contribuintes



FONTE: POMPÊO, 2001

Conforme já comentado anteriormente, os dados de precipitação são monitorados por um pluviógrafo acoplado a um datlogger estando esses localizados na estação hidrométrica da lagoa Mirassol – Cidade Jardim. Esses dados foram comparados com os registrados pela estação meteorológica do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – LARHISA da UFRN objetivando identificar variabilidades temporais dos eventos. Tal variabilidade não se mostrou significativa, ressaltando-se que a distância entre os pluviógrafos é inferior a 800m (oitocentos metros).

Valendo-se da condição de discretização estabelecida para a subdivisão da área de estudo, a Figura 38 apresenta uma imagem aérea da bacia tomada como alvo das avaliações. De acordo com essa imagem pode-se perceber com maiores detalhes as características do padrão de ocupação da área, sugerindo, dessa forma, um ambiente particularmente urbano e densamente ocupado por residências de padrão unifamiliar.

Figura 38 - Imagem aérea da bacia de estudo



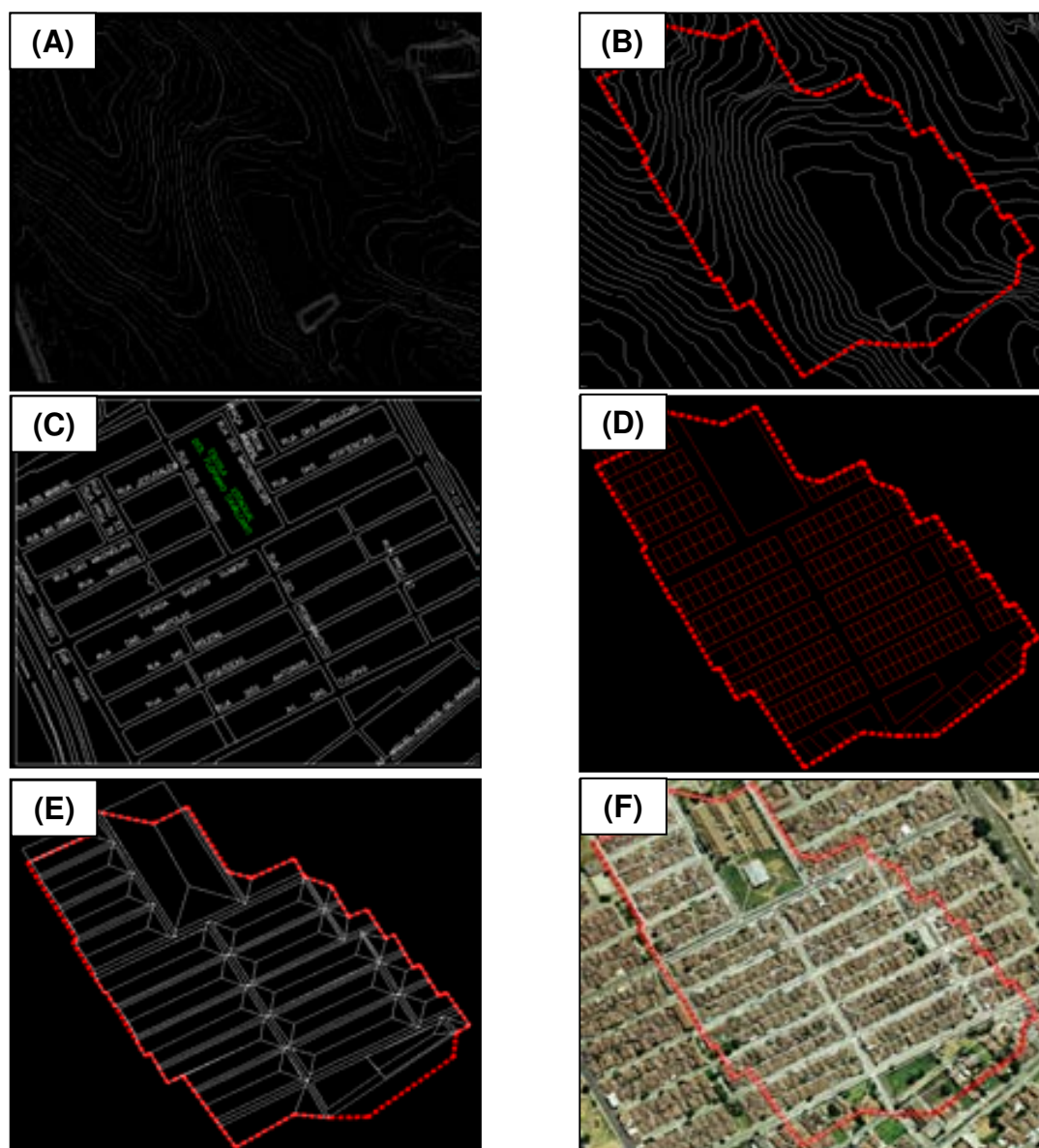
FONTE: Adaptado de GOOGLE

Para poder aplicar a atividade de discretização à bacia demonstrada na Figura 38, optou-se por uma sequência no levantamento das informações precedida pela utilização de software com ferramentas desenvolvidas para trabalhos com desenho em meio georreferenciado. Essa fase pode ser sucintamente explicada pelos itens discriminados abaixo:

- Obtenção das informações sobre a topografia do local (curvas de nível);
- Definição dos limites da área de estudo (traçado dos limites da bacia);
- Obtenção das informações sobre as disposições de lotes, quadras e arruamentos (arquivos em meio digital);
- Subdivisão da bacia em áreas contribuintes utilizando-se a proposta de discretização da bacia segundo as necessidades de utilização do modelo consagrado;

Evidentemente, os procedimentos elucidados anteriormente retratam na verdade uma metodologia de superposição de informações e técnicas. Para demonstrar melhor tal afirmação, pode-se recorrer a sequência demonstrada pela Figura 39.

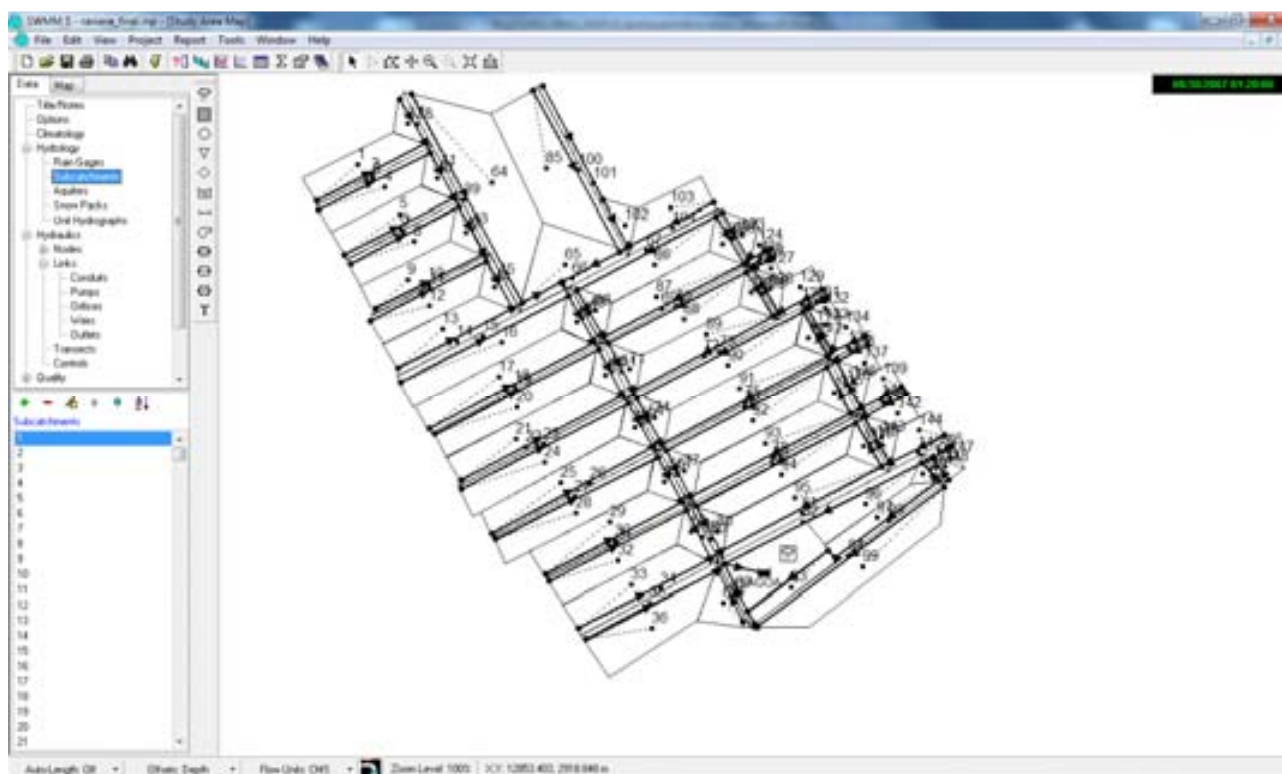
Figura 39 – Sequência para subdivisão da bacia de estudo. (A) Curvas de nível da bacia. (B) Traçado dos limites da bacia utilizando as curvas de nível. (C) Disposição das quadras e arruamentos na bacia. (D) Disposição dos lotes na bacia. (E) Discretização das áreas das quadras para formação das áreas contribuintes. (F) Resultado da subdivisão da bacia em áreas contribuintes



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Como resultado das aplicações das técnicas anteriores, foram geradas 148 (cento e quarenta e oito) subáreas. A Figura 40 mostra o resultado da discretização da bacia dentro do ambiente de trabalho do SWMM e a Tabela 14 apresenta a área em hectares para cada uma dessas subáreas.

Figura 40 – Resultado da discretização da bacia na interface de trabalho do SWMM



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 14 - Área em hectares das subáreas

Nº	ÁREA	Nº	ÁREA	Nº	ÁREA	Nº	ÁREA	Nº	ÁREA	Nº	ÁREA	Nº	ÁREA
1	0,1905	25	0,2857	49	0,0461	73	0,0511	97	0,1227	121	0,0093	145	0,0277
2	0,0387	26	0,0529	50	0,0211	74	0,0476	98	0,0323	122	0,0100	146	0,0133
3	0,0365	27	0,0506	51	0,0239	75	0,0535	99	0,3850	123	0,0474	147	0,0179
4	0,1910	28	0,2900	52	0,0444	76	0,0573	100	0,0645	124	0,0205	148	0,0209
5	0,1926	29	0,2571	53	0,0187	77	0,0459	101	0,0395	125	0,0067		
6	0,0372	30	0,0449	54	0,0209	78	0,0650	102	0,0504	126	0,0066		
7	0,0385	31	0,0376	55	0,0463	79	0,0539	103	0,1517	127	0,0182		
8	0,1919	32	0,2473	56	0,0209	80	0,0414	104	0,0544	128	0,0400		
9	0,1914	33	0,2545	57	0,0237	81	0,0847	105	0,0453	129	0,0732		
10	0,0362	34	0,0715	58	0,0480	82	0,1061	106	0,0156	130	0,0171		
11	0,0423	35	0,0686	59	0,0229	83	0,0997	107	0,0117	131	0,0081		
12	0,2097	36	0,3274	60	0,0231	84	0,0636	108	0,0449	132	0,0188		
13	0,2077	37	0,0420	61	0,0849	85	0,5172	109	0,0130	133	0,0419		
14	0,0673	38	0,0194	62	0,0198	86	0,2416	110	0,0112	134	0,0473		
15	0,0944	39	0,0842	63	0,0198	87	0,2371	111	0,0408	135	0,0135		
16	0,3185	40	0,0456	64	0,6887	88	0,2348	112	0,0074	136	0,0130		
17	0,3138	41	0,0185	65	0,2329	89	0,2323	113	0,0088	137	0,0413		
18	0,0510	42	0,0473	66	0,0590	90	0,2821	114	0,0454	138	0,0477		
19	0,0505	43	0,0212	67	0,0607	91	0,2802	115	0,0209	139	0,0593		
20	0,2912	44	0,0455	68	0,0467	92	0,2690	116	0,0184	140	0,0151		
21	0,3063	45	0,0247	69	0,0461	93	0,2642	117	0,0462	141	0,0137		
22	0,0560	46	0,0482	70	0,0394	94	0,2800	118	0,0192	142	0,0618		
23	0,0512	47	0,0214	71	0,0470	95	0,2742	119	0,0186	143	0,0484		
24	0,3206	48	0,0220	72	0,0424	96	0,1583	120	0,0206	144	0,0862		

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Como forma de auxiliar a extração das demais propriedades das subáreas criadas, atividades de desenho e de geoprocessamento foram empregadas na elaboração de mapas dos quais valores quantitativos de tais propriedades podem ser retirados. Um exemplo para esse caso pode ser explicitado pelo mapa da Figura 42. Através desse mapa áreas de interesse foram separadas no intuito de avaliar as condições de impermeabilidade da bacia. A Tabela 15 informa os valores encontrados para as áreas das superfícies de acordo com os locais de interesse selecionados.

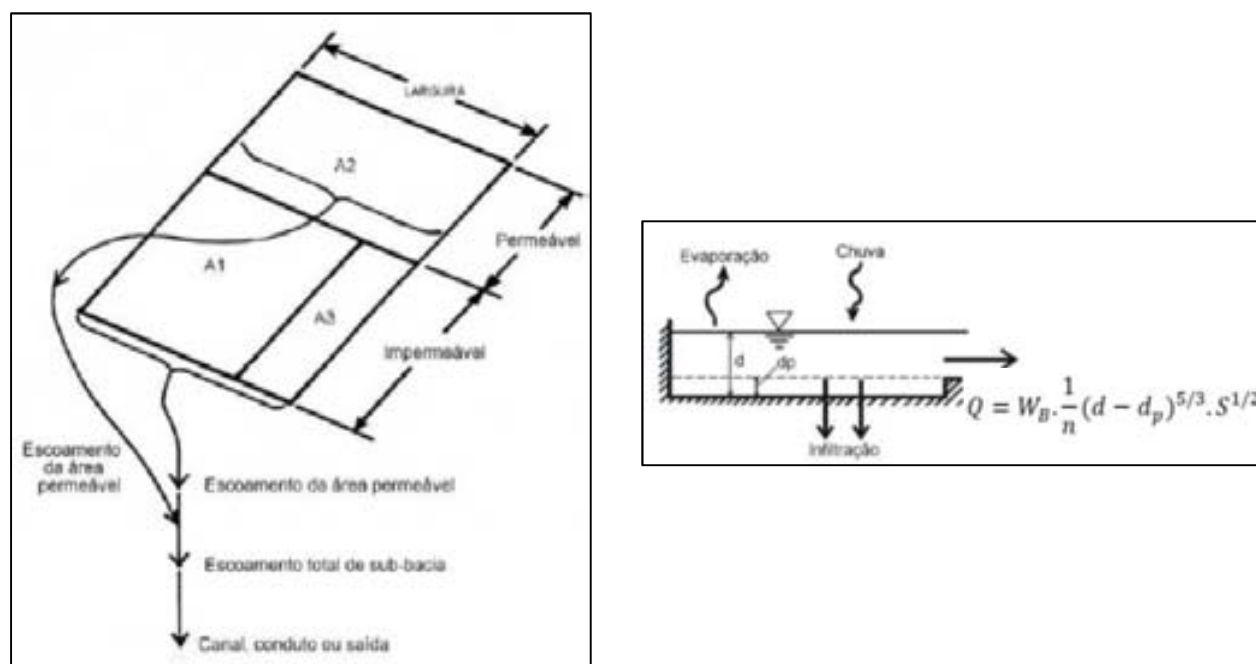
Tabela 15 - Área em metros quadrados para os locais de interesse selecionados

SUPERFÍCIE	ÁREA (m ²)	% DA ÁREA DA BACIA
QUADRAS E LOTES	85.856,59	60,93
CALÇAMENTO	31.904,36	22,64
ASFALTO	4.581,04	3,25
TERRENO NATURAL	3.452,45	2,45
ESCOLA	12.983,84	9,21
LAGOA DE DRENAGEM	2.142,56	1,52
TOTAL	140.920,85	100

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Um parâmetro importante na caracterização das subáreas é a definição da largura do escoamento. Essa informação é empregada pelo SWMM no cálculo do escoamento superficial considerando um reservatório não linear. A Figura 41 demonstra como o SWMM considera as subáreas da bacia e o equacionamento desenvolvido para contabilizar o escoamento superficial nessas áreas.

Figura 41 – Sistemática de cálculo do escoamento superficial através do SWMM



FONTE: Adaptado de GARCIA, 2005

É importante ressaltar que para equacionamento encontrado na Figura 41 os parâmetros possuem o seguinte significado:

- W_B = largura da sub-bacia (m);
- n = coeficiente de rugosidade de Manning ($m^{-1/3}.s$);
- d = profundidade da água no reservatório (m);
- d_p = profundidade do armazenamento (m);
- S = declividade da sub-bacia (m/m);

O valor de “ W_B ” (largura da sub-bacia) pode ser encontrado pelo resultado da divisão entre a área da sub-bacia e o maior comprimento de fluxo, sendo esse representado pela medida entre o exutório e o vértice mais distante da área. A Tabela 17 demonstra a largura do escoamento encontrada pelo emprego dessa metodologia para todas as sub-bacias.

Tabela 16 – Resultado da largura do escoamento para cada sub-bacia

Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)	Nº	W_B (m)
1	19,34	25	19,50	49	10,72	73	3,31	97	11,58	121	3,51	145	5,45
2	3,74	26	3,48	50	4,50	74	10,99	98	3,08	122	3,31	146	6,42
3	3,46	27	3,33	51	5,04	75	3,53	99	20,33	123	10,55	147	8,53
4	19,30	28	20,03	52	10,61	76	3,77	100	4,32	124	6,88	148	7,05
5	19,95	29	20,62	53	4,05	77	10,71	101	2,64	125	3,46		
6	3,62	30	3,46	54	4,47	78	4,32	102	11,21	126	3,36		
7	3,68	31	2,90	55	10,66	79	3,55	103	19,84	127	6,70		
8	19,50	32	20,10	56	4,44	80	9,98	104	6,60	128	9,38		
9	19,86	33	21,20	57	5,01	81	5,64	105	10,11	129	15,56		
10	3,49	34	5,70	58	10,72	82	5,76	106	3,24	130	4,00		
11	3,80	35	5,50	59	4,53	83	11,96	107	2,50	131	3,89		
12	19,83	36	27,32	60	4,80	84	3,30	108	10,31	132	6,72		
13	20,06	37	9,80	61	17,48	85	35,28	109	2,75	133	10,14		
14	6,07	38	4,23	62	3,67	86	19,30	110	2,39	134	12,30		
15	5,92	39	4,12	63	3,69	87	18,97	111	9,87	135	4,48		
16	20,80	40	10,58	64	36,06	88	18,48	112	1,65	136	4,11		
17	20,91	41	3,99	65	26,09	89	18,69	113	1,92	137	11,19		
18	3,24	42	10,74	66	11,96	90	18,88	114	10,51	138	11,20		
19	3,28	43	4,47	67	4,61	91	18,62	115	4,47	139	13,27		
20	19,77	44	10,40	68	10,48	92	18,53	116	3,94	140	3,83		
21	20,99	45	4,92	69	3,54	93	18,31	117	10,41	141	3,49		
22	3,68	46	10,85	70	3,03	94	18,96	118	3,85	142	13,72		
23	3,24	47	4,49	71	10,68	95	18,87	119	3,73	143	10,94		
24	21,12	48	4,61	72	3,24	96	15,33	120	8,62	144	16,00		

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Observando mais atentamente o mapa da Figura 42 é possível perceber uma condição de alto nível de impermeabilização das superfícies. Tomando alguns lotes como exemplo e estabelecendo uma relação entre a área de telhado e a área do lote, verifica-se que esse quociente, para a maioria dos casos, indica um percentual de aproximadamente 80%. Esse percentual pode ser agravado se considerados, em alguns casos, os fatores de impermeabilização das áreas de corredor e recuos da frente e fundo do lote. O valor diagnosticado por esse quociente, diante da utilização do SWMM, foi empregado nas estimativas iniciais do percentual de área impermeável para cada uma das subáreas na bacia.

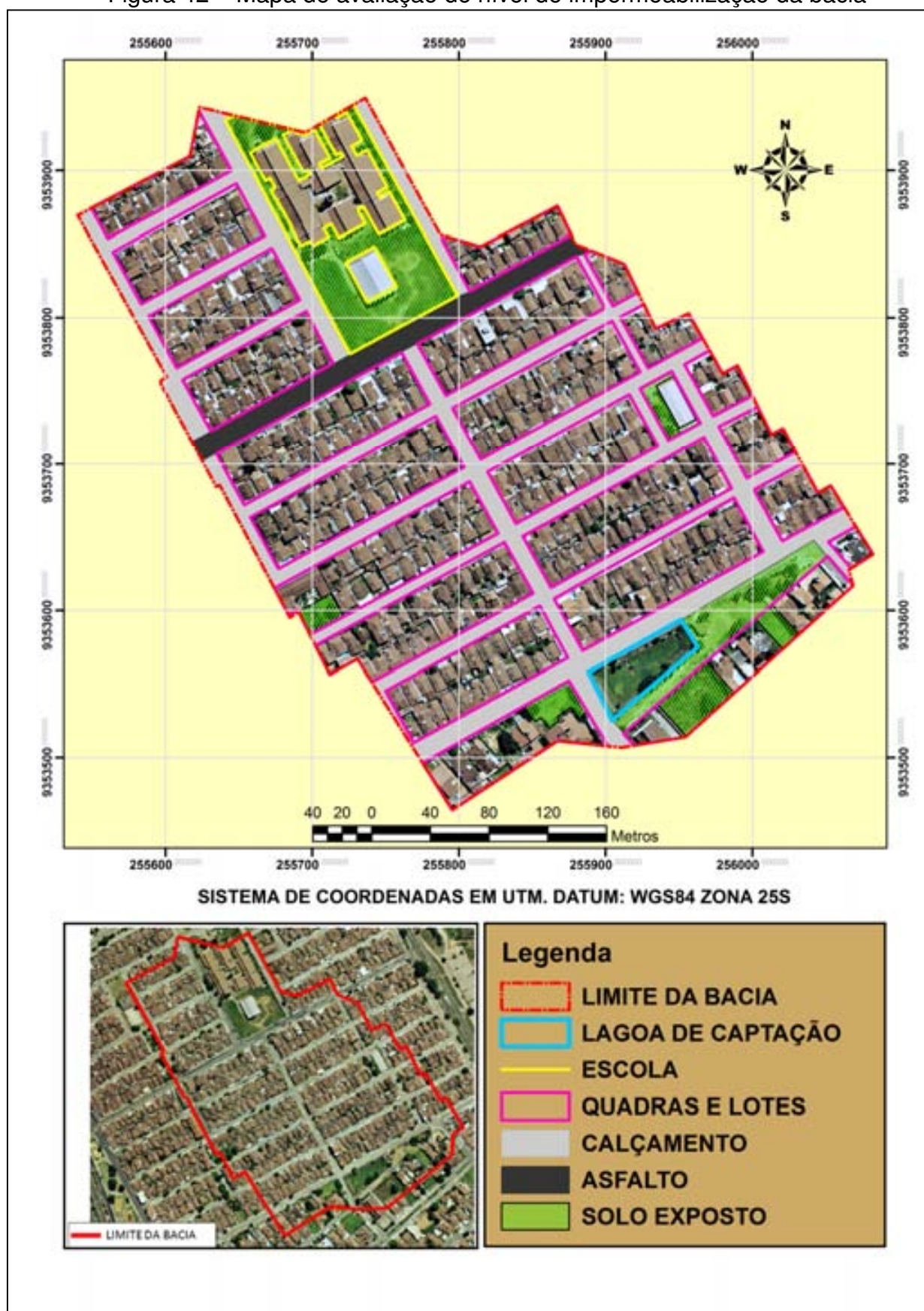
Para poder facilitar posteriormente o processo de calibração e validação do modelo, as 148 (cento e quarenta e oito) sub-bacias foram agrupadas em quatro categorias, sendo esse resultado apresentado conforme a Tabela 17. É importante ressaltar que na área da escola (ver Figura 40 e Figura 42) adotaram-se índices de 50% e 20% de área impermeável.

Tabela 17 - Resultado da classificação e padronização das subáreas da bacia

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95
RESIDÊNCIAL (PADRÃO 1)	66	80
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 42 – Mapa de avaliação do nível de impermeabilização da bacia



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Utilizando os resultados do geoprocessamento e das demais atividades de desenho em ambiente georreferenciado, extraiu-se a declividade média para cada área discretizada da bacia. Os valores de declividade média por sub-bacia estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado da declividade média por subárea

SUBÁREA	I (%)*	SUBÁREA	I (%)*	SUBÁREA	I (%)*	SUBÁREA	I (%)*	SUBÁREA	I (%)*
1	4,004	31	6,380	61	6,166	91	1,313	121	2,425
2	5,004	32	6,380	62	2,055	92	1,351	122	2,200
3	4,898	33	6,552	63	2,398	93	2,057	123	2,288
4	5,878	34	6,552	64	6,214	94	2,031	124	2,600
5	7,125	35	6,585	65	1,883	95	2,046	125	2,600
6	8,143	36	6,585	66	5,649	96	4,487	126	2,602
7	7,985	37	4,814	67	1,564	97	4,761	127	2,602
8	7,985	38	7,221	68	1,944	98	4,761	128	2,321
9	9,021	39	1,036	69	2,356	99	2,640	129	1,180
10	8,019	40	4,637	70	2,361	100	5,358	130	1,180
11	7,499	41	9,274	71	0,100	101	6,695	131	2,426
12	7,499	42	4,478	72	1,560	102	8,894	132	2,426
13	8,517	43	6,717	73	1,308	103	2,523	133	1,210
14	8,517	44	4,572	74	0,100	104	2,523	134	1,660
15	8,494	45	4,572	75	1,313	105	2,234	135	1,660
16	8,494	46	2,252	76	1,351	106	2,234	136	1,610
17	8,476	47	2,252	77	0,100	107	2,288	137	1,610
18	7,824	48	1,944	78	2,057	108	2,292	138	1,177
19	7,998	49	1,419	79	2,031	109	2,292	139	1,272
20	7,331	50	0,100	80	0,100	110	2,321	140	1,650
21	8,136	51	0,100	81	2,728	111	1,209	141	1,274
22	7,458	52	2,392	82	2,766	112	1,209	142	1,274
23	7,151	53	0,100	83	0,100	113	1,201	143	1,131
24	7,151	54	0,100	84	0,100	114	1,157	144	1,993
25	6,740	55	1,426	85	6,029	115	1,157	145	1,993
26	6,740	56	0,100	86	2,345	116	1,177	146	0,999
27	6,764	57	0,100	87	2,356	117	2,253	147	0,999
28	6,764	58	2,232	88	2,361	118	1,127	148	0,880
29	7,149	59	0,100	89	1,560	119	1,131		
30	6,355	60	0,100	90	1,308	120	4,851		

I representa a declividade média da subárea em %*

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A determinação dos demais parâmetros bem como dos métodos que caracterizam os processos hidrológicos-hidráulicos nas subáreas foram obtidos com base em algumas considerações sobre conhecimentos de particularidades da área de estudo. Tais considerações levam em conta as constatações visuais e experiências adquiridas durante as fases de trabalho com a bacia piloto. Essas experiências permitiram diagnosticar determinadas especificidades na ocupação dos lotes que justificam a escolha de metodologias como é o caso, por exemplo, do processo de transferência dos deflúvios

superficiais entre as áreas permeáveis e impermeáveis dentro de cada área discretizada. Em linhas gerais, o SWMM necessita que o usuário informe a maneira pela qual os escoamentos originados nas subáreas são transferidos internamente entre a parcela permeável e as impermeáveis. O direcionamento dos escoamentos no interior das subáreas pode ocorrer, diante das possibilidades de uso do SWMM, de acordo com as formas propostas adiante:

- “Imperv” → o escoamento superficial flui da área permeável para a impermeável;
- “Perv” → o escoamento superficial flui da área impermeável para a permeável;
- “Outlet” → o escoamento superficial de ambas as áreas flui diretamente a tomada de água;

A proposta escolhida leva em conta o fato de que para as áreas das quadras o que se observa comumente, no contexto da bacia em estudo, é o emprego de calhas que conectam, diretamente, parcelas da área do telhado das residências às vias públicas. Em função dessa constatação, tais sub-bacias foram inseridas na condição do método “PERV” onde o total dos deflúvios gerados na área impermeável só é repassado em 40% para a área permeável, sendo esse percentual expresso pelo parâmetro “PERCENT ROUTED” no SWMM. A Tabela 19 apresenta o resultado dos métodos selecionados para caracterizar o processo de transferência dos deflúvios dentro das subáreas.

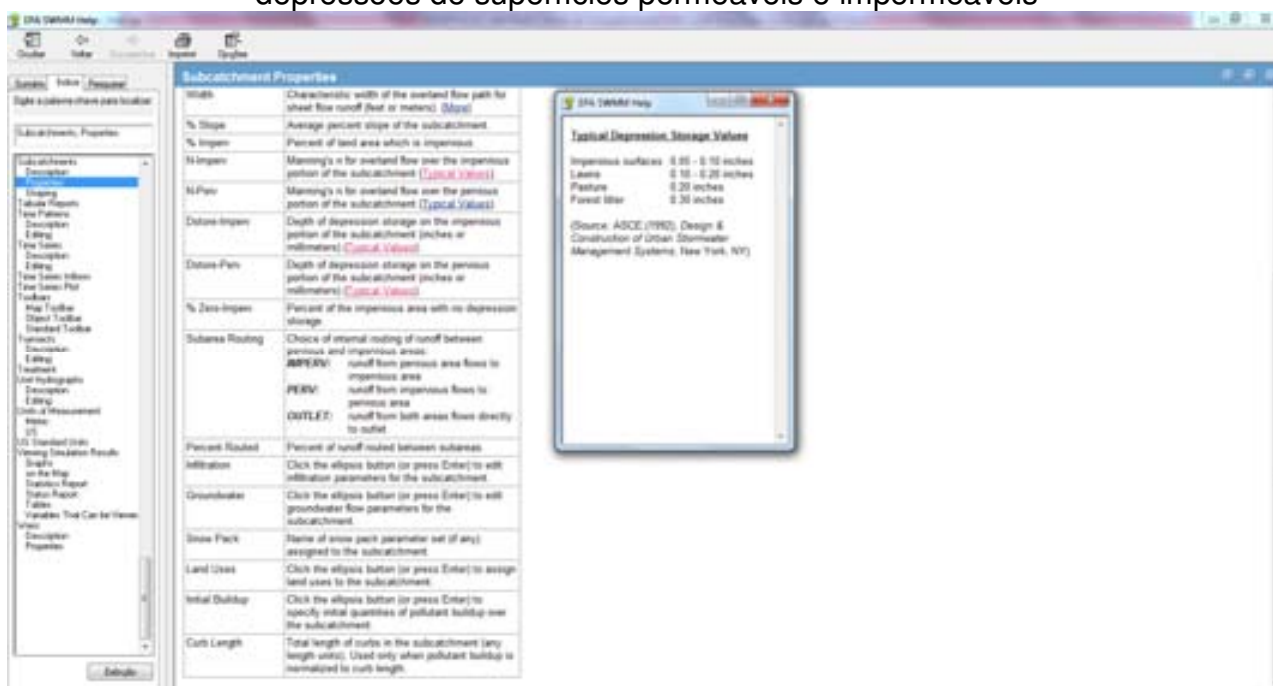
Tabela 19 – Resultado da seleção dos métodos de transferência interna dos deflúvios por tipo de subárea

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA	% TRANSFERIDA
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	OUTLET	100
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	OUTLET	100
RESIDENCIAL (PADRÃO 1)	66	PERV	40
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	PERV	40

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Finalmente, para que se possa concluir o processo de caracterização das subáreas é necessário informar a altura das depressões capazes de armazenar lâminas de escoamento em áreas permeáveis e impermeáveis. Essas lâminas são contabilizadas no cálculo do escoamento superficial de acordo com o que foi mostrado através equacionamento proposto pela Figura 41. Para o caso da bacia em estudo, valores iniciais foram tomados com base nos quadros da Figura 43, sendo esses sugeridos pelo próprio SWMM. Maiores detalhes sobre o resultado desses parâmetros podem ser obtidos no item de calibração do modelo.

Figura 43 – Valores sugeridos pelo SWMM para a profundidade de armazenamento nas depressões de superfícies permeáveis e impermeáveis



FONTE: ROESNER, L. A. *et al.*, 1988

6.1.5. PARÂMETROS HIDRÁULICOS

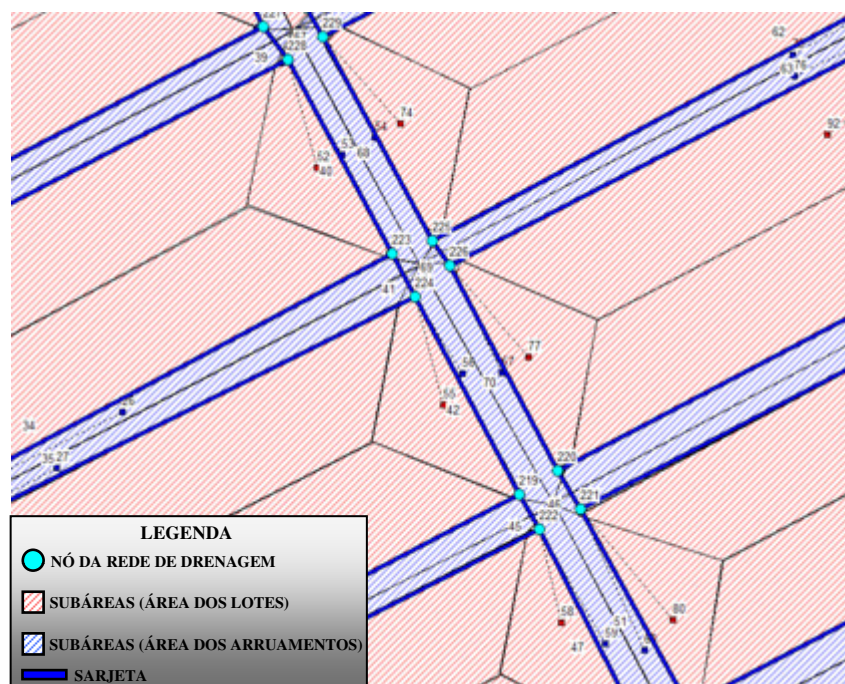
O ajuste dos parâmetros hidráulicos implica na definição dos nós da rede de drenagem, entendidos como junções pelo SWMM, identificação dos elementos responsáveis pela condução do escoamento superficial (sarjetas, galerias, entre outros) e a caracterização de estruturas de armazenamento/detenção existentes na bacia como, por exemplo, lagoas de retenção/infiltração.

Os condutos podem apresentar diversas seções aceitas pelo modelo ou uma seção representativa elaborada pelo usuário. Uma importante definição é a caracterização da superfície de escoamento através dos coeficientes de rugosidade e perda de carga. Para tanto, recorreu-se a uma avaliação entre os valores sugeridos pelo SWMM e os apresentados em **PORTO (2004)**.

É importante ressaltar que para a bacia em análise não está sendo considerada contribuição de vazões afluentes aos nós que não seja as geradas em função das descargas de escoamento superficial pertinente a própria área. Essa é uma possibilidade passiva de utilização dentro do ambiente de trabalho do modelo que não foi utilizada em virtude das características locais. **GREGORY e WALLING (1976)** e **CEDERGREN (1980)** relatam que essas vazões afluentes são originadas, por exemplo, pela presença do lençol freático em afloramento.

Os nós da rede de drenagem foram criados no início e no fim dos elementos de condução do escoamento superficial para possibilitar a ligação entre os mesmos e a sua mudança de direção, declividade ou seção transversal. Tais ligações ocorrem principalmente nos limites da bacia e no cruzamento dos arruamentos. A Figura 44 expõe um exemplo das conexões estabelecidas entre as subáreas, sarjetas e nós da rede drenagem.

Figura 44 – Caracterização das subáreas, sarjetas e nós da rede



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Levando-se em conta que a bacia piloto apresenta uma condição onde a propagação dos escoamentos ocorre eminentemente de forma superficial, foi preciso inserir um total de 107 (cento e sete) nós e 111 (cento e onze) condutos para a devida caracterização da rede de drenagem da bacia. Na Tabela 20 pode-se observar o nome e a respectiva cota de elevação para cada um dos nós estabelecidos na definição da rede de drenagem através do SWMM. De todos os condutos criados apenas 01 (um) representa a galeria de concreto localizada na entrada da lagoa de captação da bacia, os demais foram designados para funcionar como uma sarjeta na qual a seção transversal está apresentada Figura 45.

Tabela 20 – Cota dos nós da rede de drenagem da bacia

Nº	COTA(m)	Nº	COTA(m)	Nº	COTA(m)	Nº	COTA(m)	Nº	COTA(m)
150	59,03	176	45,43	202	45,00	228	40,82	254	44,61
151	58,21	177	43,96	203	46,22	229	40,95	255	45,00
152	56,51	178	44,13	204	46,31	230	40,97	256	46,12
153	55,81	179	43,85	205	46,10	231	41,36		
154	61,00	180	43,99	206	45,79	232	41,13		
155	61,00	181	44,32	207	46,12	233	41,19		
156	52,49	182	44,13	208	46,27	234	41,15		
157	52,09	183	42,89	209	46,10	235	56,19		
158	60,24	184	43,10	210	42,00	236	56,11		
159	60,15	185	42,69	211	42,50	237	53,82		
160	58,21	186	42,69	212	42,10	238	53,56		
161	58,20	187	43,25	213	41,69	239	52,32		
162	49,73	188	43,00	214	42,46	240	52,27		
163	49,44	189	42,86	215	40,14	241	50,89		
164	47,24	190	42,84	216	40,10	242	50,71		
165	46,42	191	42,87	217	40,06	243	49,54		
166	42,60	192	42,88	218	40,09	244	49,46		
167	42,52	193	43,00	219	40,34	245	46,49		
168	43,00	194	43,00	220	40,57	246	49,57		
169	51,56	195	44,33	221	40,54	247	45,49		
170	51,01	196	44,49	222	40,32	248	43,85		
171	47,79	197	44,60	223	40,65	249	43,99		
172	43,85	198	44,43	224	40,62	250	42,86		
173	43,98	199	44,59	225	40,78	251	42,88		
174	45,66	200	44,89	226	40,74	252	44,33		
175	45,49	201	44,61	227	40,85	253	44,43		

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A representação da seção transversal da sarjeta foi obtida considerando-se os seguintes fatores:

- Largura média dos arruamentos;
- Número e dimensões das faixas de rolamento;
- Identificação das condições do tráfego local;
- Classificação das vias de acordo com as condições de tráfego local;

A existência de canteiro central e o espaço destinado ao passeio também são ponderados.

A Tabela 21 e a Tabela 22 foram utilizadas para a classificação e caracterização dos arruamentos existentes na bacia.

Tabela 21 - Parâmetros de classificação das vias

TIPO	SECUNDÁRIA	PRINCIPAL	AVENIDA	EXPRESSA
FUNÇÃO	Tráfego local	Coletar e distribuir o tráfego	Trânsito rápido e desimpedido através da cidade	Limitação de fluxos no perímetro urbano
FAIXAS DE TRÂNSITO	Duas	Duas a quatro	Quatro a seis faixas	Quatro a seis faixas
ESTACIONAMENTO	Sim	Nem sempre	Não é permitido	Acostamento sinalizado
SINALIZAÇÃO	Placas	Placas e semáforos	Placas e semáforos	Placas
VELOCIDADE MÁXIMA	30 A 40 Km/h	40 A 60 Km/h	60Km/h	80 Km/h
INUNDAÇÃO MÁXIMA	Até a crista da rua	Preservar uma faixa de trânsito	Preservar uma faixa de trânsito em cada direção	Nenhuma ou somente na largura da sarjeta

FONTE: MOREIRA, 2007

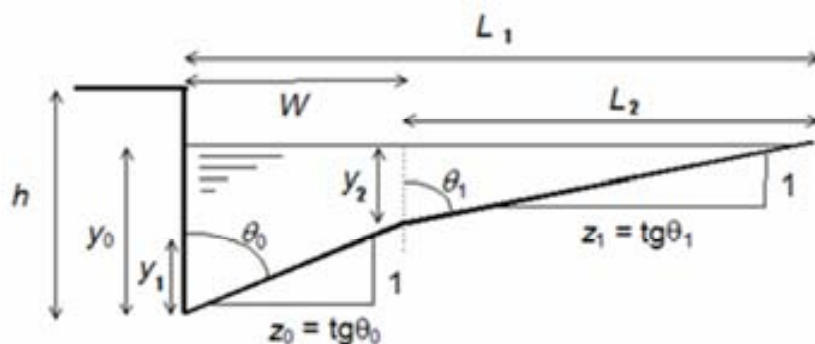
Tabela 22 - Dimensões mínimas para vagas de estacionamento e faixas de rolamento

TIPOS DE VEÍCULOS	FAIXA ELEMENTAR (m)	
	ESTACIONAMENTO	TRÂNSITO
LEVES	2,50	3,00
CAMINHÕES E ÔNIBUS COM VELOCIDADE CONTROLADA	3,00	3,50
CAMINHÕES E ÔNIBUS PARA TRÁFEGO INTENSO E VELOCIDADE LIVRE	3,00	3,75

FONTE: MOREIRA, 2007

Constatou-se que todos os arruamentos da área da bacia apresentam classificação secundária, com observação primordialmente do tráfego local, permitindo por decorrência, que o nível de inundação máxima se dê até a crista da rua. Diante de tais condições, foi gerada no modelo de simulação uma sarjeta com seção mista. A Figura 45 apresenta os parâmetros utilizados para a definição da seção transversal de uma sarjeta do tipo mista.

Figura 45 – Seção transversal de uma sarjeta do tipo mista



FONTE: MOREIRA, 2007

Sendo:

- W: largura da sarjeta, em metros;
- L_1 e L_2 : largura dos escoamentos, em metros;
- y_0, y_1, y_2 : lâmina d'água, em metros;
- h: altura do meio-fio, em metros;
- z_0 : declividade transversal da sarjeta;
- z_1 : declividade do pavimento (abaulamento);

De acordo com **MOREIRA (2007)**, o valor máximo para a profundidade da sarjeta e sua largura, representados, respectivamente, pela letra “h” e “W” na Figura 45 não devem ultrapassar o total de 0,15m e 0,60m. A declividade longitudinal mínima deve ser estabelecida em 0,4% (0,004m/m).

Os valores adotados para a sarjeta no modelo de simulação, segundo cada um dos componentes caracterizados na Figura 45, estão devidamente especificados de acordo com a Tabela 23.

Tabela 23 - Dimensões adotadas para a seção transversal da sarjeta no modelo SWMM

LARGURA DA VIA (m)	LARGURA DO PASSEIO (m)	LARGURA DO CANTEIRO (m)	FAIXA A PRESERVAR (m)	W (m)
10	1,5	0	0	0,6
LARGURA L_1 (m)	LARGURA L_2 (m)	ALTURA y_1 (m)	ALTURA y_2 (m)	INCLINAÇÃO (%)
3,50	2,90	0,03	0,058	2
$z_0 = \text{tg}\theta_0$	$z_1 = \text{tg}\theta_1$	ALTURA y_0 (m)	ÁREA (m ²)	
20	50	0,088	0,128	

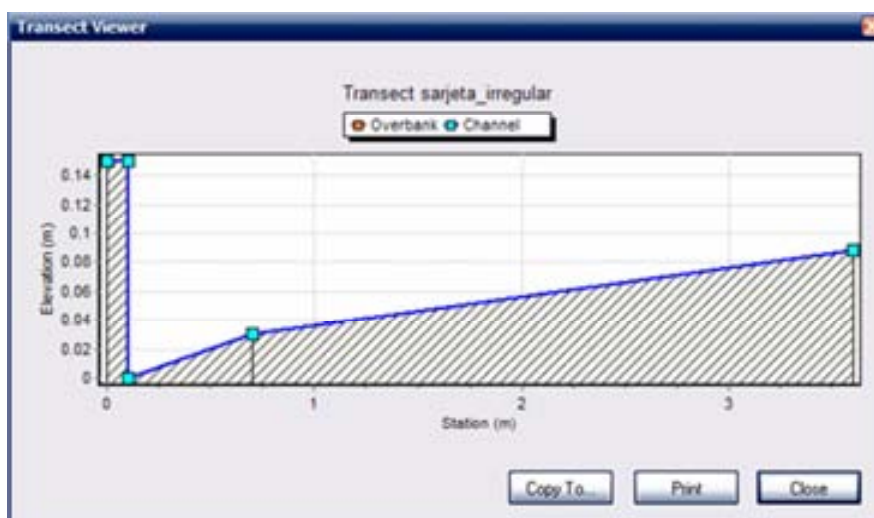
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O número de Manning escolhido para caracterizar a rugosidade das sarjetas foi de $0,017 \text{ (m}^{-1/3} \cdot \text{s)}$, tomando-se como base o que se observa para o concreto rugoso.

A Figura 46 expõe a configuração final da seção transversal representativa da sarjeta segundo o modelo de simulação. A

Tabela 24 demonstra alguns atributos das sarjetas adquiridos em função dos trabalhos desenvolvidos no ambiente do SWMM.

Figura 46 – Seção transversal da sarjeta (visualização na interface do SWMM)



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 24 – Número de condutos criados para a representação da rede de drenagem através do SWMM

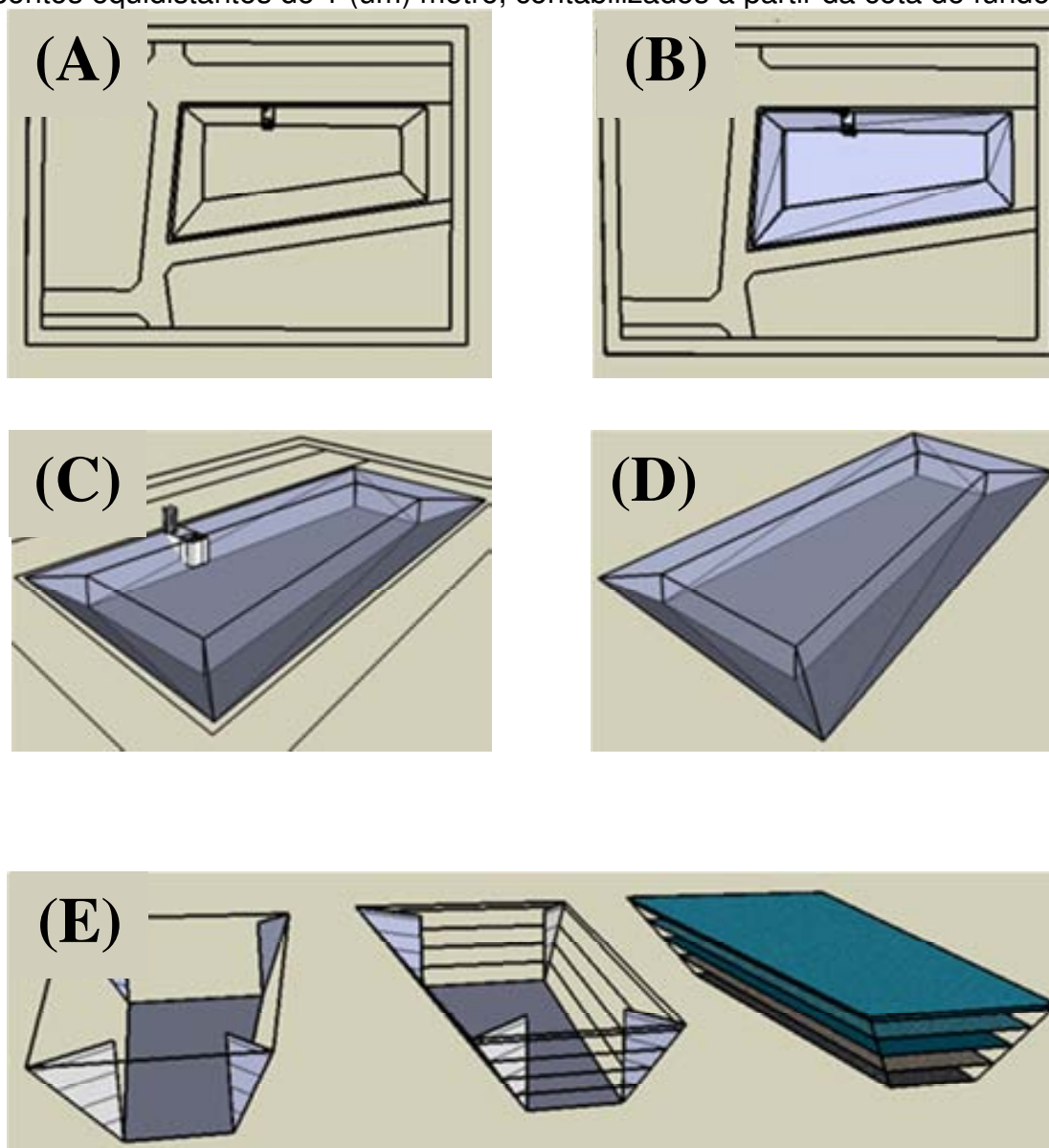
Nº	NÓ DE MONTANTE	NÓ DE JUSANTE	COMPRIMENTO	Nº	NÓ DE MONTANTE	NÓ DE JUSANTE	COMPRIMENTO
1	150	152	41,55	61	185	229	152,93
2	152	153	7,16	62	189	225	152,32
3	154	152	99,91	63	190	226	147,98
4	155	153	102,07	64	167	233	51,44
5	153	156	43,13	65	233	234	6,03
6	156	157	6,499	66	234	230	43,94
7	158	156	98,24	67	230	229	6,18
8	159	157	100,18	68	229	225	43,29
9	157	162	44,66	69	225	226	7,43
10	160	162	99,76	70	226	220	42,83
11	162	163	6,49	71	195	220	145,81
12	161	163	106,67	72	196	221	147,71
13	163	164	43,74	73	201	216	146,62
14	164	165	9,57	74	206	217	180,78
15	151	165	193,11	75	203	202	50,17
16	165	168	36,14	76	204	205	20,01
17	168	166	11,81	77	254	196	44,38
19	235	164	105,67	78	255	197	44,22
20	236	166	153,04	79	198	195	6,68
21	169	172	149,29	80	197	196	7,04

Nº	NÓ DE MONTANTE	NÓ DE JUSANTE	COMPRIMENTO	Nº	NÓ DE MONTANTE	NÓ DE JUSANTE	COMPRIMENTO
22	170	171	104,55	81	172	168	53,11
23	171	173	44,97	82	243	219	125,89
24	173	172	6,98	83	244	222	125,39
25	174	173	79,28	84	187	184	42,38
26	247	177	44,76	85	188	186	20,61
27	176	178	43,70	86	193	192	30,12
28	181	178	19,23	87	194	191	31,05
29	182	180	19,21	88	199	198	39,31
30	237	231	153,38	89	200	197	39,24
31	238	232	150,04	90	180	179	6,39
32	239	227	147,49	91	178	177	6,53
33	240	228	153,82	92	248	183	43,63
34	241	223	148,36	93	249	184	43,08
35	242	224	147,84	94	184	183	5,03
36	166	231	44,40	95	186	185	3,19
37	231	232	6,46	96	250	185	41,37
38	232	227	44,47	97	251	186	41,32
39	227	228	7,66	99	191	190	8,63
40	228	223	41,81	100	252	190	43,22
41	223	224	8,07	101	253	191	42,48
42	224	219	46,46	102	202	201	7,41
45	219	222	5,82	103	205	206	7,37
46	220	221	9,26	104	256	206	20,61
47	222	215	44,80	105	208	205	22,72
48	215	216	10,17	106	207	211	105,01
49	216	217	12,43	107	211	210	9,49
50	218	217	6,75	108	209	212	189,39
51	221	216	41,56	109	210	213	89,13
53	245	215	122,10	110	217	149	2,00
54	246	218	121,48	111	212	213	19,59
55	214	218	48,65	112	192	189	4,85
56	213	217	41,70				
57	175	167	127,91				
58	177	233	127,36				
59	179	234	127,08				
60	183	230	128,24				

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O último elemento trabalhado na inserção dos componentes hidráulicos foi a implementação da lagoa de detenção/infiltração existente no exutório. Para caracterização da lagoa foi necessário realizar uma tabulação, correlacionando profundidades com as respectivas áreas de superfície. A Figura 47 retrata o procedimento adotado na elaboração da tabulação.

Figura 47 – Esquema para tabulação da lagoa de retenção/infiltração. (A) Exportação da planta baixa da lagoa para o programa de modelagem em 3D. (B), (C) e (D) Sequência para configuração da lagoa nas três dimensões. (E) As figuras da esquerda para a direita representam o procedimento executado para a obtenção da área da superfície da lagoa, para pontos equidistantes de 1 (um) metro, contabilizados a partir da cota de fundo



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A partir da metodologia apresentada pela Figura 47, retirou-se os dados de tabulação da lagoa de retenção/infiltração (Tabela 25) correlacionando profundidades e as áreas de superfície.

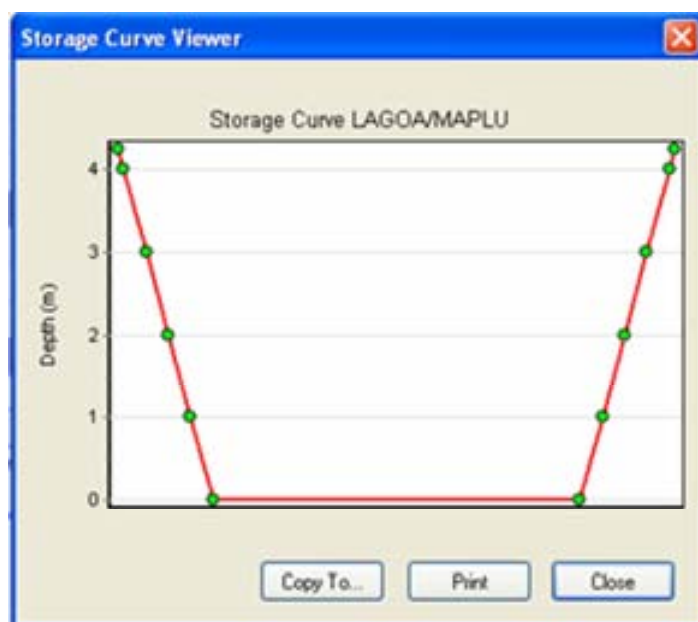
Tabela 25 - Valores para tabulação da lagoa de retenção/infiltração

PROFUNDIDADE	ÁREA DA SUPERFÍCIE (m ²)
0	1.195,98
1	1.519,57
2	1.870,19
3	2.250,01
4	2.662,14
4,25	2.772,98

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A Figura 48 expõe o resultado gerado no SWMM para a curva de armazenamento. Tal curva foi elaborada através da inserção dos dados apresentados na Tabela 25 no ambiente do modelo de simulação. Deve-se ressaltar que o objetivo da inserção da lagoa de captação no trabalho em questionamento, em função dos aspectos de simulação no SWMM, é a de fornecer subsídio para as avaliações dos aspectos quantitativos e, de maneira preliminar, das questões de qualidade das águas de drenagem.

Figura 48 - Resultado da tabulação no modelo de simulação



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

6.1.6. PARÂMETROS DE QUALIDADE E USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O trabalho com os aspectos de qualidade é definido pela caracterização do(s) poluente(s) e de sua área de ocorrência segundo duas situações distintas. Para a primeira situação deve-se informar os parâmetros que evidenciem o acúmulo do poluente em

momentos em que não se verifica a ocorrência de precipitação, ou seja, os poluentes existentes nas superfícies e no ar atmosférico são continuamente depositados nesses meios originando o que se entende por “deposição seca”. Na segunda situação temos a caracterização da lavagem desses poluentes para os períodos de chuva, em outras palavras, a chuva realiza uma lavagem dos poluentes depositados nas superfícies bem como dos que estiverem em meio atmosférico, fato que pode ser compreendido como a “deposição úmida”.

Em virtude das características dos trabalhos de qualidade com o SWMM, a avaliação qualitativa será efetuada através da escolha e ajustes dos parâmetros e equacionamentos para os eventos de deposição seca e deposição úmida. Tais considerações são elaboradas conforme descrição apresentada em sequência.

6.1.6.1. CARACTERIZAÇÃO DO POLUENTE

Para caracterizar o(s) poluentes(s) nessa fase utiliza-se o “editor do poluente” do SWMM, fazendo-se a identificação desses segundo as necessidades da modelagem e de acordo com os itens apresentados em sequência:

- Nome do poluente: para o presente estudo foi selecionada a DQO (demanda química de oxigênio) como elemento de análise;
- Definição das unidades de concentração: o poluente escolhido foi trabalhado na unidade de mg/L (miligramas por litro);
- Especificação da concentração do poluente na água de chuva, água subterrânea ou outro processo de contribuição caso seja necessário: no trabalho em questionamento não foi adotado concentração do poluente na água de chuva;
- Especificação do poluente na água subterrânea: pela desconsideração das contribuições subterrâneas no estudo, esse item permanece com o valor 0 (zero);
- Especificação do coeficiente de deterioração para expressar o decaimento do poluente de acordo com o tempo: o coeficiente de decaimento especificado para a DQO foi de 0 (zero) dias⁻¹. Tal coeficiente indica que não existe degradação da DQO ao longo do tempo em períodos secos;
- Especificação da existência de co-poluente cuja concentração contribua para a concentração do escoamento do poluente atual: não se caracterizou a contribuição da DQO por parte de outros poluentes;

6.1.6.2. CARACTERIZAÇÃO DO USO DO SOLO

Após a caracterização do(s) poluente(s) é preciso implementar as condições de uso de terra através do “editor de uso de terra”. Tais condições refletem a maneira com que as áreas dentro da bacia são utilizadas ou manejadas. É nessa fase que os parâmetros para a correta identificação da “deposição úmida” e da “deposição seca” devem ser apresentados. A metodologia para a caracterização do uso de terra segue através da descrição dos itens apresentados abaixo:

- Nome dado para identificação do uso de terra: nesse caso adotou-se o nome “RESIDENCIAL” como sendo o agente identificador do uso de terra para todas as subáreas da bacia;
- Descrição: caso seja necessário pode ser feito um comentário para as condições de uso de terra;
- Práticas de limpeza pública:
 - Lavagem de rua → Esta parte do editor é designada para informar possíveis práticas que promovam a limpeza de ruas ou avenidas através de ações humanas/máquinas;
 - Intervalo → Expressar o número de dias em que a prática se repete: para o presente estudo adotou-se o intervalo de 90 (noventa) dias como período em que o órgão competente executa a limpeza pública;
 - Disponibilidade → Informar a fração do poluente que é removida com o emprego da limpeza da rua. Adotou-se que 60% (sessenta por cento) do poluente “DQO” está disponível para remoção através das práticas de limpeza;
 - Última limpeza → Informar o número de dias em que a última “limpeza da rua” foi executada a partir do início da simulação. Foi estipulado que a última limpeza é executada sempre no dia da simulação.

A caracterização do uso do solo no que diz respeito às propriedades gerais, mais especificamente as atividades de limpeza pública, foi implementada numa condição de estipular valores em função de não se ter informações suficientes sobre os períodos de limpeza ou mesmo a eficiência dessa prática na remoção de poluentes. A idéia é não promover uma modificação drástica da concentração do poluente em estudo diante da execução das atividades de limpeza.

6.1.6.3. CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO SECA

Essa fase permite a inserção dos coeficientes para representação da taxa de crescimento do poluente segundo os tempos em que não há precipitação (“deposição seca”). Para expressar o acúmulo do poluente nos períodos secos foi utilizada uma função de saturação conforme apresentada pela equação 19.

$$B = \frac{(C_{B1} \cdot t)}{(C_{B2} + t)} \quad (19)$$

Onde:

- C_{B1} representa a máxima concentração possível (massa por unidade de área);
- C_{B2} representa a constante de meia saturação (dias para atingir metade do crescimento máximo);

O valor de C_{B1} adotado no desenvolvimento da simulação representa 5,47kg/ha (cinco vírgula quarenta e sete quilogramas por hectare) retirado da média geral em função da Tabela 13. Esse resultado é empregado para fornecer a máxima concentração possível da DQO para qualquer evento simulado.

No caso de C_{B2} , observa-se o número de dias sem chuva que antecedem os selecionados para as análises qualitativas e adota-se a metade desse tempo como sendo o valor representativo de tal coeficiente. Na contabilização dos dias antecedentes sem chuva, desconsideram-se os que apresentam precipitação total inferior a 10mm (dez milímetros). Em termos médios, o resultado de C_{B2} para todos os eventos qualitativos da Tabela 12 é de aproximadamente 7 (sete) dias.

6.1.6.4. CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO ÚMIDA

Essa fase permite a inserção dos coeficientes para representação da lavagem do poluente segundo os tempos em que ocorre a precipitação (“deposição úmida”). Para expressar o acúmulo do poluente nos períodos úmidos foi empregada uma função de concentração média no evento segundo o equacionamento 20.

$$W = C_{W1} \cdot Q^{C_{W2}} \quad (20)$$

Onde:

- C_{W1} representa a concentração média do poluente na lavagem (massa por litro);
- C_{W2} representa, para esse tipo de função, é numericamente igual a 1;
- Q representa a vazão no ponto de análise (litros por segundo)

O valor de C_{w1} é particular a cada evento simulado e retirado com o auxílio da Tabela 12 através de uma média aritmética entre as concentrações dos pontos M1, M2, M3 e M4 expressos em mg/l (miligramas por litro). É importante ressaltar que a Tabela 12 também é utilizada para indicar a concentração inicial do poluente nas subáreas no início da simulação. O resultado dessas considerações está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Valores dos coeficientes para caracterização de deposição seca e úmida

DATA DO EVENTO (simulação quali- quantitativa)	CONCENTRAÇÃO INICIAL DO POLUENTE (kg/ha)	CONCENTRAÇÃO MÉDIA NO EVENTO (mg/l)	CONCENTRAÇÃO MÁXIMA POSSÍVEL (kg/ha)
30/05/2008	0,60	42,88	5,47
09/07/2008	2,02	25,16	5,47
25/07/2008	14,63	62,61	5,47

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Para finalizar a caracterização da deposição úmida, serão utilizados dois parâmetros para promover a remoção do poluente, através da caracterização da eficiência das práticas de limpeza pública, quando da necessidade de realizar simulações para períodos mais longos. Tais parâmetros são representados da seguinte forma:

- Eficiência da limpeza → Indicação da eficiência (em termos de porcentagem) da função de “lavagem de rua” na remoção do poluente em que se está trabalhando. No caso em questionamento adotou-se 70% (setenta por cento);
- Eficiência de BMP → Eficiência da remoção (expresso em porcentagem) do poluente associada a outras práticas de limpeza pública. Nesse caso o referido item foi desconsiderado pela inexistência de outras atividades de limpeza;

6.2. CALIBRAÇÃO DO SWMM

A realização da calibração do modelo foi executada através de um processo iterativo empregando o método da tentativa e erro. Nesse contexto, os valores de alguns parâmetros foram modificados manualmente, sem elaboração ou utilização de algoritmos específicos para essa atividade, objetivando melhores correlações entre os valores simulados e os observados. Nessa etapa do trabalho, os seguintes parâmetros foram selecionados como alvo da calibração:

- Porcentagem de área impermeável;
- Número Manning para a área impermeável;
- Número de Manning para a área permeável;
- Profundidade do armazenamento nas depressões de áreas impermeáveis;

- Profundidade do armazenamento nas depressões de áreas permeáveis;
- Porcentagem da área impermeável sem armazenamento;
- Porcentagem do escoamento transferido entre as áreas dentro da subárea;
- Taxa de infiltração máxima;
- Taxa de infiltração mínima;
- Coeficiente de decaimento;
- Tempo de saturação;

O único artifício aproveitado para facilitar a modificação dos parâmetros foi a ferramenta de edição de grupo disponibilizada pelo próprio SWMM. Conforme comentado no item de aplicação, as áreas da bacia foram categorizadas em quatro grupos. Tais grupos são identificados no ambiente de trabalho do modelo através da opção “TAG”, permitindo que o usuário coloque um nome ou “etiqueta” para cada subárea criada. Portanto, ao passar para o processo de calibração, a ferramenta de edição de grupo auxiliou nas tarefas de variação de valores por parâmetro de acordo com a categoria de subárea.

Para o caso em estudo, os resultados obtidos através da estação de monitoramento da bacia são justificados como alvo da calibração do módulo Runoff do SWMM. Nessa etapa também está incluída a verificação dos erros gerados pelo desencadeamento das simulações considerando o limite estabelecido para os erros de continuidade que é de 10% (dez por cento). Tais erros são intrínsecos à utilização do próprio modelo e apresentados ao final de cada simulação.

Da maneira concisa, o procedimento adotado na atividade de calibração, em virtude do método da tentativa e erro, consistiu numa análise dos resultados apoiada na seleção de 05 (cinco) eventos de precipitação. Esses eventos foram escolhidos buscando-se observar o comportamento dos parâmetros em função da variação da precipitação total. Tabela 27 mostra um resumo dos eventos de precipitação que foram selecionados para a etapa de calibração do SWMM.

Tabela 27 – Eventos de precipitação selecionados para as atividades de calibração do SWMM

Nº DO EVENTO	DATA DE REFERÊNCIA	P _{TOTAL} (mm)
9 e 10	27/06/2007	11,7
11	30/06/2007	29,50
15, 16 e 17	22/07/2007	47,50
20, 21 e 22	20/08/2007	34,30
-----	08/06/2008	67,56

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Cabe ressaltar que os parâmetros representativos da largura do escoamento (W) e a declividade da bacia (%Slope) não foram tidos como alvo da calibração e da análise de sensibilidade, tendo-se em vista que seus respectivos valores partiram das atividades de geoprocessamento ou mesmo de relações matemáticas convenientes.

Para poder mensurar o resultado da calibração utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson. Tal coeficiente mede o grau de correlação entre duas variáveis na escala métrica e pode ser obtido através da equação 21.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (21)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (22)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (23)$$

Onde:

- $x_1, x_2, \dots, x_n$ e $y_1, y_2, \dots, y_n$ são os valores medidos de ambas as variáveis;
- $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias aritméticas de ambas as variáveis;

6.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO SWMM

Na realização da análise de sensibilidade optou-se pela condição de variar um parâmetro por vez deixando os demais fixos. No desenvolvimento dessa avaliação foram selecionados os seguintes parâmetros:

- Número de Manning para as áreas impermeáveis;
- Número de Manning para as áreas permeáveis;
- Armazenamento nas depressões de áreas impermeáveis;
- Armazenamento nas depressões de áreas permeáveis;
- Porcentagem de área impermeável sem armazenamento;
- Parâmetros de infiltração do modelo de Horton;

Para essa fase utiliza-se apenas um evento de precipitação, sendo esse o que apresenta o melhor coeficiente de correlação de Pearson (equação 21). A análise de sensibilidade foi elaborada buscando-se observar a influência da variação dos elementos

destacados anteriormente na modificação dos volumes de pico, onde esses são tidos como produtos do módulo Runoff do SWMM.

Em resumo, os critérios adotados na etapa da análise de sensibilidade seguem de acordo com as condições propostas em sequência:

- A análise de sensibilidade será efetuada utilizando o evento que, após o processo de calibração, apresentar o melhor coeficiente de correlação de Pearson;
- Deve-se variar um parâmetro por vez deixando os demais fixos;
- A influência dos parâmetros será medida com base na alteração dos volumes de pico;
- Os parâmetros analisados devem sofrer variações numa escala de -90% a +90% tomando-se como referência o valor final obtido da calibração do evento selecionado.
- Para os casos em que escala explicitada anteriormente não seja passiva de aplicação, deve-se realizar uma variação equitativa de forma que o maior incremento/decremento não ultrapasse 100%;

6.4. ASPECTOS DA UTILIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A seguir são apresentadas as informações e os principais procedimentos adotados na utilização do modelo proposto.

6.4.1. DADOS DE ENTRADA

Conforme apresentado no item 5, o modelo considera que a bacia de estudo é compreendida como uma área formada pela associação de lotes, quadras e demais elementos/dispositivos que caracterizam o sistema de drenagem local. Nesse contexto, entende-se que a bacia urbana pode ser representada por um conjunto de residências das quais o padrão de configuração compreende a instância unifamiliar.

Evidentemente, espera-se que, em virtude do processo de urbanização, a ocupação da bacia enseje características capazes de provocar uma heterogeneidade na utilização dos espaços, ou seja, observa-se comumente que locais onde predomina a ocupação por residências podem demonstrar outras condições de uso e ocupação como é caso, por exemplo, da existência de ambientes comerciais, estacionamentos ou mesmo grandes terrenos vazios. Esse é um aspecto importante a ressaltar, pois o modelo em questionamento, até o presente momento, só avalia a bacia pela associação de lotes e

quadras, portanto, as áreas da bacia que destoam desse padrão tido como convenção passam a ser analisadas por equivalência, assim sendo, tais ambientes serão convertidos para o que mais se aproxime em termos de agrupamento de lotes ou quadras.

Reconhecendo as condições de aplicação do modelo proposto, pode-se partir para a observação da bacia segundo as necessidades da modelagem. Para tanto, apresenta-se adiante a sistemática de trabalho que gerencia as etapas da utilização do modelo em questionamento.

6.4.2. RECONHECIMENTO E DISCRETIZAÇÃO DAS PARTES CONSTITUINTES DA BACIA SEGUNDO O MODELO PROPOSTO

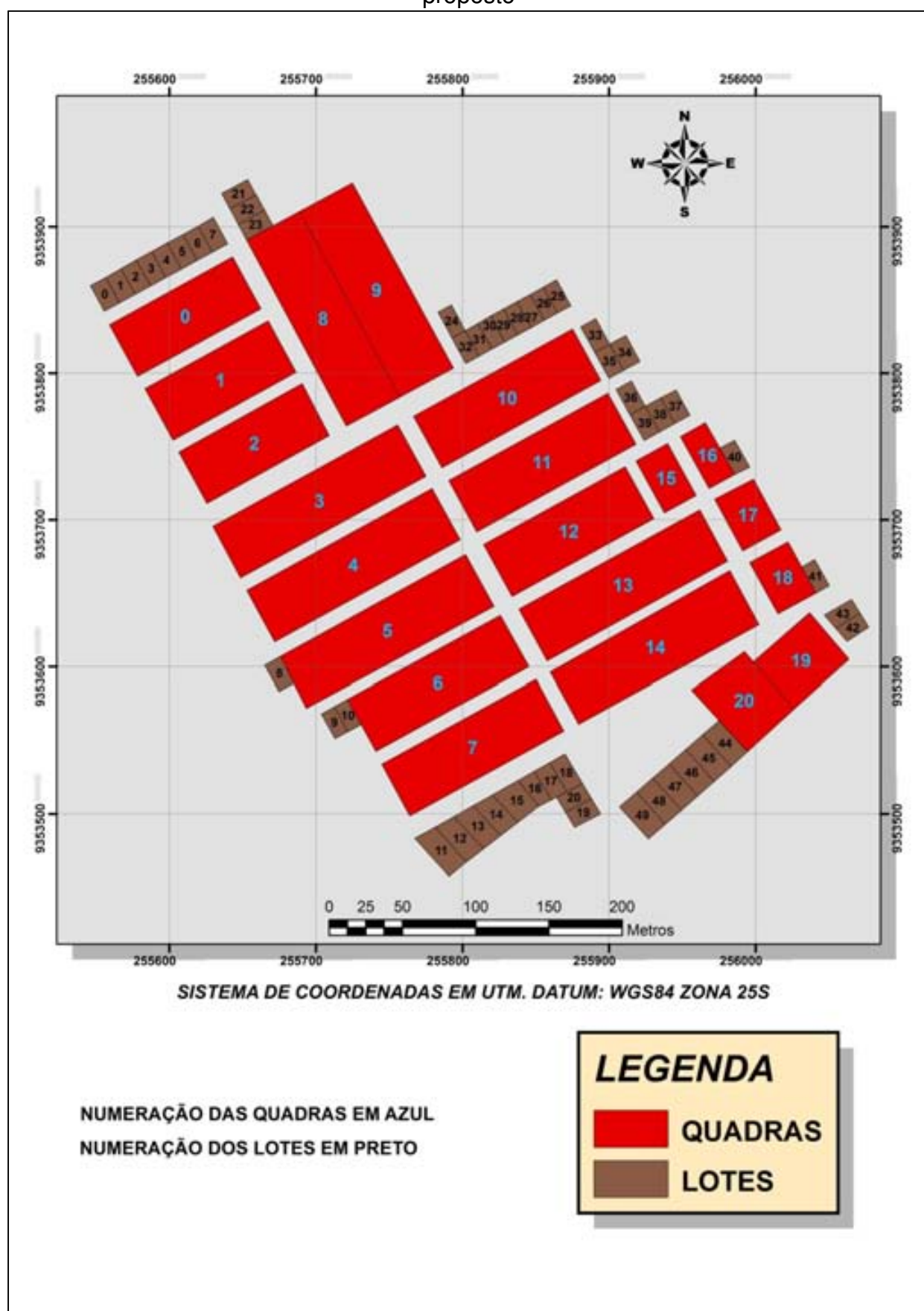
A primeira atividade para o desencadeamento da simulação constitui-se na separação da bacia em unidades de lotes e quadras. Essa separação é indispensável, tendo-se em vista que o resultado gerado irá condicionar a criação dos nós da rede bem como a disposição e configuração dos elementos responsáveis pela drenagem. Para balizar melhor esses comentários pode-se recorrer ao que foi apresentado pela Figura 31, Figura 38 e Figura 42. De acordo com essas figuras é possível perceber a distinção das áreas de interesse.

A Figura 49 demonstra o resultado da separação da bacia em unidades de lotes e quadras. Nessa figura ficam evidentes as adaptações elaboradas para englobar as áreas que não apresentavam totalmente as características de um lote unifamiliar.

Após essa separação da bacia é preciso verificar as condições da infraestrutura existente avaliando as características do sistema de drenagem local, ou seja, nesse ponto são identificados os dispositivos de drenagem como, por exemplo, sarjetas, bocas de lobo, galerias, lagoas de captação, entre outros. Para o local de estudo, de acordo com o que já foi explicitado, o sistema de drenagem realiza o transporte dos escoamentos de maneira predominantemente superficial pela utilização de sarjetas nas vias públicas. Em função dessa constatação será adotada a implementação de sarjetas como elemento exclusivo na recepção dos deflúvios provenientes de lotes e quadras e na condução dos mesmos até o exutório da bacia.

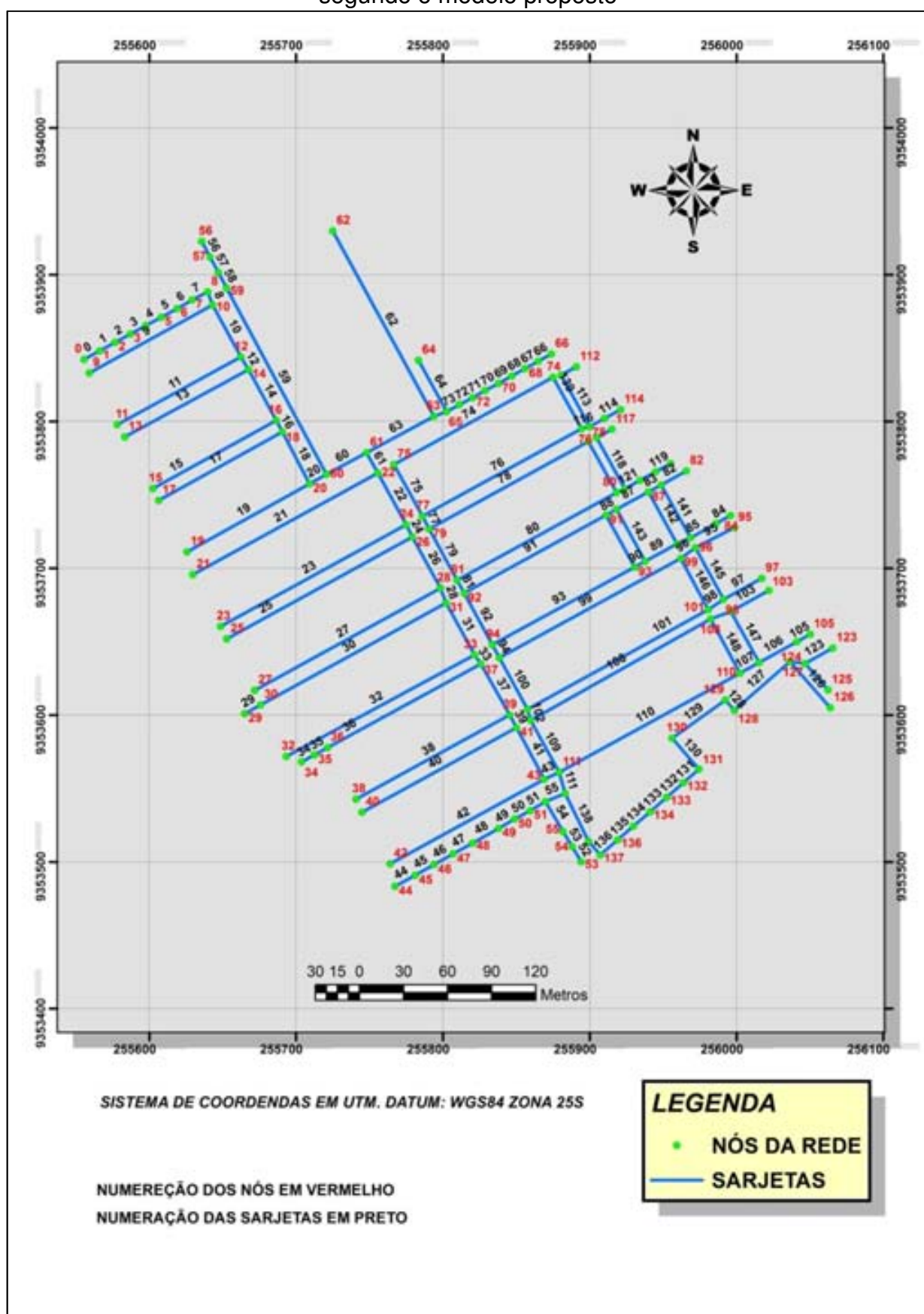
A Figura 50 retrata o resultado obtido da criação dos nós e sarjetas para a rede de drenagem da bacia segundo o modelo proposto. Vale ressaltar que cada nó poderá receber as contribuições, em termos de escoamento superficial, de lotes e quadras bem como dos nós de montante em função dos trechos de sarjeta. Esse fato explica a quantidade de nós que podem ser observados na Figura 50.

Figura 49 - Resultado da separação da bacia em lotes e quadras segundo o modelo proposto



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 50 - Resultado da criação dos nós e sarjetas para a rede de drenagem da bacia segundo o modelo proposto



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Para que se possa mensurar melhor o número de elementos criados para representar a bacia pode-se visualizar o resumo proposto pela Tabela 28.

Tabela 28 – Quantitativo do total de elementos criados para representar a bacia segundo o modelo proposto

ELEMENTO	TOTAL DE ELEMENTOS CRIADOS
NÓS	140
SARJETAS	149
LOTES	50
QUADRAS	21

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Cabe lembrar que a área da lagoa de captação de águas pluviais existente na área foi preservada para atuar de acordo com as finalidades que são propostas para esse tipo de elemento.

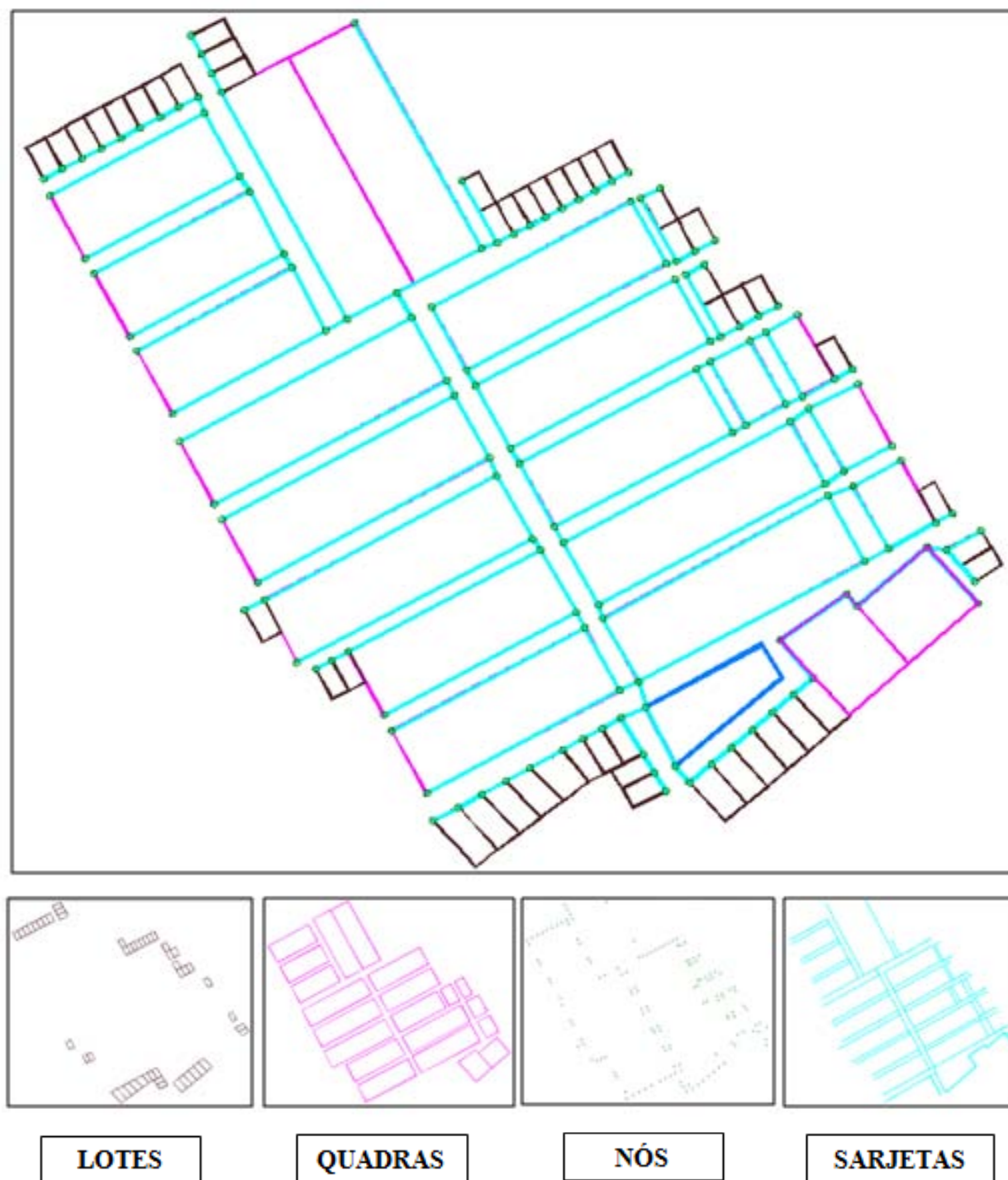
Embora o quantitativo exposto pela Tabela 28 indique, tendenciosamente, que uma quantidade significativa de trabalho manual seja necessária para a separação, identificação e implementação dos elementos que caracterizam a bacia, deve-se advertir que o contexto de desenvolvimento do modelo proposto permite, mesmo que ainda de maneira primária, a comunicação com outros softwares. A interface é estabelecida no momento em que ferramentas para exportação e importação de arquivos de texto tornam-se habilitadas. Essa viabilidade será detalhada de uma melhor forma pelos itens 6.4.3 e 6.4.5.

6.4.3. UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE DESENHO E GEOPROCESSAMENTO PARA EXPORTAÇÃO DE ARQUIVOS DE TEXTO

Buscando-se facilitar as atividades manuais do usuário, o algoritmo do modelo proposto foi concebido para permitir a leitura de arquivos texto. Nessa concepção os arquivos são empregados para armazenar propriedades que caracterizam os elementos que foram discretizados pelos passos anteriores. A idéia de empregar arquivos no formato “.txt” é amplamente difundida entre uma diversidade de softwares. Evidentemente, em virtude do modelo ainda estar em fase de desenvolvimento/aprimoramento, alguns esforços ainda são necessários para formatar adequadamente os arquivos.

Consolidando o uso de software/ferramenta para desenho ao estudo em questionamento, pode-se observar o que está demonstrado na Figura 51. De acordo com essa figura é possível compreender que um desenho foi elaborado agrupando um conjunto de polígonos, segmentos de retas e pontos que constituem os elementos que representam a bacia.

Figura 51 – Resultado da aplicação de software para desenho na identificação de lotes, quadras, sarjetas e nós da rede de drenagem da bacia

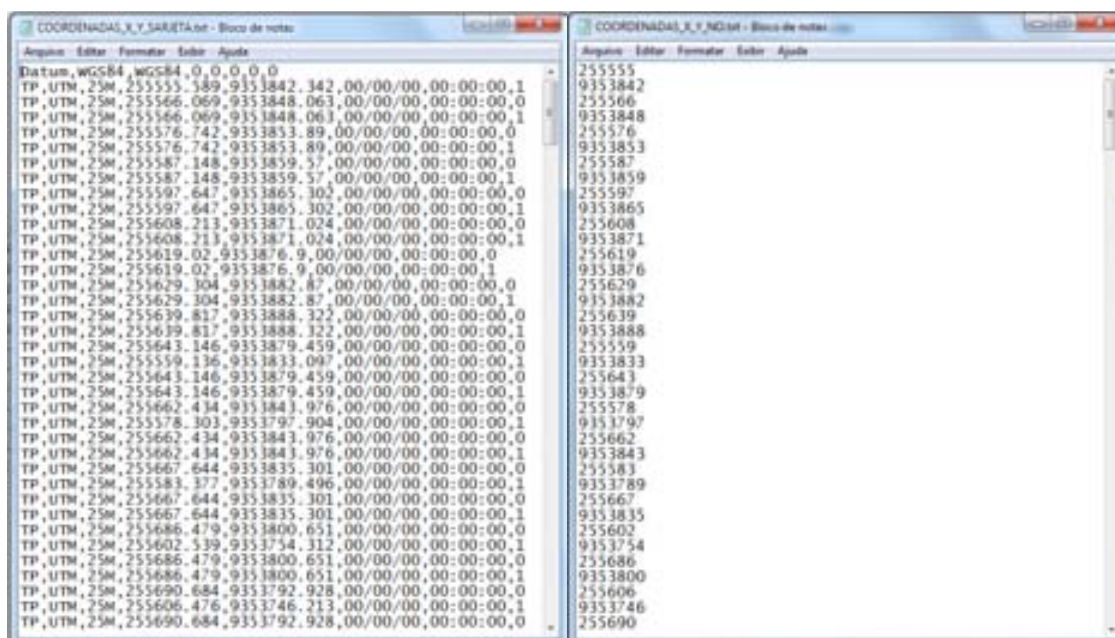


FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A Figura 51 também mostra que após a elaboração do desenho arquivos separados podem ser salvos. Cada um dos arquivos registra determinadas informações específicas do elemento que representa. Nesse contexto, propriedades como coordenadas “X” e “Y”, comprimentos e áreas foram extraídas empregando-se em paralelo um software que permite realizar a conversão do formato de desenho para o formato de texto. A Figura 52

explicita um dos resultados obtidos da conversão dos arquivos de desenho para o formato de texto. Nessa mesma figura é possível observar que um dos arquivos encontra-se ainda numa condição bruta da conversão enquanto que o outro foi devidamente manipulado para resguardar apenas as informações de utilidade.

Figura 52 – Arquivos de texto obtidos da conversão do desenho



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O importante a justificar nessa etapa é que o trabalho despendido na execução dos desenhos é empregado na formulação de um banco de dados. Essa ação também agrega uma economia de tempo pela necessidade existente em se caracterizar graficamente a bacia através da interface modelo proposto, tendo-se em mente que as questões gráficas e as propriedades armazenadas estão intimamente conectadas.

O resultado da fase de aplicação das técnicas de desenho consolida a elaboração dos arquivos que serão designados para atuar como fontes de dados. Dentro desse âmbito, o modelo proposto irá realizar a leitura da cada uma das linhas dos arquivos salvando-as automaticamente em espaços definidos pelo algoritmo.

Em linhas gerais, o produto adquirido com o desenvolvimento dos desenhos após conversões e formatações é atribuído a concretização das seguintes fontes de informação:

- Arquivos de texto com propriedades dos nós;
- Arquivos de texto com propriedades das sarjetas;
- Arquivos de texto com propriedades dos lotes;
- Arquivos de texto com propriedades das quadras;

6.4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DA BACIA

O item 5 que trata da apresentação do modelo proposto esclarece que o usuário deve fornecer dados que permitam, por exemplo, o entendimento dos padrões e tipos de lotes existentes na bacia. Outras informações como a configuração de determinados elementos da drenagem também devem passar por esse processo.

Essa é a fase de representação da bacia que denota o maior gasto de tempo e que requer certo um nível de atenção.

Para poder caracterizar adequadamente os elementos que representam a bacia foi necessário utilizar as imagens aéreas e avaliar visual e estatisticamente as constatações. Evidentemente, o uso das fotografias aéreas e das demais bases em meio digital não elimina a necessidade de se reconhecer mais intimamente a área de estudo. Tal fato leva em consideração que algumas particularidades do ambiente da bacia, que serão aqui justificadas, só podem extraídas diante de observações embasadas, por exemplo, nas visitas campo.

Valendo-se das informações disponibilizadas e do reconhecimento particular do ambiente em estudo, foi realizado um levantamento para qualificar e quantificar os padrões e tipos de lotes existentes na bacia conforme apresentado na Figura 29 e Figura 30b. O resultado desse levantamento permitiu diagnosticar que os lotes apresentam, em sua maioria, os padrões discriminados pela Tabela 29. É importante elucidar que o resultado da Tabela 29 já leva em consideração as análises de equivalência que consentem as transformações de áreas não residenciais em lotes com padrão unifamiliar.

Tabela 29 – Levantamento dos padrões de lote presentes na bacia

PADRÃO	QUANTIDADE	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)
1	407	12	20
2	17	15	30

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Além das questões ligadas especificamente aos padrões do lote também foi possível elaborar um resultado sobre os tipos, utilizando, para tanto, o critério estabelecido pela Figura 29 demonstrada no item 5 do presente estudo.

A identificação dos padrões e tipos é de crucial importância para o correto funcionamento do modelo proposto.

Para compreender as analogias feitas nessa fase do trabalho pode-se recorrer ao que está exposto na Figura 53. De acordo com essa figura ficam claramente evidenciadas as associações elaboradas no intuito de classificar áreas onde o padrão da unidade de lote não ocorre.

Figura 53 – Resultado da identificação dos padrões e tipos de lotes existentes na bacia

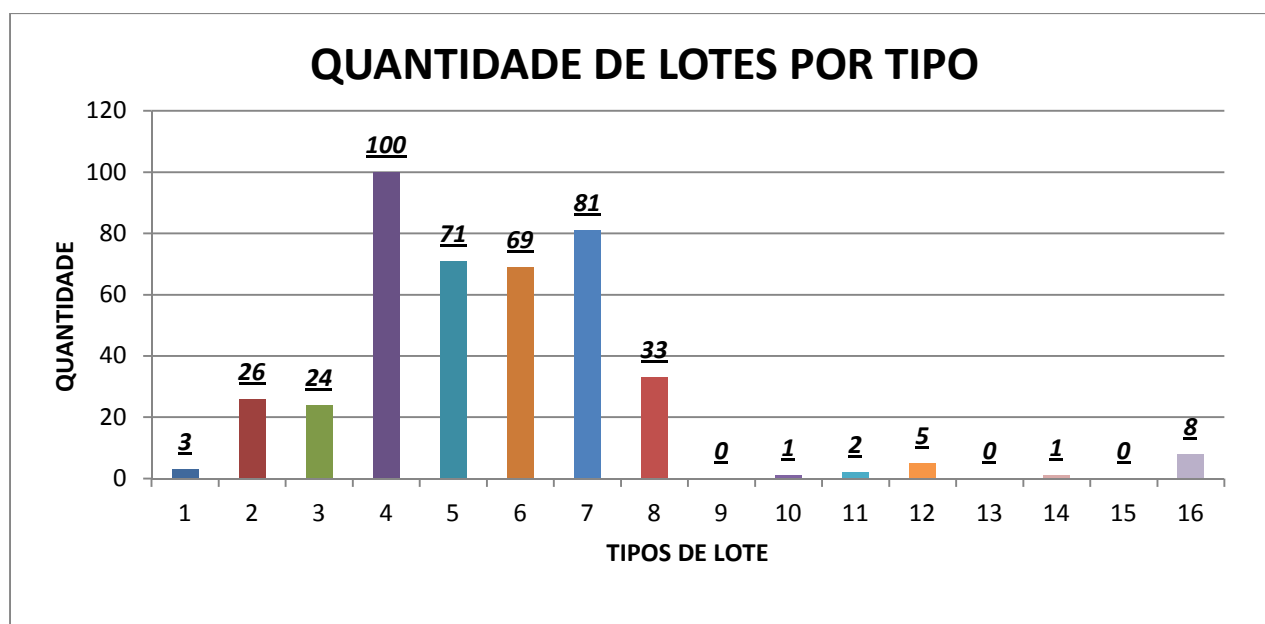


FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Em termos numéricos o resultado do levantamento proposto pela Figura 53 é utilizado diretamente pelo modelo proposto na condição de inserção dos lotes, estando esses de maneira isolada ou representados através das quadras. É importante considerar que a informação quantitativa dos tipos de lote já permite formular algumas idealizações sobre as condições do nível de impermeabilidade da área em estudo.

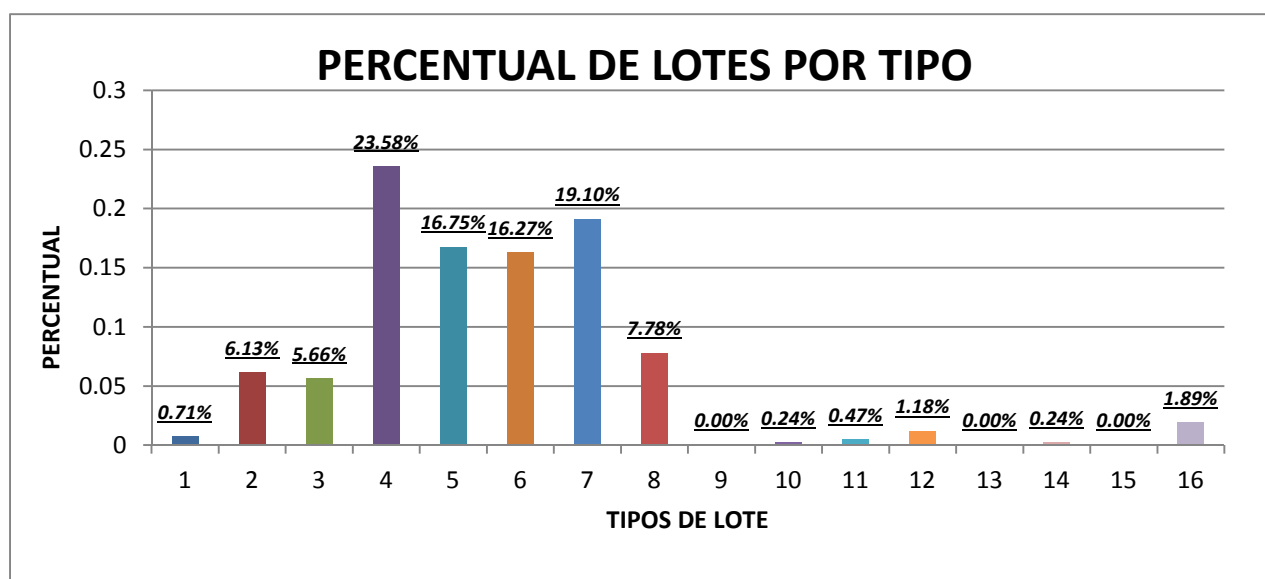
A Figura 54 explicita o resultado para o levantamento quantitativo dos tipos de lote (ver Figura 29 e Figura 30b) existentes na bacia e a Figura 55 demonstra os valores em termos percentuais.

Figura 54 – Levantamento quantitativo para os tipos de lote existentes na bacia



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 55 – Percentual dos tipos de lote existentes na bacia



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Após a realização do levantamento quantitativo ainda é preciso extrair as informações que condicionam as questões de disposição das residências no interior do lote. Essa atividade permite que sejam identificados os recuos e, por consequência, a existência de áreas de corredor, frente e fundo de lote. É evidente que o reconhecimento de tais áreas só será aplicado para os tipos que permitem essa configuração.

O critério adotado na análise da disposição das residências no interior do lote segue conforme os itens expostos adiante:

- A avaliação da disposição será dada mediante conceito estatístico;
- A estatística aplicada será a média aritmética dos valores de interesse;
- Os valores de interesse são: largura e comprimento das residências;
- Na condição de existência do tipo de lote, a avaliação tomará como base uma amostra de 10 unidades. Caso número de lotes do tipo analisado seja inferior ao padrão da amostra, adota-se a mesma como sendo igual ao total de lotes existentes do referido tipo;
- Não será aplicada qualquer avaliação para os tipos que ocupam integralmente a área de lote ou para aqueles que representam o lote vazio;

A partir dos critérios estabelecidos, chegou-se aos números estabelecidos de acordo com a Tabela 30.

Tabela 30 – Média para a largura e comprimento das residências por tipo de lote

TIPO	AMOSTRA	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	LARGURA MÉDIA (m)	COMPRIMENTO MÉDIO (m)
1	1	7,50	9,00	7,50	9,80
	2	7,50	10,50		
	3	7,50	9,80		
2	1	8,00	11,00	8,10	11,70
	2	8,30	10,00		
	3	8,00	13,50		
	4	8,00	13,20		
	5	8,00	13,00		
	6	7,80	10,50		
	7	8,00	11,00		
	8	8,80	13,20		
	9	8,00	11,20		
	10	8,30	10,60		
3	1	8,30	12,60	8,20	12,10
	2	8,10	12,60		
	3	8,50	13,00		
	4	8,50	13,10		
	5	7,20	9,60		

TIPO	AMOSTRA	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	LARGURA MÉDIA (m)	COMPRIMENTO MÉDIO (m)
	6	7,70	9,50		
	7	8,80	13,00		
	8	8,40	14,00		
	9	8,20	13,00		
	10	8,30	10,60		
4	1	12,00	12,70	12,00	10,60
	2	12,00	9,80		
	3	12,00	9,80		
	4	12,00	9,50		
	5	12,00	9,70		
	6	12,00	10,00		
	7	12,00	9,50		
	8	12,00	15,60		
	9	12,00	9,50		
	10	12,00	9,80		
5	1	12,00	15,30	12,00	16,30
	2	12,00	17,50		
	3	12,00	15,20		
	4	12,00	15,30		
	5	12,00	15,00		
	6	12,00	16,00		
	7	12,00	17,30		
	8	12,00	17,20		
	9	12,00	17,00		
	10	12,00	16,80		
6	1	12,00	14,80	12,00	16,10
	2	12,00	15,00		
	3	12,00	15,00		
	4	12,00	15,10		
	5	12,00	17,60		
	6	12,00	17,70		
	7	12,00	17,50		
	8	12,00	16,50		
	9	12,00	14,40		
	10	12,00	17,70		
10	1	9,50	23,60	9,50	23,60
11	1	9,50	23,60	9,50	23,60
	2	9,50	23,60		
12	1	15,00	22,00	15,00	20,60
	2	15,00	24,30		
	3	15,00	21,30		
	4	15,00	21,70		
	5	15,00	13,60		

TIPO	AMOSTRA	LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	LARGURA MÉDIA (m)	COMPRIMENTO MÉDIO (m)
14	1	15,00	16,00	15,00	16,00

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

As médias apresentadas na Tabela 30 serão empregadas no ambiente do modelo proposto para que seja possível caracterizar os aspectos ocupacionais das residências no interior dos lotes. Esse processo será apresentado mais detalhadamente no item 6.4.5.

Para finalizar a caracterização dos lotes o modelo necessita que sejam informados os coeficientes de deflúvio “C”, os parâmetros de infiltração e altura máxima da lâmina de armazenamento para a frente e fundo do lote. Nesse caso, valendo-se das proposições esclarecidas no item 5, valores estabelecidos na Tabela 31 podem ser empregados como uma primeira avaliação das áreas.

Tabela 31 – Coeficientes para caracterização das superfícies do lote

ÁREA	COEFICIENTE	VALOR
FRENTE DO LOTE	f_0 (cm/min)	0,30
	f_∞ (cm/min)	0,01
	α (min ⁻¹)	0,05
	h_{FRENTE} (cm)	5,00
FUNDO DO LOTE	f_0 (cm/min)	0,30
	f_∞ (cm/min)	0,01
	α (min ⁻¹)	0,05
	h_{FUNDO} (cm)	5,00
CORREDOR ESQUERO DA FRENTE	C	0,95
CORREDOR ESQUERO DO FUNDO	C	0,95
CORREDOR DIREITO DA FRENTE	C	0,95
CORREDOR DIREITO DO FUNDO	C	0,95
TELHADO	C	0,95

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A atividade de caracterização dos elementos representativos da bacia termina com a definição das propriedades dos dispositivos responsáveis pela drenagem. Para a bacia em questionamento, como já comentado, a drenagem é efetivada integralmente pela utilização de sarjetas. Nesse caso, adotam-se as mesmas considerações feitas para a caracterização da sarjeta no SWMM no que diz respeito ao perfil da seção transversal e tipo de material. Outras informações serão detalhadas no 6.4.5.

6.4.5. TRABALHO NO AMBIENTE DO MODELO

Com a base de dados devidamente levantada através das ferramentas de desenho e geoprocessamento é possível partir para o ambiente de trabalho do modelo.

Em sequência constam os principais procedimentos desenvolvidos na modelagem da bacia através do modelo proposto.

6.4.5.1. INSERÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS DA BACIA

A inserção dos elementos que representam a bacia pode ser feita de duas formas. A primeira delas é quando o usuário deseja implementar manualmente cada um deles, indicando, dentro da janela habilitada para o desenho na interface do modelo, os seus respectivos posicionamentos. A segunda forma é realizar a importação dos arquivos de texto que foram criados na fase da utilização das ferramentas de desenho e geoprocessamento.

Para o presente estudo será empregado os arquivos de texto que foram obtidos das atividades esclarecidas no item 6.4.3. Cabe lembrar que os arquivos que serão importados possuem propriedades referentes aos seguintes elementos: nós da rede de drenagem, sarjetas, lotes e quadras.

A Figura 56 apresenta o resultado da importação dos arquivos de texto para a inserção dos elementos representativos da bacia.

Figura 56 - Importação dos arquivos de texto para inserção dos elementos representativos da bacia através do modelo proposto



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Após a importação dos arquivos de texto parte-se para o processo demonstrado na Figura 57 e na Figura 58, onde é feita a caracterização da disposição das residências no interior dos lotes, empregando os dados presentes na Tabela 30, e a adoção dos coeficientes de deflúvio bem como dos parâmetros de infiltração.

Figura 57 - Caracterização da ocupação das residências no interior do lote

CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FÍSICOS E PADRÕES DE OCUPAÇÃO DO LOTE

PADRÃO 1: 20 COMPRIMENTO DO LOTE (m) 12 LARGURA DO LOTE (m)

TIPO 1, TIPO 2, TIPO 3, TIPO 4, TIPO 5, TIPO 6, TIPO 7, TIPO 8

Lc: 9.8, Lc: 11.7, Lc: 12.1, Lc: 10.6, Lc: 16.3, Lc: 16.3, Lc: 20, Lc: 20
bc: 7.5, bc: 8.1, bc: 8.2, bc: 12, bc: 12, bc: 12, bc: 12, bc: 12

* TODOS OS VALORES DEVEM SER FORNECIDOS EM METRO

PADRÃO 2: 20 COMPRIMENTO DO LOTE (m) 15 LARGURA DO LOTE (m)

TIPO 9, TIPO 10, TIPO 11, TIPO 12, TIPO 13, TIPO 14, TIPO 15, TIPO 16

Lc: 0, Lc: 23.6, Lc: 23.6, Lc: 20.6, Lc: 0, Lc: 16, Lc: 30, Lc: 30
bc: 0, bc: 9.5, bc: 9.5, bc: 15, bc: 0, bc: 15, bc: 15, bc: 15

* TODOS OS VALORES DEVEM SER FORNECIDOS EM METRO

CARREGA

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 58 – Caracterização das superfícies do lote

CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DOS LOTES

0.3 capacidade de infiltração inicial do solo (cm/min)
0.01 capacidade de infiltração mínima do solo (cm/min)
0.05 coeficiente de decaimento (min-1)

0.95 coeficiente de "runoff" do corredor esquerdo do fundo (adm)
0.95 coeficiente de "runoff" do corredor esquerdo da frente (adm)

FUNDO DO LOTE
FRENTE DO LOTE
LATERAL ESQUERDA
LATERAL DIREITA

0.95 coeficiente de "runoff" do corredor direito do fundo (adm)
0.95 coeficiente de "runoff" do corredor direito da frente (adm)

0.95 coeficiente de "runoff" da cobertura

5 altura da lâmina de armazenamento na frente do lote (cm)
5 altura da lâmina de armazenamento no fundo do lote (cm)

0.3 capacidade de infiltração inicial do solo (cm/min)
0.01 capacidade de infiltração mínima do solo (cm/min)
0.05 coeficiente de decaimento (min-1)

CARREGA

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O próximo passo a ser executado nessa etapa consiste na determinação dos tipos de sarjetas que serão utilizados para o transporte dos escoamentos. Para tanto, a Figura 59 demonstra a janela do modelo onde as configurações da seção transversal da sarjeta podem ser calculadas de acordo com o tipo selecionado.

Figura 59 – Janela para cálculo da seção transversal da sarjeta

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O último componente a inserir é o pluviógrafo, sendo esse o responsável por armazenar as informações sobre os dados de precipitação. Tal ação é feita clicando-se primeiramente no botão “inserir pluviógrafo” e posteriormente na janela habilitada para desenho. Cabe ressaltar que mais de um pluviógrafo pode ser adotado para trabalhar no modelo, tendo-se em mente a necessidade de permitir que o usuário considere a variabilidade espacial das precipitações na bacia.

Para finalizar é preciso especificar determinadas propriedades dos elementos que foram inseridos anteriormente. Dentro desse âmbito, os elementos apresentados na janela de verificação são individualmente selecionados e editados através dos quadros da Figura 60. Esse processo torna-se impeditivo caso o número de componentes a editar seja elevado. Na resolução desse problema o algoritmo do modelo permite que arquivos de texto também sejam importados para executar tal ação mais rapidamente. Os aspectos de importação para esse caso serão tratados no item 6.4.5.2.

Figura 60 – Janelas para edição das propriedades dos elementos

The figure displays three windows from a software application used for editing element properties. Each window contains a table with two columns: 'PROPRIEDADES' (Properties) and 'VALORES' (Values).

Window 1: PROPRIED...

PROPRIEDADES	VALORES
NOME	L1
ÍNDICE	1
PADRÃO (1 OU 2)	
TIPO (1 A 16)	
NÓ DE JUSANTE	
PLUVIÓGRAFO	

Window 2: PROPRIEDA...

PROPRIEDADES	VALORES
NOME	N1
ÍNDICE	1
COTA (m)	

Window 3: PROPRIEDADES BÁSICAS DA QUADRA

PROPRIEDADES	VALORES
NOME	Q1
ÍNDICE	1
PADRÃO DOS LOTES (1 OU 2)	
LARGURA (m)	
COMPRIMENTO (m)	
Nº DE TIPO 1 OU Nº DE TIPO 9	0
Nº DE TIPO 2 OU Nº DE TIPO 10	0
Nº DE TIPO 3 OU Nº DE TIPO 1	0
Nº DE TIPO 4 OU Nº DE TIPO 12	0
Nº DE TIPO 5 OU Nº DE TIPO 13	0
Nº DE TIPO 6 OU Nº DE TIPO 14	0
Nº DE TIPO 7 OU Nº DE TIPO 15	0
Nº DE TIPO 8 OU Nº DE TIPO 16	0
NÓ DE MONTANTE 01	
NÓ DE JUSANTE 01	
NÓ DE MONTANTE 02	
NÓ DE JUSANTE 02	
Nº DE LOTES PERMITIDOS	
PLUVIÓGRAFO	

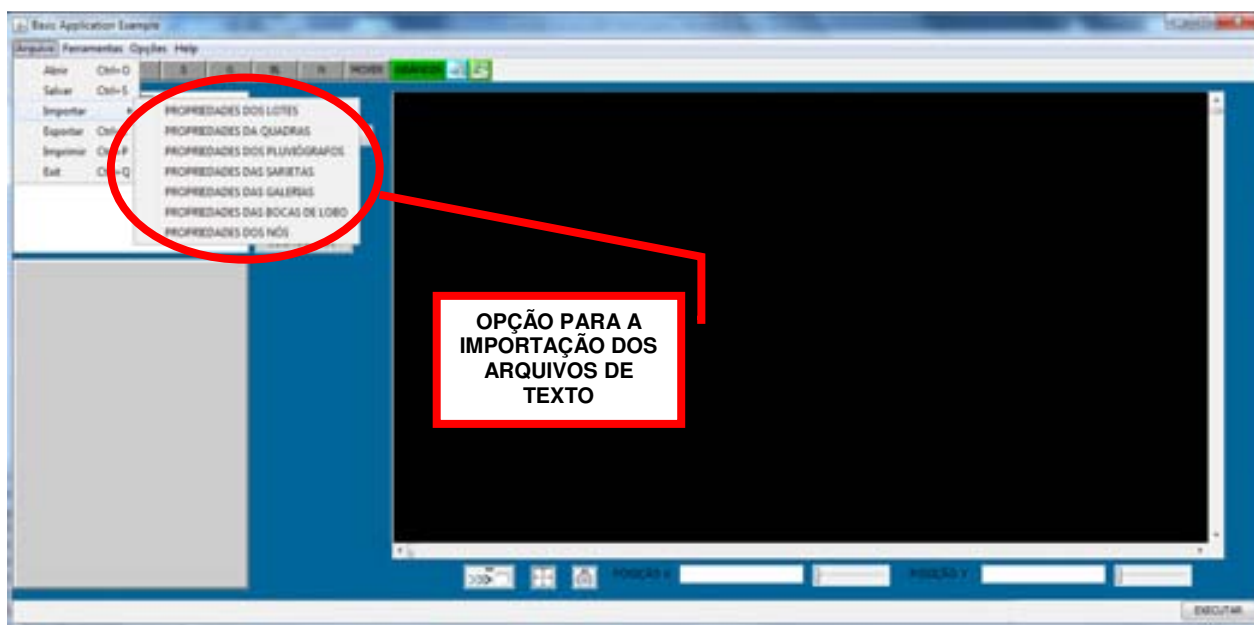
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

6.4.5.2. IMPORTAÇÃO DE ARQUIVOS TEXTO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS

Buscando facilitar as atividades de edição das propriedades dos elementos representativos da bacia, foi desenvolvido um algoritmo que permite ao modelo a condição de importar tais propriedades. Para poder realizar a atividade de importação das propriedades é preciso elaborar previamente um arquivo de texto, onde as informações devem estar organizadas de uma forma padronizada. A Figura 61 explicita a ferramenta do modelo que é encarregada do processo de importação. As Tabela 32 a Tabela 36 mostram o padrão da sequência adotada na elaboração dos arquivos de texto.

Em função da aplicação do modelo proposto, na condição de desenvolvimento do presente estudo, todos os componentes implementados a partir do item 6.4.5.1 recebem os arquivos de texto com as propriedades devidamente especificadas.

Figura 61 – Importação dos arquivos de texto para edição das propriedades dos elementos representativos da bacia



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 32 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades dos nós

NÓ	DADOS P/ IMPORTAÇÃO
NOME	N1
ÍNDICE	1
COTA (m)	61

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 33 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades das sarjetas

SARJETA	DADOS P/ IMPORTAÇÃO
NOME	S1
ÍNDICE	1
NÓ DE MONTANTE	61
NÓ DE JUSANTE	60
COMPRIMENTO (m)	11.94
TIPO	2
PLUVIÓGRAFO	1

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 34 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades dos lotes

LOTES	DADOS P/ IMPORTAÇÃO
NOME	L1
ÍNDICE	1
PADRÃO	1
TIPO	8
NÓ DE JUSANTE	N1
PLUVIÓGRAFO	1

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 35 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades das quadras

QUADRAS	DADOS P/ IMPORTAÇÃO
NOME	Q1
ÍNDICE	1
PADRÃO (1 OU 2)	2
LARGURA (m)	60
COMPRIMENTO (m)	120
N ° DE TIPO 1 OU N° DE TIPO 9	0
N ° DE TIPO 2 OU N° DE TIPO 10	4
N ° DE TIPO 3 OU N° DE TIPO 11	0
N ° DE TIPO 4 OU N° DE TIPO 12	3
N ° DE TIPO 5 OU N° DE TIPO 13	3
N ° DE TIPO 6 OU N° DE TIPO 14	1
N ° DE TIPO 7 OU N° DE TIPO 15	5
N ° DE TIPO 8 OU N° DE TIPO 16	0
NÓ DE MONTANTE 01	10
NÓ DE JUSANTE 01	11
NÓ DE MONTANTE 02	12
NÓ DE JUSANTE 02	13
Nº DE LOTES PERMITIDOS	16
PLUVIÓGRAFO	1

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Tabela 36 – Exemplo da sequência empregada para a formatação do arquivo de texto com as propriedades do pluviógrafo

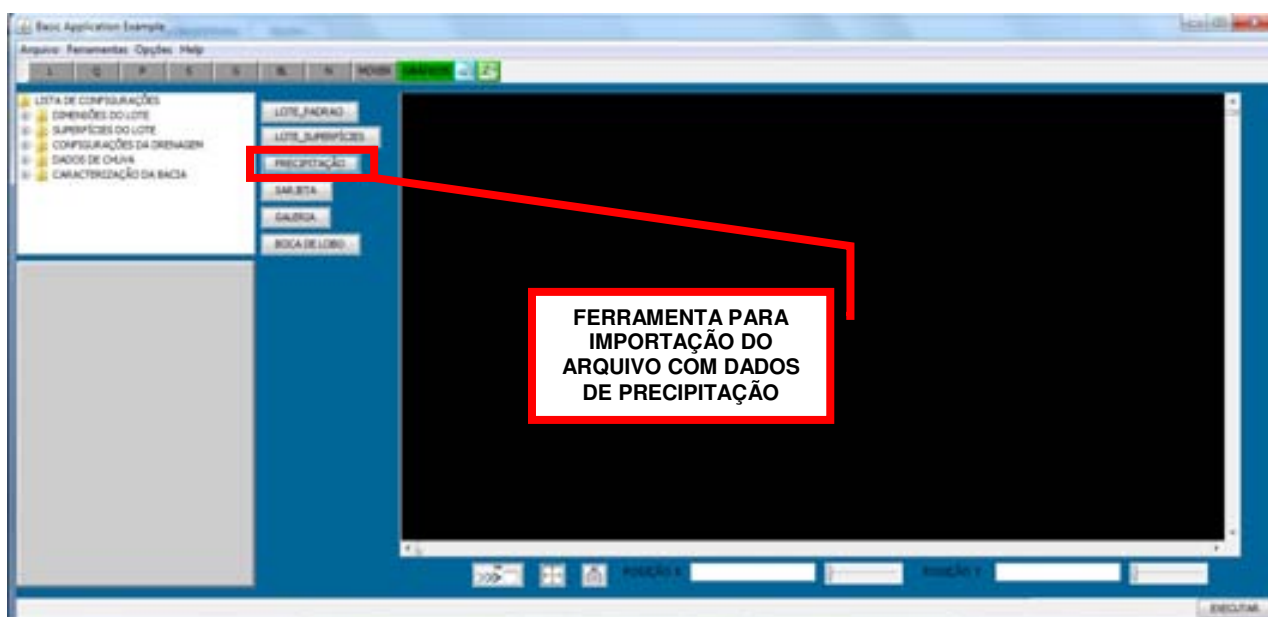
PLUVIÓGRAFO	DADOS P/ IMPORTAÇÃO
NOME	P1
ÍNDICE	1
SÉRIE	F:\MOHHAD\ Dados_de_precipitacao.txt

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

6.4.5.3. IMPORTAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CHUVA

Os dados de precipitação utilizados pelo modelo também podem ser importados diretamente de arquivos de texto. Caso seja necessário é permitido digitar os valores das intensidades de chuva e criar um arquivo específico armazenando tais informações. Para tanto, o usuário deve clicar na ferramenta “PRECIPITAÇÃO” demonstrado na Figura 62. Ao selecionar essa ferramenta será aberta a janela apresentada pela Figura 63, onde se pode perceber um exemplo dos dados de chuva. Nessa mesma janela consta o botão “IMPORTAR” que é encarregado de transferir os dados do arquivo de texto para dentro da tabela e o botão “CARREGAR” que realiza a tarefa de registrar os valores internamente. É importante esclarecer que o modelo proposto trabalha contabilizando os processos hidráulicos-hidrológicos no intervalo de 01 (um) minuto, sendo, portanto, obrigatório o fornecimento dos dados de precipitação no formato de mm/h (milímetros por hora) segundo esse intervalo.

Figura 62 – Ferramenta para importação do arquivo com os dados de precipitação



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 63 – Janela para importação e visualização dos dados de precipitação

TEMPO (minutos)	PRECIPITAÇÃO (mm/h)
0	0
1	0.6096
2	0.6096
3	0.6096
4	0.6096
5	0.6096
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	2.4384
22	2.4384
23	2.4384
24	2.4384
25	2.4384
26	0.6096
27	0.6096
28	0.6096
29	0.6096
30	0.6096

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Os eventos de precipitação que serão utilizados no modelo proposto são os mesmo que foram apresentados na Tabela 7 pelo item 4.1. Como os dados do monitoramento hidrológico foram registrados no intervalo de 05 (cinco) minutos, foi preciso converter os valores para a escala de 01 (um) minuto.

6.4.6. EXECUÇÃO DO MODELO

Em função de todos os levantamentos feitos através das atividades de desenho/geoprocessamento e, evidentemente, dispondo-se dos elementos que representam a bacia já corretamente caracterizados, pode-se partir para a execução do modelo. Nesse ponto é necessário apenas selecionar o botão “EXECUTAR”, apresentado na área de trabalho, para permitir o início da simulação. Conforme já explicitado, o modelo utiliza-se das informações cadastradas e das opções habilitadas como base para a contabilização do processo de conversão chuva-vazão e na propagação dos deflúvios.

A primeira resposta apresentada no término da simulação é a exposição de uma planilha geral contendo as informações sobre cada um dos trechos criados para a rede de drenagem. A referida planilha resgata o banco de dados para apresentar propriedades como: nome do trecho, nó de montante, nó de jusante, cota de montante, cota de jusante,

comprimento, declividade, tipo da sarjeta ou boca-de-lobo, largura da boca-de-lobo, altura da boca-de-lobo, diâmetro da galeria, vazão teórica, fator de redução, vazão de projeto, velocidade média, nome do pluviógrafo associado, tempo de simulação, intensidade da precipitação, elemento de descarga a montante e a jusante no trecho (lote ou quadra), tipo(s) de lote(s) que descarregam no trecho, somatório das descargas no trecho, vazão de contribuição de montante, vazão do trecho (função da precipitação direta sobre o trecho) e vazão no nó de jusante do trecho. Cabe lembrar que todos os cálculos implementados no algoritmo do modelo consideram o intervalo de 01 (um) minuto como resolução temporal na simulação do processo de conversão chuva-vazão e na propagação dessa ao longo da rede de drenagem.

Após a apresentação da planilha geral, habilita-se a função para gerar os gráficos com os resultados de vazão para todos os trechos e nós da rede de drenagem. A Figura 65 apresenta um exemplo dos resultados expostos na planilha geral através de modelo proposto e a Figura 64 um gráfico contendo os valores simulados para a vazão no exutório da bacia em estudo.

Figura 64 – Gráfico de vazão no exutório da bacia gerado pelo modelo proposto



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 65 – Exemplo da planilha geral apresentada pelo modelo proposto

CÁLCULO DAS VAZÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO										
TRECHO	Nº DE MONTANTE	Nº DE JUSANTE	COTA DE MONTANTE (m)	COTA DE JUSANTE (m)	COMPRIMENTO (m)	DECLIVIDADE (m/m)	TIPO DA SARJETA OU BOCA-DE-LOBO	LARGURA DA BOCA-DE-LOBO (m)	ALTURA DA BOCA-DE-LOBO (m)	DIÂMETRO DA GALEIA
S1	N1	N2	61	60	11.939906	0.08375275	2	.....	.....	.....
S2	N2	N3	60	59.428188	12.158981	0.047027927	2	.....	.....	.....
S3	N3	N4	59.428188	59	11.856139	0.036115326	2	.....	.....	.....
S4	N4	N5	59	58.342297	11.961088	0.05498692	2	.....	.....	.....
S5	N5	N6	58.342297	58	12.026525	0.02848549	2	.....	.....	.....
S6	N6	N7	58	57	12.300592	0.0812969	2	.....	.....	.....
S7	N7	N8	57	56.593026	11.891299	0.03439297	2	.....	.....	.....
S8	N8	N9	56.593026	56	11.842846	0.049905766	2	.....	.....	.....
S9	N9	N11	56	55	9.468333	0.105615206	2	.....	.....	.....
S10	N10	N11	61	55	95.953903	0.062530026	2	.....	.....	.....
S11	N11	N13	55	52.315491	40.386417	0.0664706	2	.....	.....	.....
S12	N12	N13	60	52.315491	95.919786	0.08011391	2	.....	.....	.....
S13	N13	N15	52.315491	51.667198	10.189326	0.06406479	2	.....	.....	.....
S14	N14	N15	59.739992	51.667198	95.911431	0.08412755	2	.....	.....	.....
S15	N15	N17	51.667198	49.666364	39.438364	0.050738513	2	.....	.....	.....
S16	N16	N17	57.915527	49.666364	95.880845	0.08603766	2	.....	.....	.....
S17	N17	N19	49.666364	49.275223	8.79367	0.044457364	2	.....	.....	.....
S18	N18	N19	57.530705	49.275223	96.297451	0.08572898	2	.....	.....	.....
S19	N19	N21	49.275223	47.159122	39.911778	0.053019445	2	.....	.....	.....
S20	N20	N21	55.823578	47.159122	95.427872	0.09079586	2	.....	.....	.....
S21	N21	N61	47.159122	46.097996	13.237589	0.08036012	2	.....	.....	.....
S22	N22	N23	55.538567	42.574646	143.829187	0.09013414	2	.....	.....	.....
S23	N23	N25	42.574646	41.373056	40.098263	0.030036024	2	.....	.....	.....
S24	N24	N25	53.629086	41.373056	144.269921	0.08496594	2	.....	.....	.....
S25	N25	N27	41.373056	41.03936	9.38968	0.035325546	2	.....	.....	.....
S26	N26	N27	53.251305	41.03936	144.223356	0.08467384	2	.....	.....	.....
S27	N27	N29	41.03936	40.9	39.842445	0.0034977403	2	.....	.....	.....
S28	N28	N29	52.121841	40.9	144.405799	0.07773046	2	.....	.....	.....
S29	N29	N32	40.9	40.8	10.705075	0.009341577	2	.....	.....	.....
S30	N30	N31	52	51.9	12.366125	0.008086429	2	.....	.....	.....
S31	N31	N32	51.9	40.8	144.105206	0.077027075	2	.....	.....	.....
S32	N32	N34	40.8	40.7	40.327228	0.0024796764	2	.....	.....	.....
S33	N33	N34	50.815151	40.7	145.66267	0.069442295	2	.....	.....	.....
S34	N34	N38	40.7	40.6	7.458872	0.0134071605	2	.....	.....	.....
S35	N35	N36	50.568207	50.480019	10.069106	0.008758292	2	.....	.....	.....
S36	N36	N37	50.480019	50.277025	10.233048	0.01983611	2	.....	.....	.....
S37	N37	N38	50.277025	40.6	118.956477	0.08134939	2	.....	.....	.....
S38	N38	N40	40.6	40.5	39.983951	0.0025009653	2	.....	.....	.....
S39	N39	N40	49.369095	40.5	119.252357	0.07437249	2	.....	.....	.....
S40	N40	N42	40.5	40.4	9.803779	0.010200035	2	.....	.....	.....
S41	N41	N42	49.208202	40.4	119.96786	0.07342134	2	.....	.....	.....
S42	N42	N44	40.4	40.3	39.962981	0.002502373	2	.....	.....	.....
S43	N43	N44	49	40.3	119.819292	0.07260941	2	.....	.....	.....
S44	N44	N112	40.3	40.2	11.186155	0.008939486	2	.....	.....	.....
S45	N45	N46	49	48.9	15.7041	0.0063676666	2	.....	.....	.....
S46	N46	N47	48.9	48.231483	14.776096	0.04524321	2	.....	.....	.....
S47	N47	N48	48.231483	46.925709	15.036303	0.08689984	2	.....	.....	.....
S48	N48	N49	46.925709	45.533432	14.956964	0.09308552	2	.....	.....	.....
S49	N49	N50	45.533432	43.839129	20.392407	0.0830752	2	.....	.....	.....
S50	N50	N51	43.839129	42.787246	17.614091	0.081576816	7	.....	.....	.....

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO SWMM

Conforme os comentários feitos anteriormente, a análise de sensibilidade aplicada aos parâmetros do módulo Runoff do SWMM foi elaborada objetivando-se reconhecer a influência desses no volume de pico. É importante lembrar que análise tratada pelo presente item utiliza apenas um evento de precipitação, sendo esse o que apresentou o melhor coeficiente de correlação de Pearson. Vale salientar que os parâmetros analisados foram: número de Manning para as áreas impermeáveis, número de Manning para as áreas permeáveis, armazenamento nas depressões de áreas impermeáveis, armazenamento nas depressões de áreas permeáveis, porcentagem de área impermeável sem armazenamento, parâmetros de infiltração do modelo de Horton;

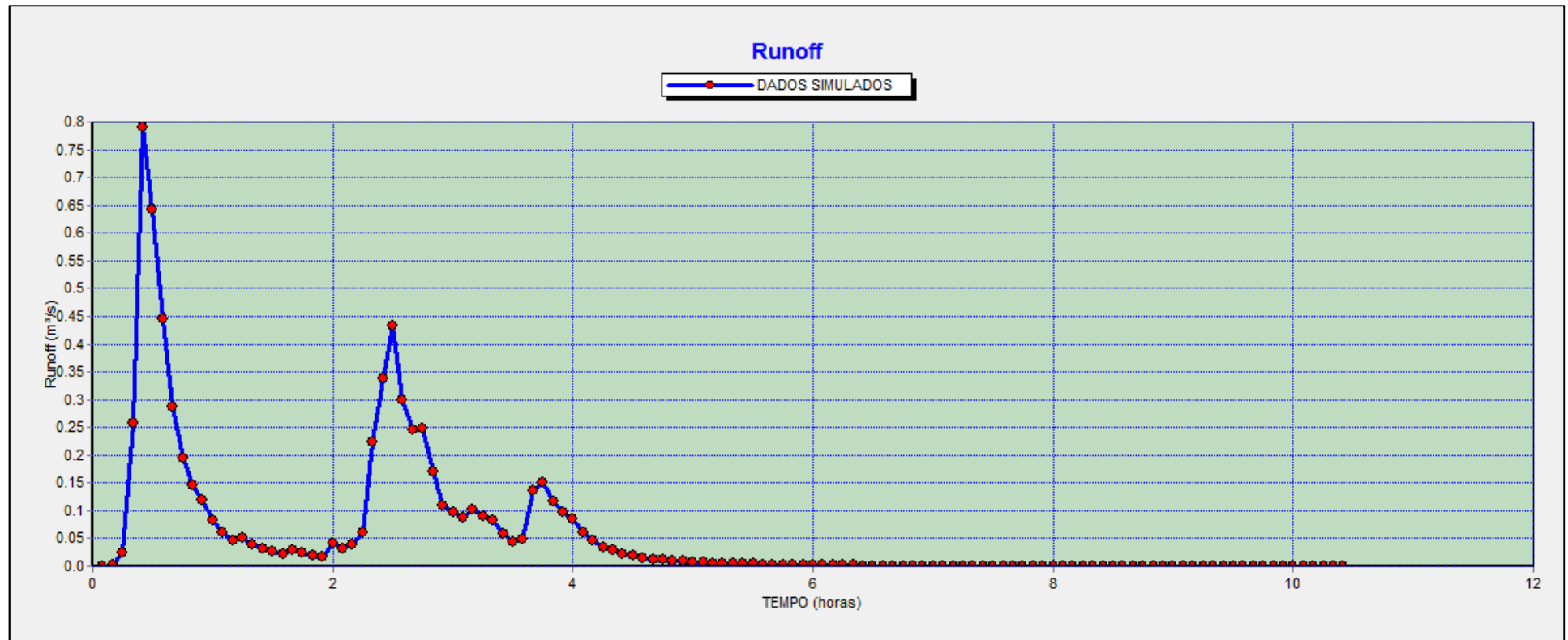
Tratando especificamente do evento de precipitação para a análise de sensibilidade, foi escolhido o de número 11 cuja data de referência é de 30/06/2007 e apresenta um precipitado total de 29,5mm. O resultado da simulação contabilizando as vazões escoadas para o referido evento pode ser observado na Figura 66.

Para avaliar melhor a influência dos parâmetros foram efetivadas observações em três vazões de pico do evento 11, tendo esses as seguintes características:

- Vazão de pico 01: representa o primeiro pico da Figura 66, ocorrendo ao 25º (vigésimo quinto) minuto do tempo de simulação com um valor de 0,791m³/s;
- Vazão de pico 02: representa o segundo pico da Figura 66, ocorrendo às 02:30:00 (duas horas e trinta minutos) em tempo de simulação com um valor de 0,433m³/s;
- Vazão de pico 03: representa o terceiro pico da Figura 66, ocorrendo às 03:45:00 (três horas e quarenta e cinco minutos) em tempo de simulação com um valor de 0,152m³/s;

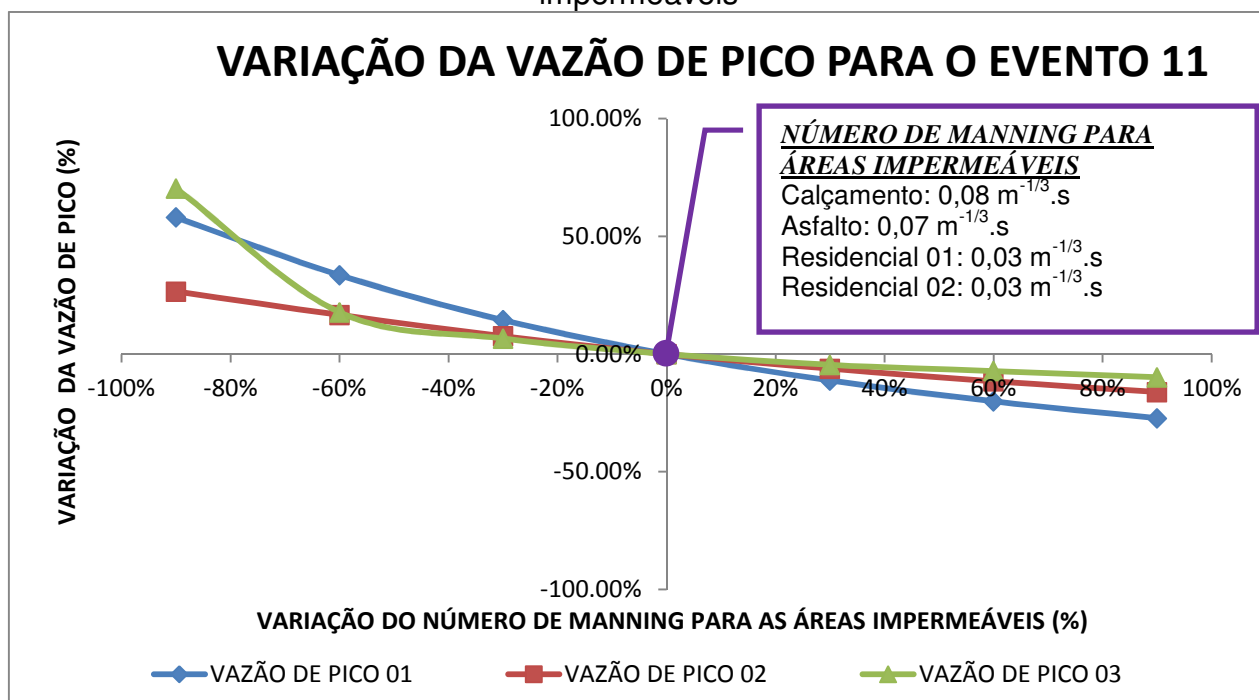
A seguir constam os resultados gráficos (Figura 67 a Figura 77) da análise de sensibilidade para cada um dos parâmetros analisados.

Figura 66 - Resultado das vazões de escoamento superficial para o evento 11 (dados simulados)



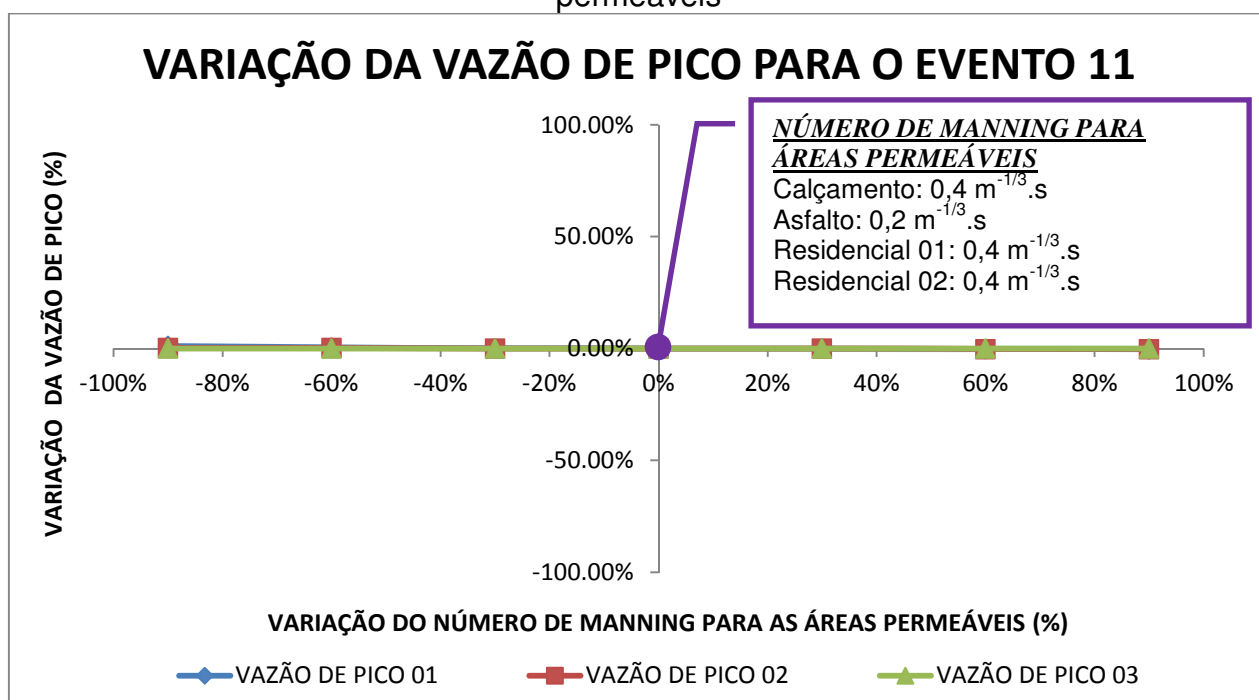
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 67 - Resultado da análise de sensibilidade para o número de Manning das áreas impermeáveis



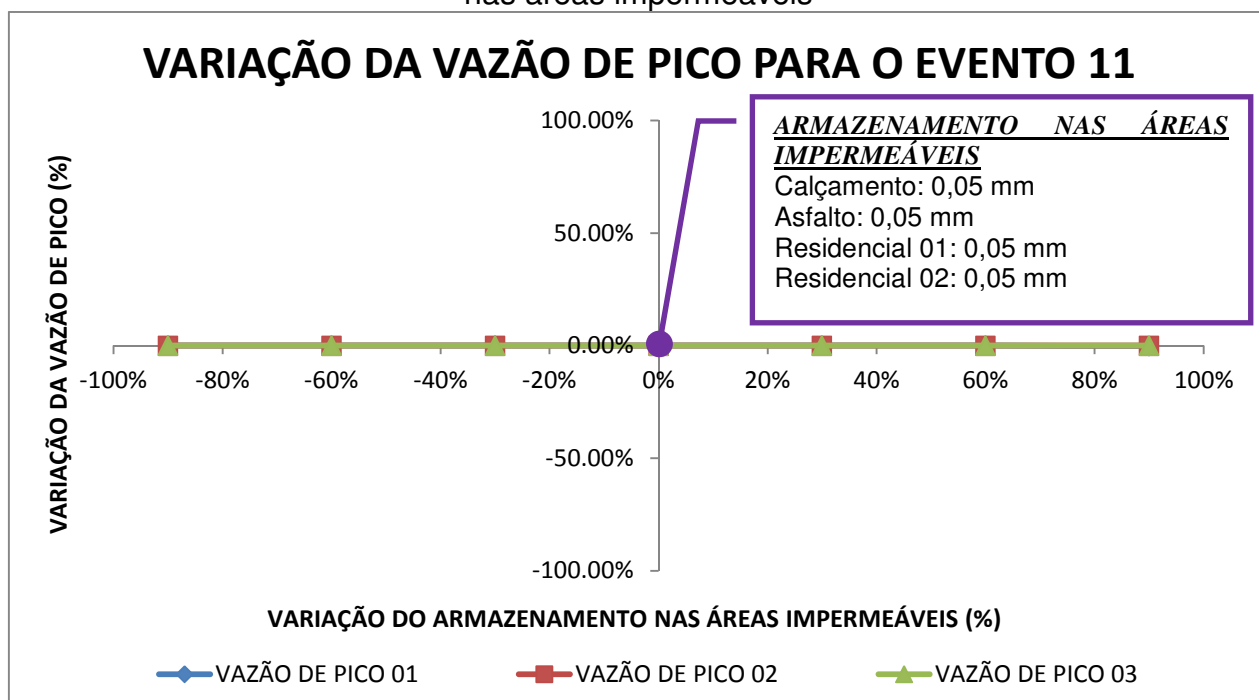
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 68 - Resultado da análise de sensibilidade para o número de Manning das áreas permeáveis



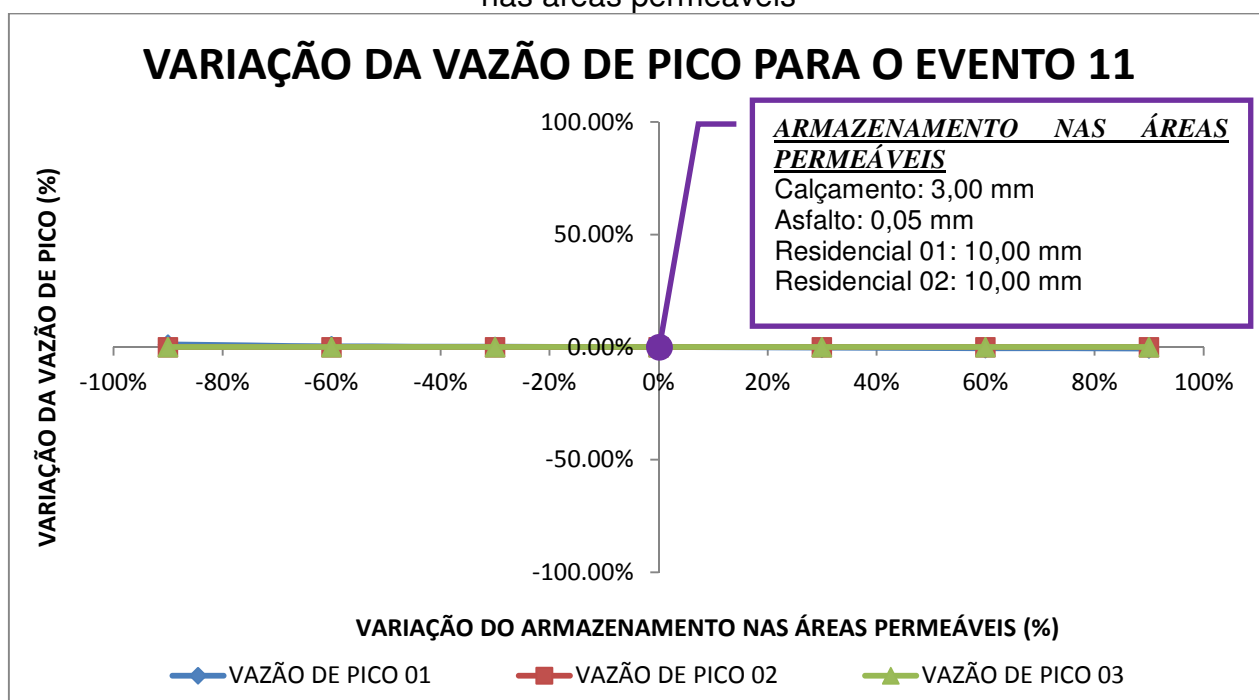
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 69 - Resultado da análise de sensibilidade para a profundidade do armazenamento nas áreas impermeáveis



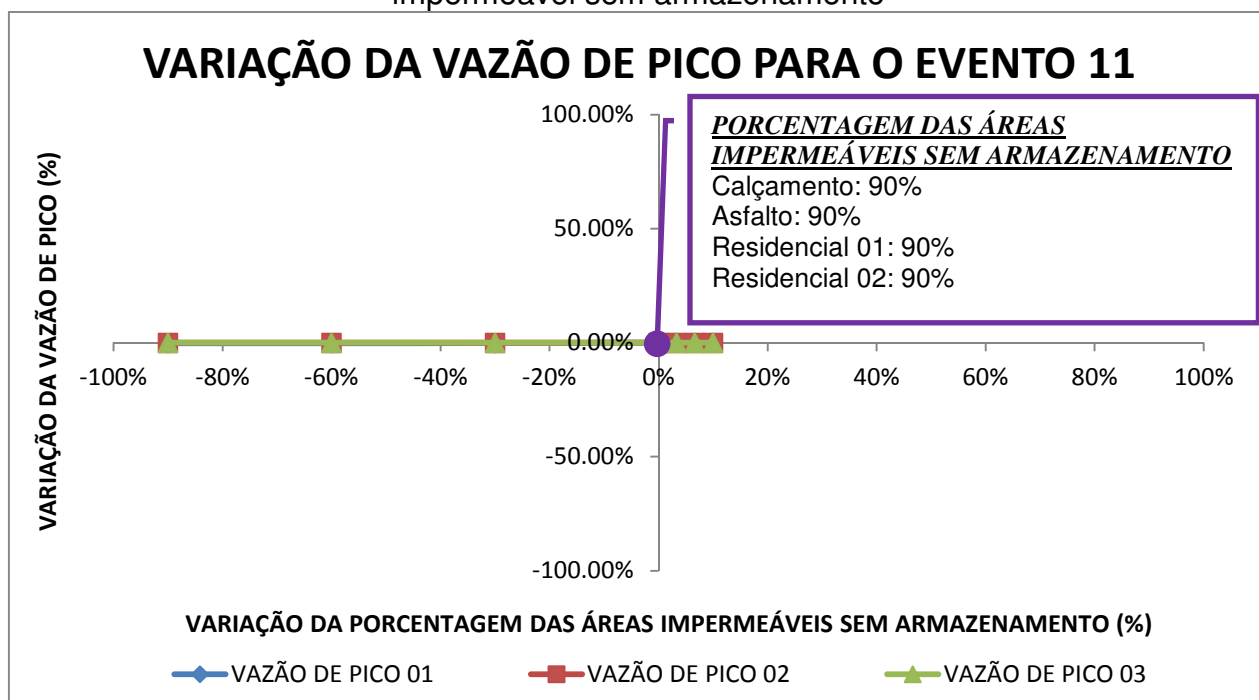
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 70 - Resultado da análise de sensibilidade para a profundidade do armazenamento nas áreas permeáveis



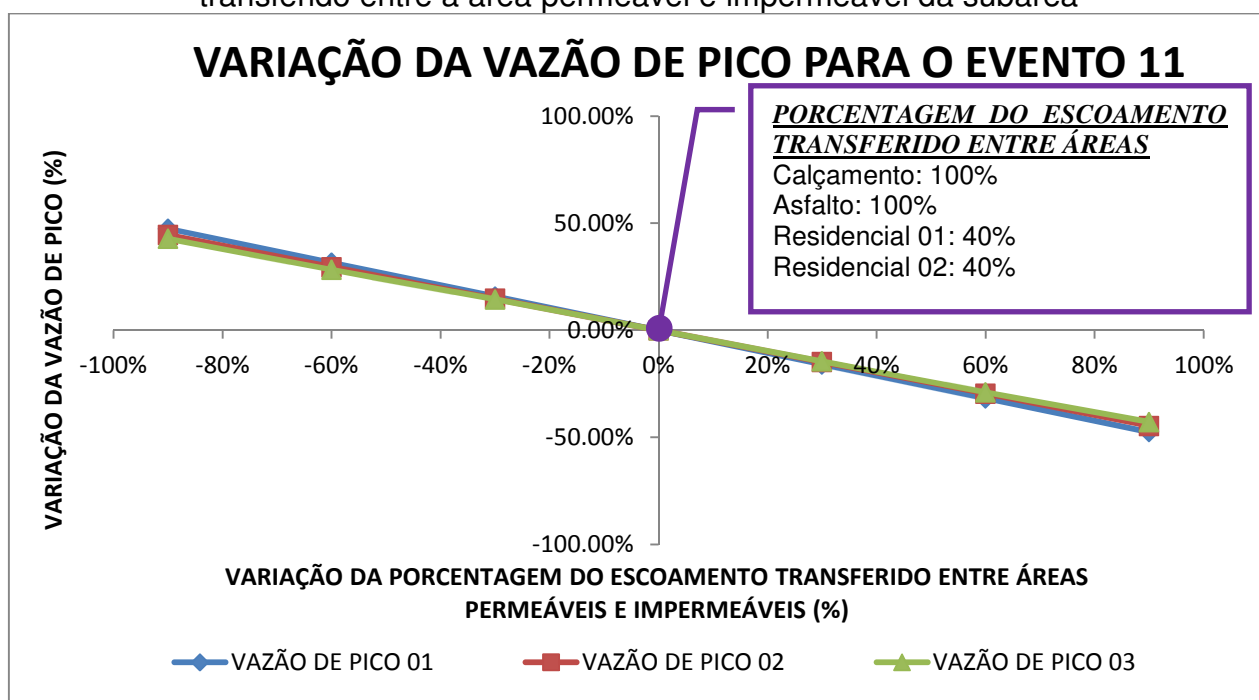
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 71 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem de área impermeável sem armazenamento



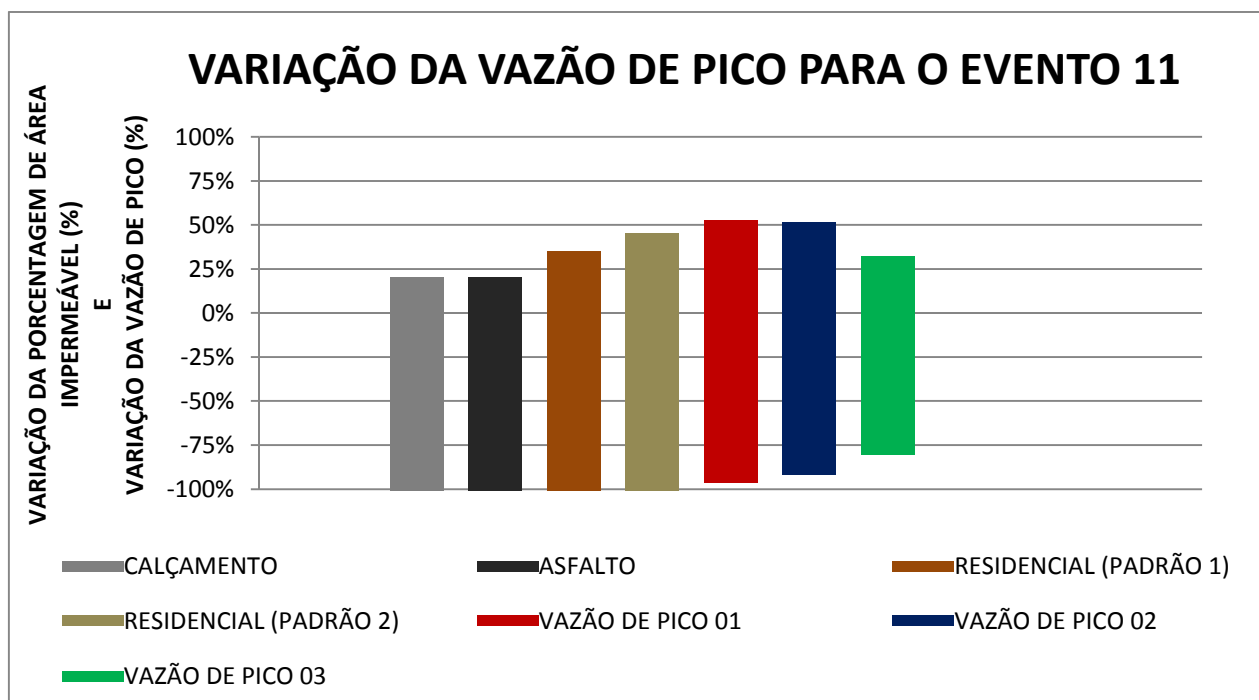
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 72 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem do escoamento transferido entre a área permeável e impermeável da subárea



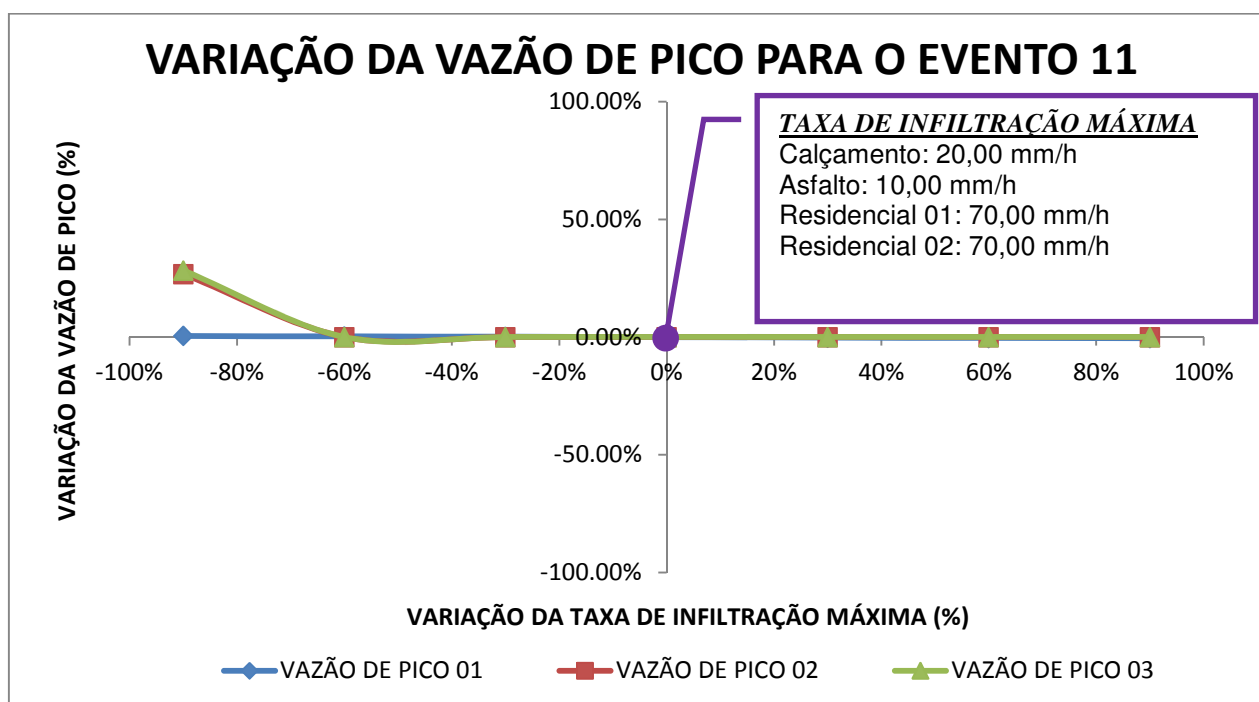
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 73 - Resultado da análise de sensibilidade para a porcentagem de área impermeável



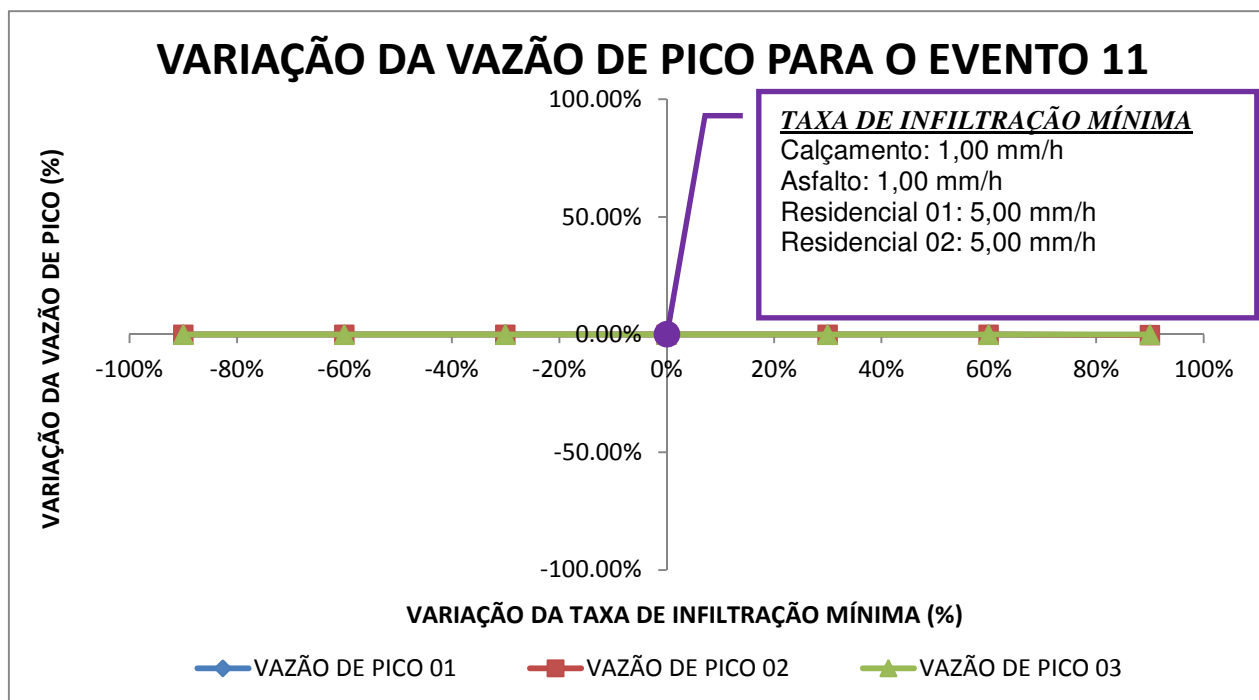
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 74 - Resultado da análise de sensibilidade para a taxa de infiltração máxima



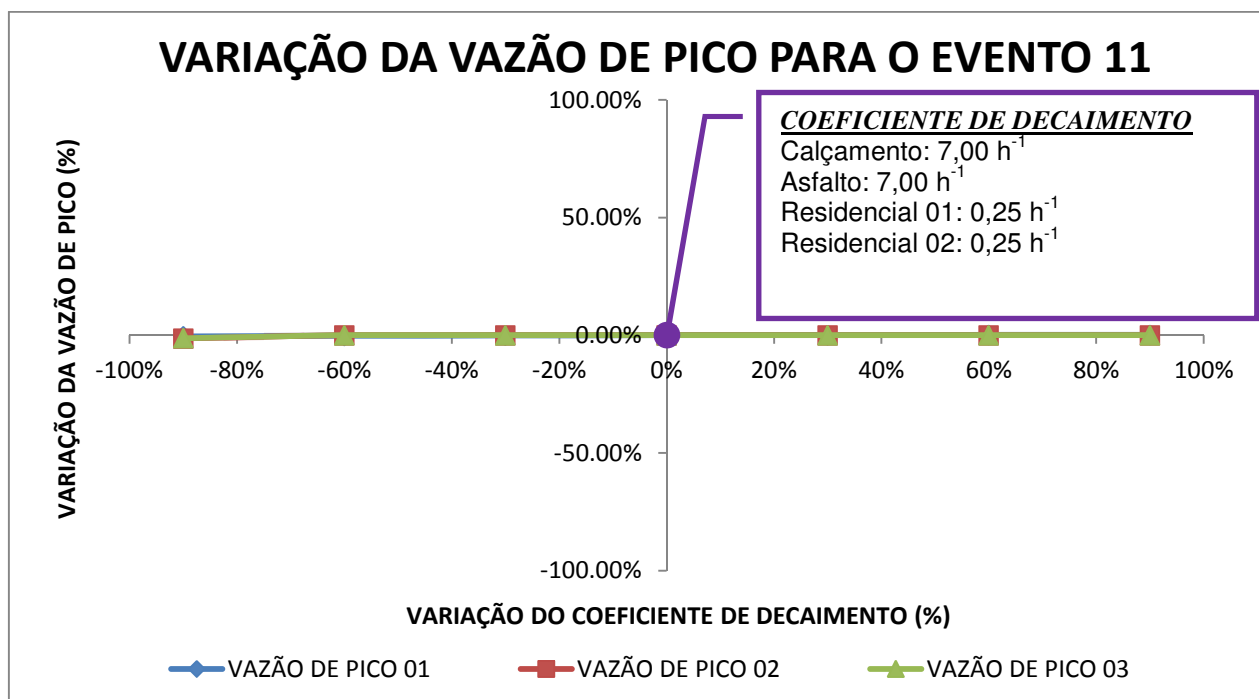
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 75 - Resultado da análise de sensibilidade para a taxa de infiltração mínima



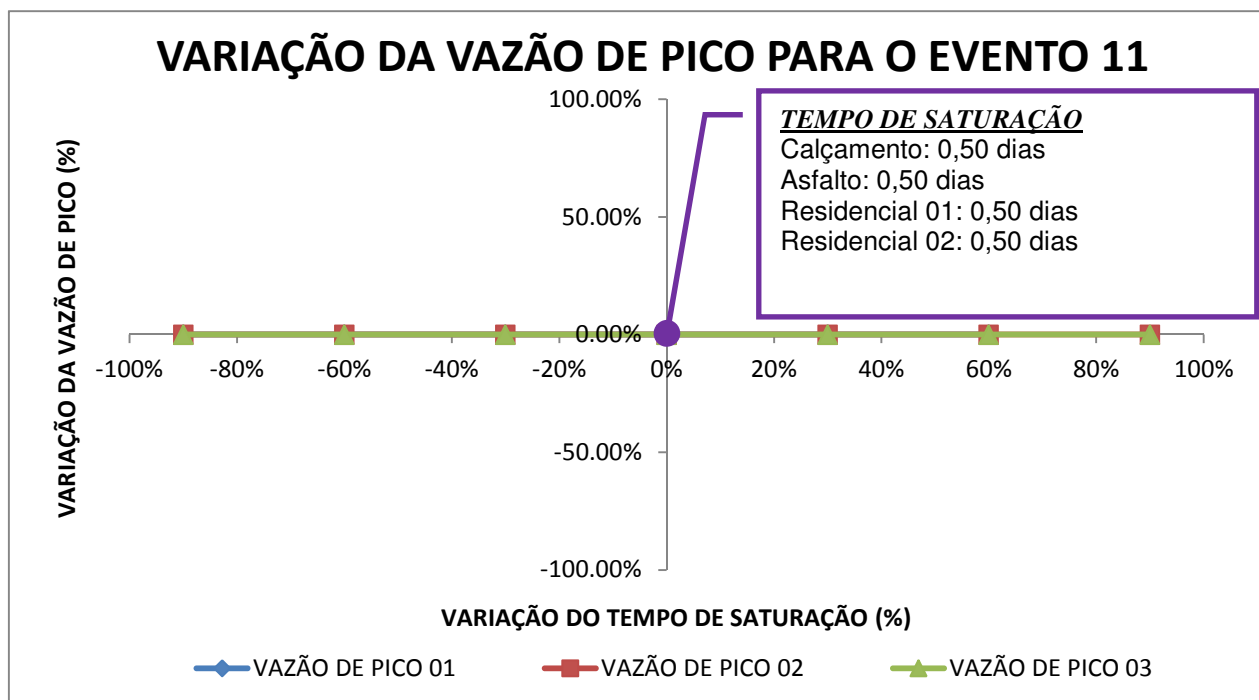
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 76 - Resultado da análise de sensibilidade para o coeficiente de decaimento



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 77 - Resultado da análise de sensibilidade para o tempo de saturação



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

A análise de sensibilidade permitiu demonstrar quais parâmetros apresentam realmente influência sobre as vazões de pico. O resultado demonstrou que existe uma baixa expressividade de uma série de parâmetros quando avaliadas as capacidades de modificar tais vazões. Tendenciosamente é possível explicar esse efeito na justificativa de que a bacia foi considerada como um ambiente em que o nível de impermeabilização é elevado. Em virtude dessa condição, pode-se concordar que parâmetros como número de Manning para áreas permeáveis, taxa de infiltração máxima e mínima, coeficiente de decaimento, tempo de saturação e o armazenamento nas áreas permeáveis tenham pouca representatividade na mudança dos volumes de pico. Em termos quantitativos ficou claro que para maioria desses parâmetros não se chegou a 2% (dois por cento) de alteração dos volumes de pico quando provocada suas variações numa escala de -90% a + 90%. Ressalta-se ainda que praticamente em todos os casos apenas o primeiro pico sofreu modificações.

Deve-se destacar que o armazenamento nas áreas impermeáveis e a porcentagem de área impermeável sem armazenamento também obtiveram baixo significado em termos de sensibilidade. Primeiramente é plausível concordar que esses são parâmetros que estão intimamente relacionados. Evidentemente, uma porcentagem menor de áreas impermeáveis sem armazenamento iria indicar uma maior capacidade de retenção dos volumes escoados, entretanto, quando se observa o valor adotado para o

armazenamento conclui-se que, mesmo para eventos de baixa precipitação, ele representa uma fração pequena com relação ao precipitado total.

Quando as avaliações são voltadas para as observações da sensibilidade de parâmetros como o número de Manning de áreas impermeáveis, porcentagem do escoamento transferido entre as áreas da subárea e a porcentagem de área impermeável percebe-se uma expressividade elevada na capacidade de modificação das vazões de pico. É importante relatar que essas modificações ocorrem para os três picos que foram considerados como pontos de análise. Dentro do âmbito quantitativo, vale ressaltar a sensibilidade desses parâmetros da seguinte forma:

- Número de Manning para áreas impermeáveis:
 - Variações máximas:
 - 58,03% a -27,31% para o primeiro pico;
 - 26,56% a -16,17% para o segundo pico;
 - 70,39% a -9,87% para o terceiro pico;
- Porcentagem do escoamento transferido entre as áreas da subárea:
 - Variações máximas:
 - 47,41% a -47,53% para o primeiro pico;
 - 44,57% a -44,57% para o segundo pico;
 - 42,76% a -42,76% para o terceiro pico;
- Porcentagem de área impermeável:
 - Variações máximas:
 - -81,29% a -37,67% para o primeiro pico;
 - -76,91% a 36,49% para o segundo pico;
 - -65,13% a -17,11% para o terceiro pico;

Com relação ao número de Manning para áreas impermeáveis a explicação para a amplitude das variações observadas está embasada na maneira como o SWMM contabiliza os volumes escoados. A equação explicitada anteriormente na Figura 41 esclarece que o número de Manning é inversamente proporcional a vazão, justificando, portanto, os resultados encontrados.

Para a porcentagem de área impermeável é fácil concordar que alterações desse percentual contribuem para uma expressividade maior dos demais parâmetros segundo duas vertentes, sendo elas: aumento da sensibilidade para os que representam áreas permeáveis em função da diminuição da porcentagem de área impermeável, fato esse que justificaria a diminuição dos volumes escoados em virtude da influência de

fenômenos como a infiltração e retenção, e, de maneira inversa, a translação da sensibilidade para os que caracterizam áreas impermeáveis, esclarecendo dessa forma o aumento dos volumes escoados tanto pela baixa influência das questões de infiltração e retenção como pelo simples surgimento de mais superfícies impermeáveis.

A última avaliação elaborada na análise de sensibilidade recai sobre as constatações feitas a respeito da porcentagem do escoamento transferido entre as áreas de uma subárea. Na Figura 41 também foi especificado que o SWMM compreende cada subárea como sendo uma unidade discretizada em três outras áreas. Nesse contexto, a maneira como os escoamentos são transferidos entre essas áreas influencia fortemente no volume total escoado pelo sistema. Cabe lembrar que para as áreas residenciais de padrão 1 e 2 na bacia foi determinado o método “PERVIOUS” para justificar a transferência dentro da subárea. De acordo com esse método os escoamentos originados nas áreas impermeáveis passam posteriormente para a área permeável e em sequência são direcionados ao exutório da sub-bacia. A quantidade dessa transferência é justamente controlada pelo parâmetro em questionamento. Portanto, ao considerar que uma baixa porcentagem do escoamento originado na área impermeável vai para a área permeável significa concordar que a maior parcela está indo diretamente para o exutório da sub-bacia. Nesse sentido espera-se que a imposição de menores valores para o elemento em análise sugira maiores volumes escoados pelo sistema (bacia) ocorrendo o inverso caso valores maiores sejam adotados.

7.2. RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DO SWMM

O resultado da calibração do SWMM demonstrou ajustes razoáveis quando observados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson para os eventos selecionados. O referido coeficiente variou de 0,94 a 0,96, apresentando uma média de 0,95. A Tabela 37 expõe tais considerações de acordo com o evento.

Tabela 37 – Resultado do coeficiente de correlação de Pearson por evento selecionado

Nº DO EVENTO	DATA DE REFERÊNCIA	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO
9 e 10	27/06/2007	0,94
11	30/06/2007	0,96
15, 16 e 17	22/07/2007	0,95
20, 21 e 22	20/08/2007	0,93
-----	08/06/2008	0,95

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Com relação aos parâmetros que caracterizam as subáreas e as questões de infiltração através do modelo de Horton, constataram-se as seguintes médias para a bacia em termos globais:

- Porcentagem de área impermeável = 85%;
- Número de Manning para área impermeável = $0,064 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$;
- Número de Manning para área permeável = $0,35 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$;
- Armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis = 0,05 mm;
- Armazenamento nas depressões das áreas permeáveis = 6 mm;
- Porcentagem de área permeável sem armazenamento = 90%;
- Taxa de infiltração máxima = 42.5 mm/h;
- Taxa de infiltração mínima = 3 mm/h;
- Coeficiente de decaimento = $3,62 \text{ h}^{-1}$;
- Tempo de saturação = 0,5 dias;

Os valores demonstrados da Tabela 38 a Tabela 47 explicitam o resultado da calibração dos parâmetros que caracterizam as subáreas bem como os processos de infiltração por evento selecionado. A Tabela 48 e a Tabela 49 fornecem as médias dos parâmetros por subárea considerando os cinco eventos avaliados.

Tabela 38 – Resultado da calibração dos parâmetros do SWMM para o evento 9 e 10

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIAL (PADRÃO 1)	66	80	0,07	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,07	0,4	0,05	10	90

Tabela 39 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 9 e 10

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIAL (PADRÃO 1)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

Tabela 40 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 11

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIAL (PADRÃO 1)	66	80	0,03	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,03	0,4	0,05	10	90

Tabela 41 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 11

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIAL (PADRÃO 1)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

Tabela 42 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 17, 18 e 19

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	80	0,07	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,07	0,4	0,05	10	90

Tabela 43 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 17, 18 e 19

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

Tabela 44 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento 22, 23 e 24

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	80	0,03	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,03	0,4	0,05	10	90

Tabela 45 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 22, 23 e 24

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

Tabela 46 – Resultado da calibração dos parâmetros de caracterização das subáreas do SWMM para o evento do dia 08/06/2008

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	80	0,07	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,07	0,4	0,05	10	90

Tabela 47 – Resultado da calibração dos parâmetros de infiltração do SWMM para o evento 22, 23 e 24

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIA (PADRÃO)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (MISTO)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

Tabela 48 – Média geral dos parâmetros por subárea

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL	Nº DE MANNING ÁREA IMPERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	Nº DE MANNING ÁREA PERMEÁVEL ($m^{-1/3}.s$)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS IMPERMEÁVEIS (mm)	PROFUNDIDADE DE ARMAZENAMENTO NAS DEPRESSÕES DAS ÁREAS PERMEÁVEIS (mm)	% DE ÁREA IMPERMEÁVEL SEM ARMAZENAMENTO
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	95	0,08	0,4	0,05	3	90
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	95	0,07	0,2	0,05	0,05	90
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	80	0,054	0,4	0,05	10	90
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	70	0,054	0,4	0,05	10	90

Tabela 49 – Média geral dos parâmetros de infiltração por subárea

TIPO DE SUBÁREA	TOTAL DE ÁREAS	MODELO DE INFILTRAÇÃO	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA (mm/h)	TAXA DE INFILTRAÇÃO MÍNIMA (mm/h)	COEFICIENTE DE DECAIMENTO (1/h)	TEMPO DE SATURAÇÃO (dias)	VOLUME MÁXIMO DE INFILTRAÇÃO (mm)
ARRUAMENTOS (CALÇAMENTO)	70	HORTON	20	1	7	0,5	NÃO APLICADO
ARRUAMENTOS (ASFALTO)	5	HORTON	10	1	7	0,5	NÃO APLICADO
RESIDÊNCIA (PADRÃO 1)	66	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO
RESIDENCIAL (PADRÃO 2)	7	HORTON	70	5	0,25	0,5	NÃO APLICADO

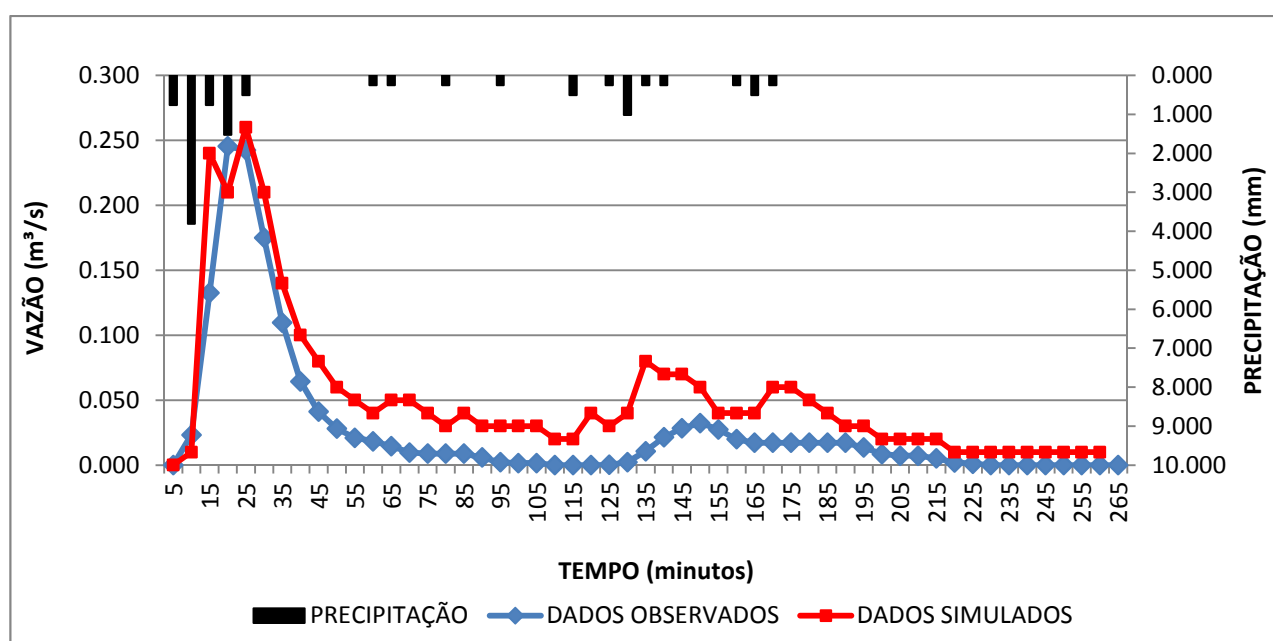
É plausível concordar que os resultados obtidos para os parâmetros após a calibração não necessariamente representam o melhor conjunto de dados, tendo-se em mente que não foi possível testar uma quantidade maior de agrupamentos que fossem capazes de reproduzir o resultado observado. Evidentemente, testes em maiores escalas precisariam de ferramentas/algoritmos que auxiliassem no processo de calibração.

Embora esforços mais rebuscados não tenham sido efetivados para a calibração do SWMM, pode-se perceber que os resultados diagnosticam uma certa realidade da bacia. Essa realidade é percebida principalmente quando as questões do nível de impermeabilização da área em estudo são avaliadas, ou seja, resultados como os que foram demonstrados para a porcentagem de área impermeável na Tabela 48 quando comparados analogamente aos levantamentos da Figura 42, podem ser considerados, dentro de certas proporções, aceitáveis.

Deve-se destacar que o critério de seleção dos eventos para a execução da calibração do SWMM foi justificado pela tentativa de observar o comportamento final dos parâmetros em função de precipitações com diferentes magnitudes. O produto da calibração demonstrou que não há uma variação significativa dos parâmetros em função dos eventos analisados. Esse é um contexto que reforça o fato de que a bacia apresenta um nível elevado de impermeabilização.

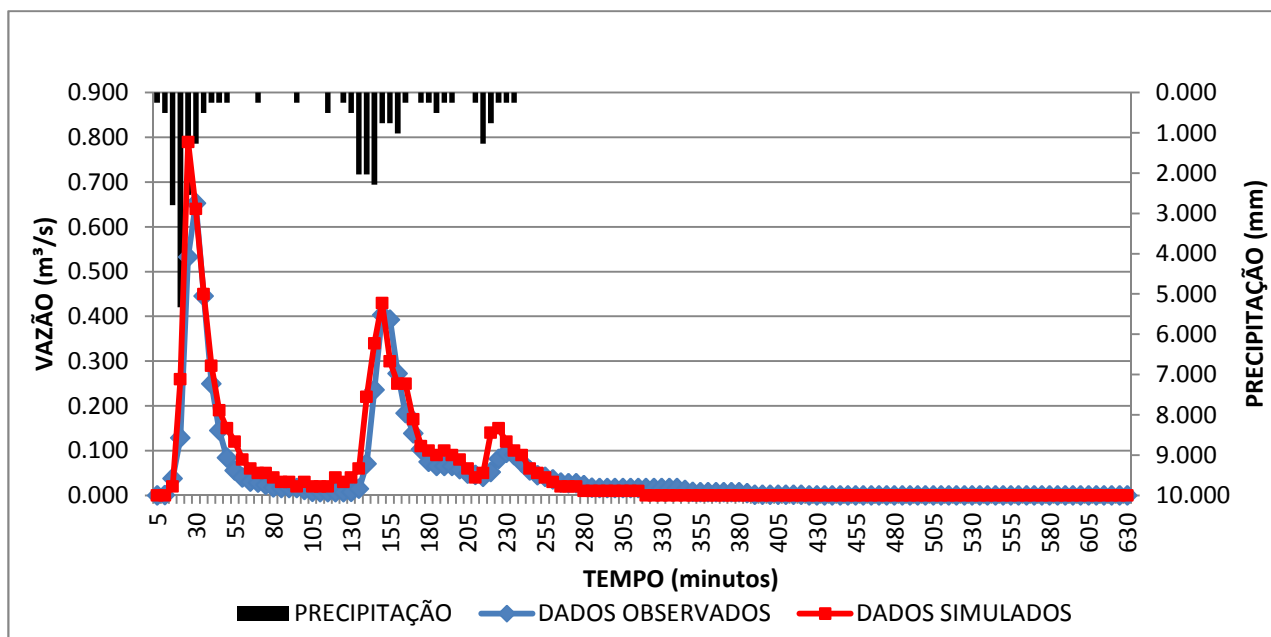
Com os ajustes proporcionados pela calibração foi possível gerar os gráficos presentes nas Figura 78 a Figura 82, onde constam as plotagens dos resultados observados e os simulados com os respectivos coeficientes de correlação de Pearson.

Figura 78 – Resultado para o evento 9 e 10 (correlação = 0,94)



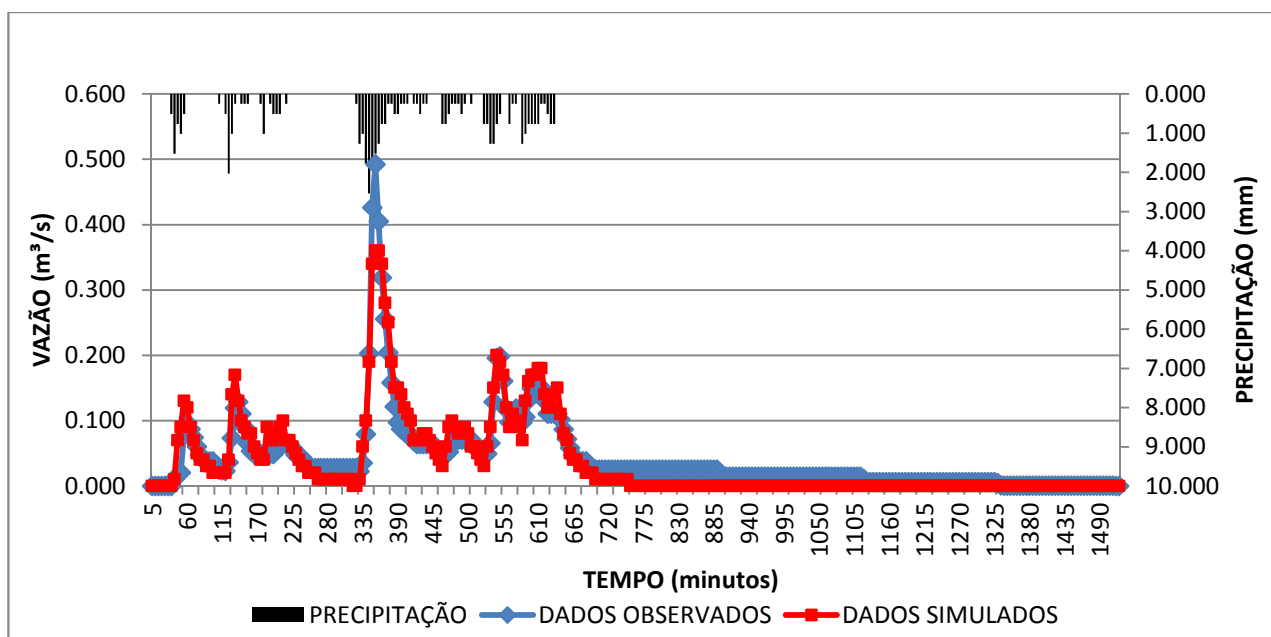
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 79 – Resultado para o evento 11 (correlação = 0,96)



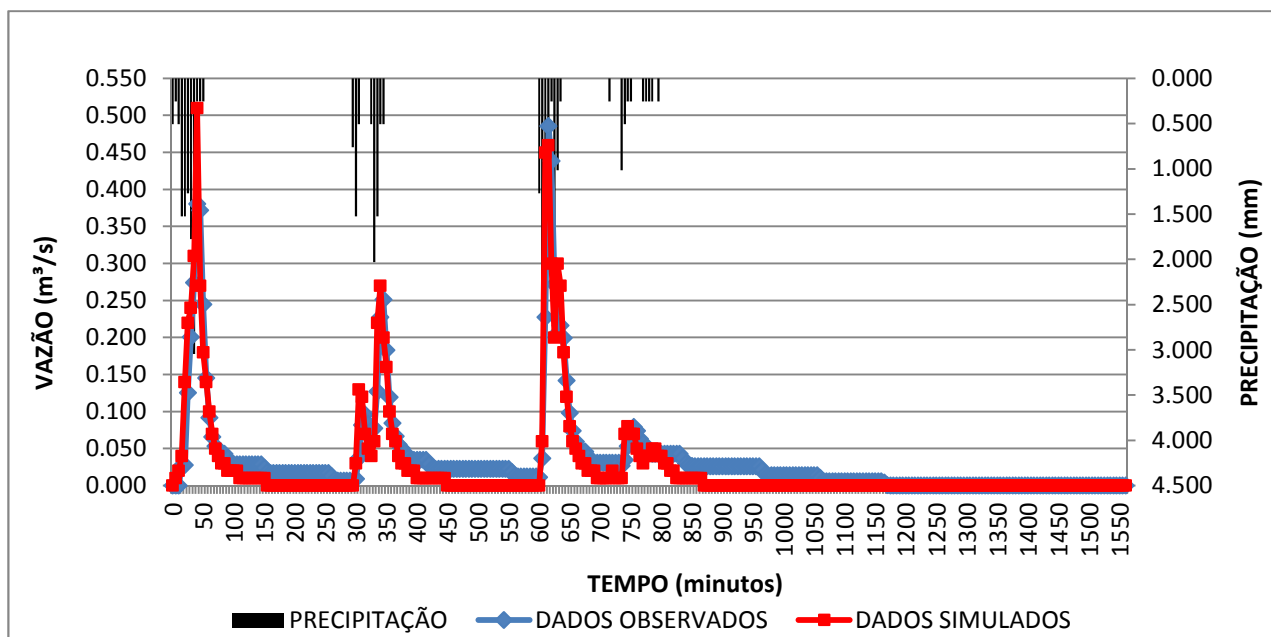
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 80 – Resultado para o evento 15, 16 e 17 (correlação = 0,95)



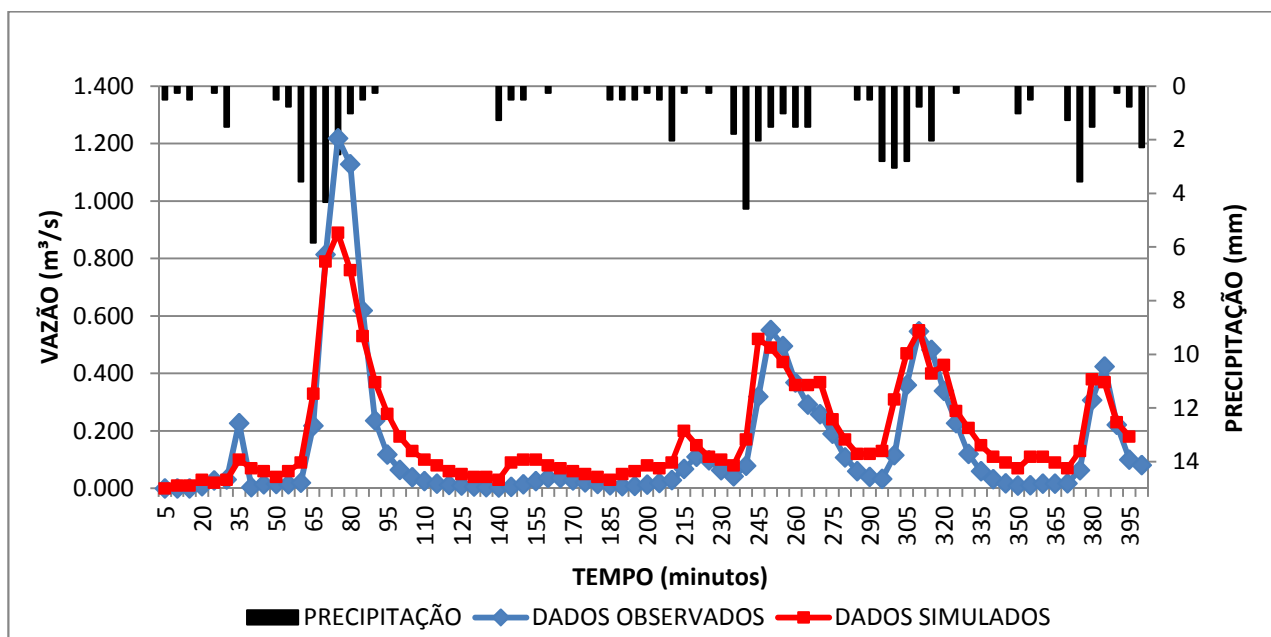
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 81 – Resultado para o evento 20, 21 e 22 (correlação = 0,93)



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 82 – Resultado para o evento do dia 08/06/2008 (correlação = 0,95)



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

7.3. RESULTADO DA SIMULAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA ATRAVÉS DO SWMM

Antes de apresentar os resultados das simulações no âmbito quali-quantitativo é importante lembrar que os dados e procedimentos empregados no presente estudo para o desencadeamento da modelagem foram executados com o intuito de gerar conclusões do ponto de vista acadêmico sobre o comportamento da poluição difusa na bacia. Outra ideia é de se poder formular diretrizes buscando-se melhores orientações no processo de monitoramento e modelagem de tal fenômeno. Esses argumentos levam em conta uma série de problemáticas vivenciadas durante as coleta de dados do projeto MAPLU e a própria complexidade atribuída às questões de transferência das interações entre a poluição difusa e a bacia para o ambiente computacional.

Dentre todos os eventos demonstrados pela Tabela 11 escolheu-se 03 (três) deles para o desencadeamento das simulações. Para dispensar maiores atividades de calibração em virtude dos eventos selecionados, optou-se por empregar os mesmos parâmetros que foram obtidos pelo item 7.2. Nesse contexto, os eventos especificados para as análises quali-quantitativas são associados aos que foram calibrados no item 7.2 através de uma equivalência entre a precipitação total. A Tabela 50 mostra o resultado dessas associações.

Tabela 50 – Associações entre os eventos quali-quantitativos e quantitativos em função da precipitação total

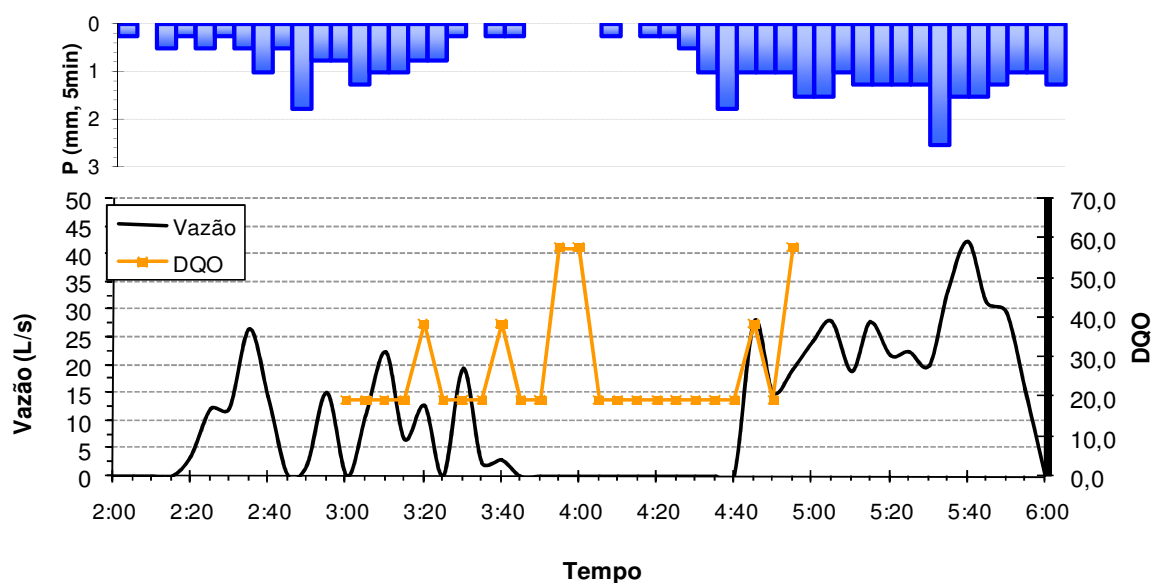
DATA DO EVENTO QUALI- QUANTITATIVO	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	DATA DO EVENTO QUANTITATIVO	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)
30/05/2008	33,27	30/06/2007	29,50
09/07/2008	17,52	27/06/2007	11,7
25/07/2008	50,80	22/07/2007	47,50

FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Os dados apresentados pela Tabela 12 foram utilizados para representar um diagnóstico da distribuição do poluente DQO na área da bacia. Entretanto, por problemas operacionais evidenciados durante o funcionamento dos coletores distribuídos, esses dados não serão utilizados para as avaliações do comportamento temporal desse poluente durante um evento. O mesmo vale para os dados registrados pelo amostrador automático da ISCO (item 4.3.2), tendo-se em vista que o final do período chuvoso não permitiu a realização dos ajustes necessários para o correto emprego do amostrador.

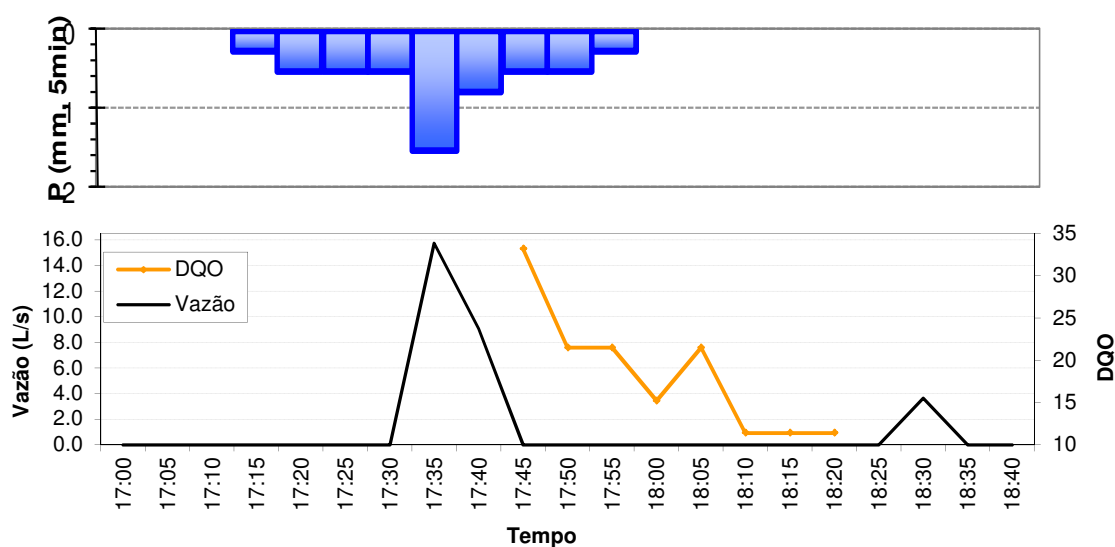
Diante dessas condições as informações sobre a avaliação temporal da DQO, obtidas pelo projeto MAPLU, são usadas no presente trabalho apenas no contexto de análise crítica. Nesse âmbito, não será efetivado maiores comparações entre os valores observados e os simulados. A Figura 83 e a Figura 84 mostram o resultado da variação da DQO para dois eventos monitorados durante a vigência do projeto MAPLU.

Figura 83 – Dados observados para a variação da DQO durante o evento do dia 17/06/2008 (entrada da lagoa)



FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Figura 84 – Dados observados para a variação da DQO durante o evento do dia 06/08/2008 (entrada da lagoa)



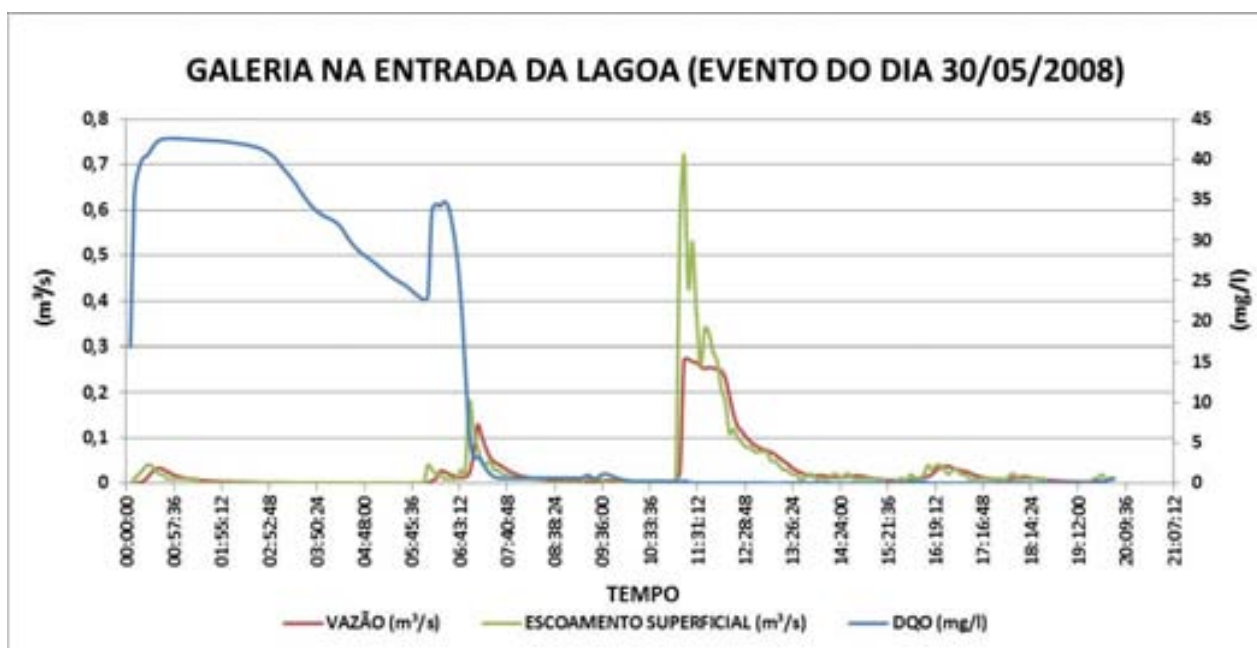
FONTE: Adaptado de RIGHETTO *et al.*, 2009

Uma apreciação dos resultados explicitados pela Figura 83 e a Figura 84 demonstra que existe um comportamento pouco previsível da DQO. Períodos em que a vazão é nula apresentam pulsos da concentração desse elemento, registrando-se ainda defasagens entre picos de vazão e a DQO. Além do problema técnico no que diz respeito ao tempo de amostragem, destaca-se a possibilidade da condição de afogamento permanente da linha de sucção do coletor automático no tanque de acumulação presente na entrada da lagoa. Nesse caso, amostras repetidas podem ter sido retiradas condicionando resultados discrepantes em relação ao esperado para o período. Tais percepções levam a concordar que fatores como instrumentação e a sistemática de monitoramento são determinantes para a compreensão da poluição difusa na bacia e evidentemente no ajuste/desenvolvimento do fenômeno no âmbito da modelagem.

A presença de picos de concentração do poluente em períodos de baixa vazão não pode ser vista rigorosamente como um resultado incoerente. Cabe ressaltar que, diante do ponto de vista da compreensão da poluição difusa, o poluente pode estar difundido com distintas concentrações por toda a área da bacia. Nesse contexto é plausível associar que, na medida em que ocorre a propagação durante os eventos de precipitação as áreas podem apresentar processos de contribuição particulares, onde a retenção, presença de sedimentos, características físicas como a topografia e o tipo de material da superfície são elementos capazes de níveis de contribuição do poluente e, evidentemente, justificar a ocorrência dos pulsos/picos no polutograma.

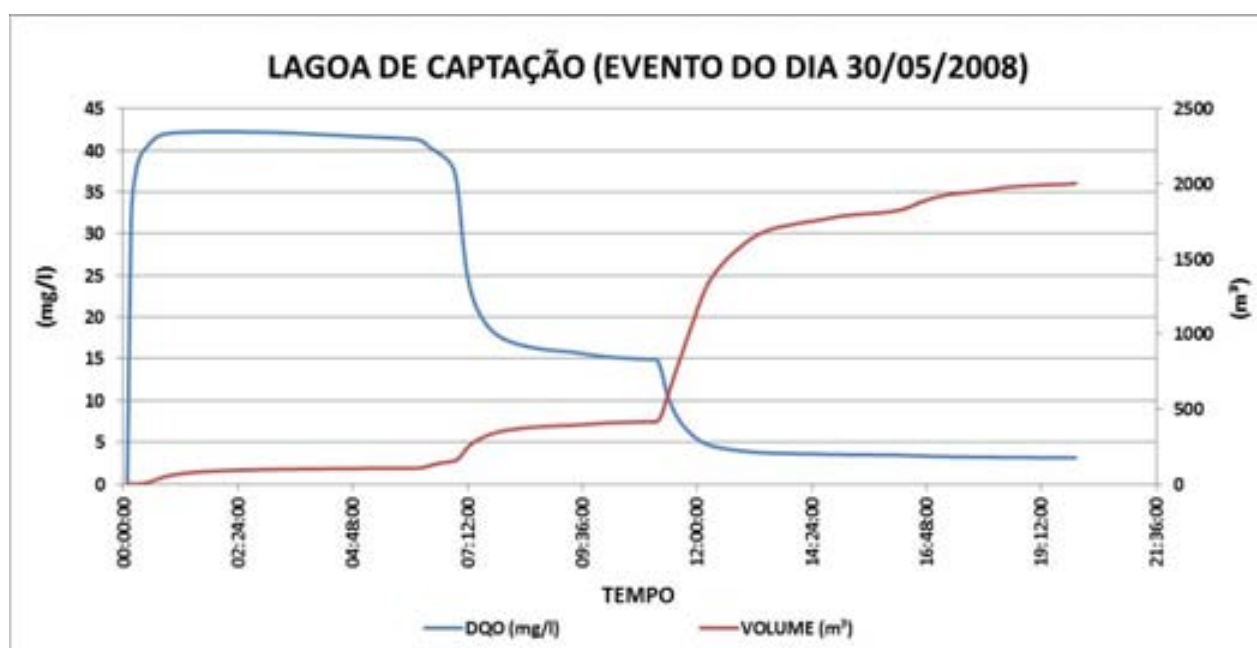
Para poder observar o comportamento dos resultados simulados optou-se por analisar a variação da DQO na galeria de entrada da lagoa e na própria lagoa de captação de águas pluviais. Essa definição representa uma tentativa de avaliação da propagação da DQO na área da bacia durante a lavagem de suas superfícies em virtude dos eventos de precipitação. Os gráficos apresentados da Figura 85 a Figura 90 expressam os resultados simulados pelo SWMM em termos de variação da DQO.

Figura 85 – Dados simulados para a variação da DQO durante o evento do dia 30/05/2008 (entrada da lagoa)



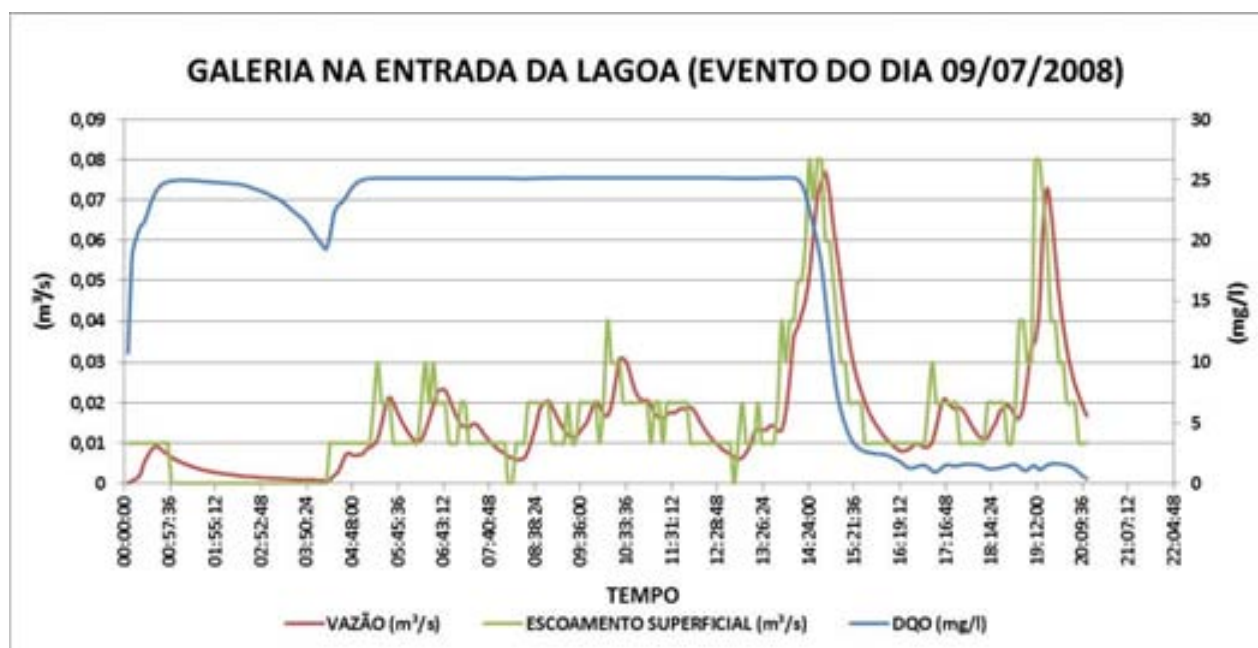
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 86 – Dados simulados para a variação da DQO durante o evento do dia 30/05/2008 (lagoa de captação)



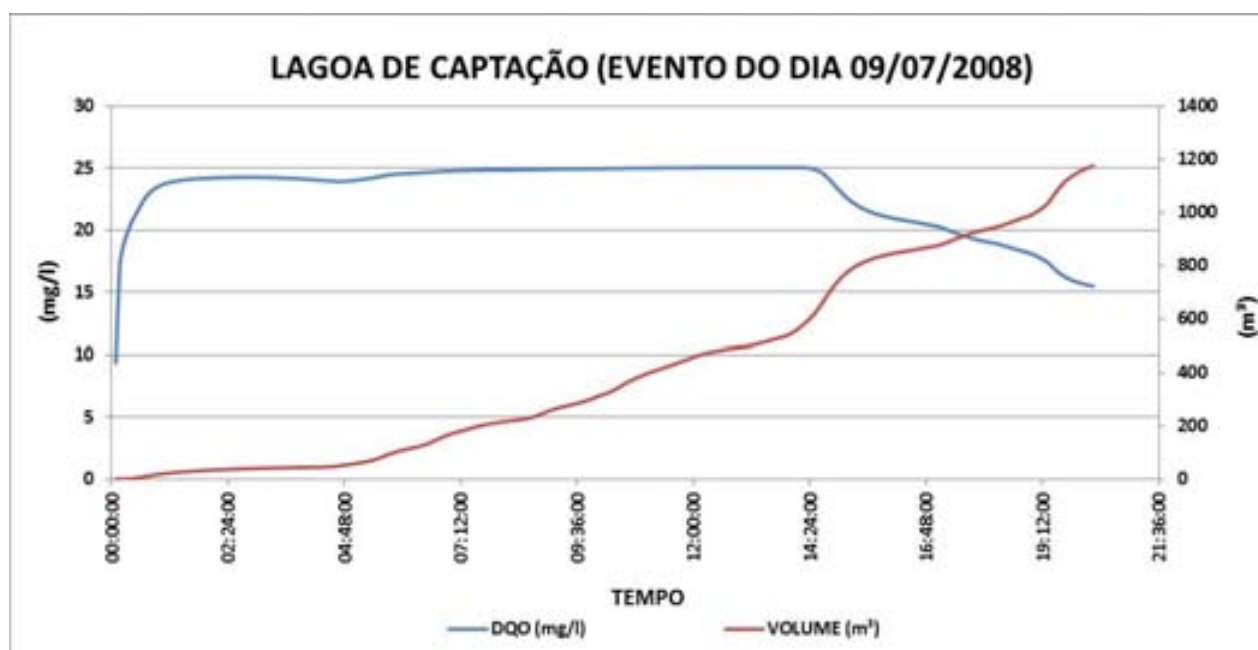
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 87 – Dados simulado para a variação da DQO para o evento do dia 09/07/2008
(entrada da lagoa)



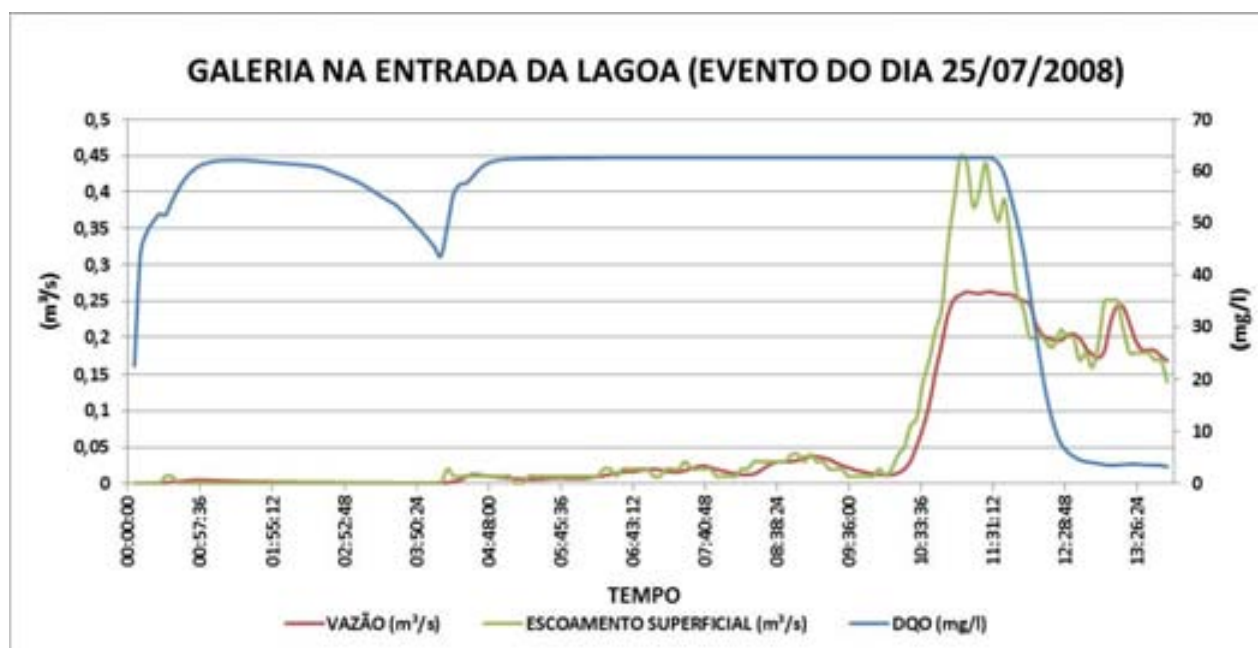
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 88 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 09/07/2008
(lagoa de captação)



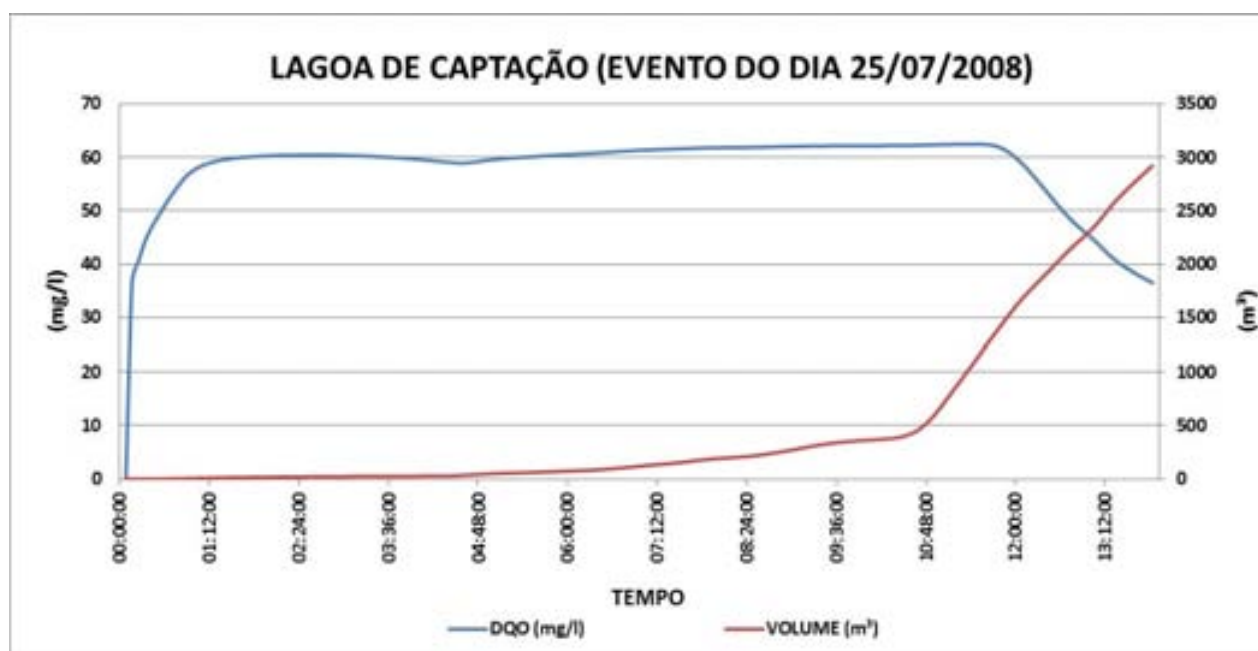
FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 89 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 25/07/2008 (entrada da lagoa)



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

Figura 90 – Dados simulados para a variação da DQO para o evento do dia 25/07/2008 (lagoa de captação)



FONTE: ARQUIVO PESSOAL

O que se pode constatar a partir dos gráficos (Figura 85 a Figura 90) é que o resultado representa comportamento coerente quando se observa exclusivamente os equacionamentos que foram propostos para modelar a deposição seca e a deposição

úmida. Essa afirmação leva em conta que, baseando-se numa compreensão global da poluição difusa, o esperado para as primeiras águas de escoamento superficial é que essa apresente maiores concentrações da carga de poluente, tendo-se em vista que o início do escoamento promove a lavagem das superfícies (telhados, calçadas, arruamentos etc) carreando uma parcela significativa desses. Esse fato justifica a ascensão da concentração da DQO presenciada nos gráficos durante os primeiros minutos dos eventos simulados.

Um aspecto importante a destacar é que para todos os gráficos (Figura 85 a Figura 90) existe um respeito aos limites de EMC (Concentração Média no Evento) de acordo com o evento simulado. Em outras palavras, o valor da concentração da DQO não ultrapassa o que foi estabelecido para a EMC do evento mesmo com a continuidade da produção do escoamento superficial. Tal resultado não pode ser simplesmente compreendido como representativo das condições reais, visto que a bacia pode apresentar processos aleatórios de contribuição por parte dos poluentes que venham a provocar o surgimento de picos/pulsos no polutograma, incluindo situações em que esses pulsos ultrapassam o valor estabelecido para a EMC.

Para o caso da lagoa de captação de águas pluviais, os resultados indicam, de certa maneira, uma relação simples entre o volume armazenado e a concentração da DQO. Nessa relação, durante os primeiros períodos de simulação os volumes retidos na lagoa continuam tendo a maior parcela da carga de poluentes. A estabilidade do nível da DQO é atribuída à manutenção da produção de escoamento superficial nas ocasiões em que a lavagem das superfícies da bacia ainda não foi capaz de promover a remoção da maior parcela dos poluentes. Evidentemente, conforme já comentado, o SWMM emprega o valor definido para a EMC como limitador da concentração do poluente na água de escoamento superficial. Já para os momentos onde se observa o declínio brusco da DQO, pode-se recorrer ao fato de que a redução da concentração é função do volume total armazenado, agregando-se ainda o entendimento de que após a primeira carga de lavagem ocorram menores contribuições por parte dos poluentes.

8. CONCLUSÃO

No que diz respeito ao levantamento dos dados obtidos com o desenvolvimento do projeto MAPLU, ressalta-se que as informações adquiridas permitem formular novas diretrizes para a consolidação dos estudos futuros. Tal afirmação advém do fato de que o desenvolvimento do projeto promoveu a sistematização das atividades de monitoramento bem como das reflexões sobre o comportamento da poluição difusa na bacia. As complexidades envolvidas na elaboração/utilização de dispositivos para a obtenção do comportamento das variáveis hidrológicas e as análises das extensas relações chuva-vazão-poluente, permitiram o amadurecimento necessário para o planejamento das atividades subsequentes.

Em linhas gerais, toda a base informacional obtida pelos estudos diretos e indiretos do projeto MAPLU concretiza os primeiros anseios de se levantar parâmetros capazes de refletir aspectos das condições locais, amparando fortemente a inserção das práticas de modelagem. Nesse contexto, tratando-se aqui mais especificamente do SWMM, pode-se afirmar que o modelo pode ser tomado como ferramenta capaz de subsidiar a tomada de decisões no âmbito quantitativo. Os parâmetros calibrados refletem, por exemplo, que o grau de impermeabilização da bacia responde pela rápida formação de deflúvios mesmo em condições de baixo volume precipitado. E em decorrência, ressalta a importância da adoção de atividades de manejo como é o caso das medidas de controle na fonte. O modelo proposto nessa Dissertação está intimamente conectado a essa afirmação, tendo-se em mente que uma das propostas de seu desenvolvimento é a de permitir a adoção de práticas de manejo no interior dos lotes da bacia.

O modelo proposto ainda precisa de pequenos aprimoramentos antes de ser devidamente empregado para representar as relações chuva-deflúvio. O mesmo pode-se dizer da possibilidade de implementar posteriormente módulos para gerar avaliações no âmbito quali-quantitativo. Mesmo em estágio de desenvolvimento, o modelo destaca-se pela capacidade de utilizar uma bacia tipicamente urbana a partir da unidade do lote. Nesse nível de observação, aqui entendido como de alta resolução, os resultados da adoção das práticas de manejo podem embasar a formulação de políticas públicas para diminuição dos impactos sobre os sistemas existentes e na melhoria das questões ambientais, já que se trata de fatores fortemente conectados. Cabe ressaltar que as práticas aqui comentadas são plausíveis do ponto de vista de aplicabilidade, visto que a existência de uma área em rebaixo para infiltração na frente/fundo de lote ou mesmo a

construção de micro reservatório no interior desses é algo perfeitamente possível de ser introduzido no manejo das águas pluviais urbanas.

Esforços ainda são necessários para uma melhor caracterização das ligações entre chuva-vazão-poluentes. Essa caracterização tem sido observada ao longo do tempo e entendida como um fenômeno de alta complexidade. As experiências adquiridas e os resultados encontrados pelo monitoramento e modelagem dos aspectos da poluição difusa sugerem a necessidade de se continuar com a elaboração e desenvolvimento de estudos integrados, associando, dessa forma, fenômenos de qualidade e quantidade das águas de escoamento superficial. Com relação exclusivamente ao comportamento da poluição difusa na bacia, salienta-se que:

- As descargas de concentração do poluente possuem relação complexa com a precipitação. Nessa relação, o carreamento dos poluentes depende da intermitência do evento chuvoso;
- Todas as áreas da bacia podem contribuir para o acúmulo e transporte dos poluentes. Embora essa seja uma afirmação geral, é preciso investigar características peculiares de tais áreas como, por exemplo, os aspectos físicos podem influenciar no transporte ao longo da bacia;
- Tratando-se de poluição difusa, deve-se conceber que a fonte de lançamento das cargas poluidoras apresenta o comportamento de distribuição global; assim sendo, o monitoramento dessas cargas não pode ser aplicado em função do que se observa no monitoramento de cargas pontuais;

Em virtude do que se presenciou durante a vigência do projeto MAPLU e pelas avaliações preliminares da poluição difusa, sendo essa última também uma conquista do presente trabalho, é possível sugerir a formulação de novas diretrizes com relação ao monitoramento dos aspectos de poluição na bacia. Dentro dessa contextualização, algumas conceituações precisam ser aclaradas, ou seja:

- Durante os eventos chuvosos, a definição do intervalo de análise para avaliações temporais das questões qualitativas das águas de escoamento é condição crucial como parte da compreensão da propagação/carreamento dos poluentes;
- O monitoramento deve empregar equipamentos automáticos que possam, de alguma forma, estar correlacionados ao sensoriamento dos eventos de precipitação e surgimento dos deflúvios. Esse fato permite o cumprimento dos critérios estabelecidos para os intervalos de monitoramento;

- É preciso observar e considerar a variabilidade espacial dos eventos de precipitação na bacia. Nesse caso, considera-se essencial a introdução de equipamentos para o monitoramento das precipitações de maneira distribuída na bacia;
- Tratar estatisticamente os eventos de alta variabilidade, como é o caso da poluição difusa, possibilita preparar melhor as observações desses eventos para as atividades de modelagem. Evidentemente, é possível esperar melhores resultados pela aplicação desse conceito. Para tanto, monitorar um número maior de eventos e cenários é algo inquestionável;
- Além de gerar entendimentos sobre o comportamento da poluição ao longo do evento é necessário buscar fatores que caracterizem globalmente esse evento, ou seja, aspectos como os volumes integralmente escoados, dias antecedentes secos ou mesmo os precipitados totais devem ser alvos de correlações.

Finalmente, tratando agora das questões pertinentes à utilização dos modelos apresentados, é viável concordar que, dentro de certos limites, o SWMM corresponde satisfatoriamente. Entretanto, algumas dificuldades no uso desse modelo prejudicam sua aplicação quando se deseja avaliar a bacia em maior nível de discretização das áreas.

Ressalta-se que as subdivisões propostas pelo critério dos projetos de microdrenagem, no qual se estabeleceu a aplicação do SWMM para a bacia estudada, são superiores, em termos de dimensão das áreas criadas, ao que se teria no caso de uma subdivisão baseada nos limites dos lotes. Tal condição leva a concordar que o número de subáreas originadas por essa subdivisão seria demasiadamente elevado.

É importante deixar claro que o problema da subdivisão da bacia, considerando o limite dos lotes através do SWMM, não é algo restrito ao trabalho exaustivo do traçado sucessivo de todas as subáreas. A inviabilidade anexa ao caso reside também na condição da caracterização dessas subáreas, ou seja, após o processo de criação das mesmas é necessário ainda definir uma série de parâmetros que as caracterizam, sendo esses nem sempre de fácil determinação.

Aliadas às inviabilidades em se considerar níveis mais elevados de discretização, diante do contexto de trabalho no ambiente do SWMM, estão as atividades de calibração. A realização da calibração bem como a validação pelo SWMM é executada através de um processo iterativo manual, fato esse que torna a atividade extremamente onerosa.

Percebe-se claramente que o trabalho com níveis mais elevados de discretização através do SWMM exigiria uma quantidade considerável de esforços. Essa afirmação justifica o empenho de se elaborar um novo modelo, buscando-se a capacidade de avaliar determinadas práticas de controle na fonte aplicadas sobre a área dos lotes e sobre a bacia, de forma a minimizar da melhor forma possível os inconvenientes atribuídos ao efeito de maiores subdivisões da área de estudo.

De maneira concisa, no que diz respeito ao tratamento dado aos fenômenos de qualidade da água de drenagem, é razoável afirmar que a metodologia de que trata o SWMM pode ser vista como um bom ponto de partida para análises mais profundas das extensas correlações entre quantidade e qualidade dos deflúvios superficiais.

Para o caso do modelo em desenvolvimento, espera-se que o aprimoramento dos algoritmos viabilize a diminuição significativa dos esforços que são necessários para caracterizar fisicamente a bacia. Essa consideração leva em conta o fato de que ferramentas auxiliares associadas ao geoprocessamento ou exclusivamente ao desenho podem ser utilizadas em paralelo. Em função também dessas ferramentas, o nível de resolução que se está sugerindo através do modelo proposto aliado à sistemática de compreensão da bacia urbana seria, tendenciosamente, capaz de promover simulações bem ajustadas. Dentro desse contexto as atividades de manejo podem ser continuamente desenvolvidas, buscando-se aquela que justifique a melhor decisão no que diz respeito à tomada de ações sobre a área da bacia ou sobre suas partes constituintes.

De acordo com os comentários e citações feitas, justificou-se que determinadas práticas ou medidas aplicadas sobre os lotes poderiam resultar em diminuições dos impactos provenientes dos fenômenos de cheia e até mesmo do comprometimento da qualidade da água de drenagem. Essas afirmações induzem a sugerir/concordar que tal área pode ser compreendida como uma unidade básica para a observação dos fenômenos hidrológicos em bacias urbanas. Nesse sentido, analisar o uso dos espaços disponíveis no lote concretiza a avaliação de iniciativas que venham a comprovar, por exemplo, que a adoção de áreas exclusivas para infiltração ou mesmo retenção são medidas cabíveis para a redução dos impactos sobre os sistemas de existentes. Tais considerações acabam por demonstrar e comprovar que a elaboração ou uso de modelos computacionais são meios indispensáveis como suporte na aplicação de estudos que viabilizem, do ponto de vista técnico e científico, a aplicação de medidas que garantam a tomada de ações de maneira coordenada e integrada.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, C O de., (2003). **Qualidade da Água**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 4º, 2003, Juazeiro - BA. Anais do 4º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. Juazeiro: ABCMAC.
- ARCEIVALA, S. J., (1981). **Wastewater treatment and disposal**. Marcel Dekker, New York. 892p.
- BASTOS, G. A. P., (2007). **Análise dos Parâmetros do Modelo SWMM para Avaliação do Escoamento em Duas Bacias Periurbanas em Santa Maria-RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
- BENINI, R. M., (2005). **Cenários de Ocupação Urbana e Seus Impactos Hidrológicos na Bacia do Rio Mineirinho**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA A. A., (2009). **Modelos Computacionais para Drenagem Urbana**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 04, cap. 3, p. 112-148.
- CEDERGREN, H. R., (1980). **Drenagem dos pavimentos de rodovias e aeródromos**. Harry R. Cerdergren; tradução de Hugo Nicodeno Guida - Rio de Janeiro: Livros técnicos e Científicos: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 177 p.
- CHAPRA, S.C., (1997). **Surface water quality modeling**. Colorado, USA: MacGraw-Hill, 843 p.
- CAMPOS, J. N. B., (2009). **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza ASTEF/EXPRESSÃO GRÁFICA, 166 p.
- CIRILO, J.A. **Hidráulica Aplicada**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH. 2003. 2 ed., v.8, 621p.

DALTRO FILHO, JOSÉ (2004). **Saneamento Ambiental: doença, saúde e o saneamento da água**. São Cristóvão: Editora UFS; Aracaju: Fundação Oviêdo Teixeira, 332 p.

DAW, D. R.; LICHTY, R., W., (1968). **Methodology of hydrologic model building**. *In the use of analog and digital computers in hydrology*. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Symp. Proc., Tucson, AZ, p. 347 – 355.

DEKSISSA, T.; MEIRLAEN, J.; ASHTON, P.; VANROLLERGHEM, P. A., (2004). **Simplifying dynamic river water quality modeling: a case study of inorganic nitrogen dynamics in the Crocodile River (South Africa)**. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 155, p. 303-320.

DHI Water & Environment. (2002a). **MOUSE PIPE FLOW: Reference Manual**. DHI Software 2002, 118p.

DHI Water & Environment. (2002b). **MOUSE Surface Runoff Models: Reference Manual**. DHI Software 2002, 51p.

ELLIS, J. B., (1986). **Pollutional Aspects of Urban Runoff**. In: *Urban Runoff Pollution*, Torno, H.C. et al., eds.. NATO ASI series vol. 10, Springer-Verlag, Berlin, p. 1 – 38.

GARCIA, J. I. B., (2005) **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem urbana da bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. , (2005). **Comparação das Respostas do Modelo SWMM para Diferentes Amplitudes de Cheia**. In: *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul*, Santa Maria, Nov. 2005, 1, p. 1 – 17.

GENZ, F. TUCCI, C. E. M., (1995). **Infiltração em Superfícies Urbanas**. *Revista Brasileira de Engenharia*. Caderno de Recursos Hídricos / ABRH, v. 13, nº 1, p. 105 – 124.

GENZ, F. TUCCI, C. E. M., (1995). **Controle do escoamento em um lote urbano**. Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos / ABRH, v. 13, nº 1, p. 129 – 152.

GREGORY, K. J.; WALLING, D. E., (1976). **Drainage Basin Form and Process**. First published 1973 by Edward Arnold (Publishers) Ltd 25 Hill Street, London W1X 8LL. First published in paperback, 458 p.

GRIENSVEN, A. V., (2007). **Sensitivity, autocalibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005**. Artigo técnico. Disponível em: <<http://groups.google.com/group/swatuser/files>>. Acesso em: 16 ago. 2007.

HAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L., (1982). **Hydrology Modeling of Small Watersheds**. American Society of Agricultural Engineers. ASAE Technical Editor: James A. Basselman, 533 p.

HydroWorks PM help files. WALLINFORD SOFTWARE LTD, Wallinford, 1994.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E., (1988). **Storm Water Management Model Version 4**. User's manual. USEPA (EPA Report 600/3-88-001a). Athens, G.A.

LEE, C., (1973). **Models in planning**. An Introduction to the use of quantitative models in planning. Oxford. Pergamon Press.

LEOPOLD, L. B., (1968). **Hydrology for Urban Planning – A Guide Book on the Hydrology Effects on Urban Land Use**. USGS circ 554, 18 p.

LENER, D. N., (1990). **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge**. . International Contributions to Hydrogeology vol. 8. Heise, Hannover, FRG. 345 p.

MACHADO, R. E., (2002). **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba (SP).

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C., (2003). **Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Vicosa - MG. v. 27, n. 4, p. 727-733.

MAKSIMOVIC, C., (2001). **General overview of urban drainage principles and practice**. In: Urban drainage in Specific climates. Volume 1: urban drainage in humid tropics. Unesco: Paris, 227 p.

MARIN, M.C.F.C.; ROSÁRIO, C.S.; RAMOS, F.A.; TAMAROZI, R., (1999). **Planejamento do Sistema de Drenagem Urbana: Concepção Ideal versus Prática do Poder Público**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG:05/99-CD-ROM.

MASCARENHAS, F.C.B.; MIGUEZ, M.G., (2002). **Urban Flood Control through a Mathematical Cell**. In: Water International Resources, vol. 27, Nº 2, págs. 208-218, Illinois, E.U.A.

MELLER, A; PAIVA, E.M.C.D., (2004). **Comparação entre metodologias de simulação de inundações em redes de drenagem pluviais a uma pequena bacia hidrográfica em urbanização**. In: XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, Anais..., São Pedro/SP.

MELO, L. R. C., (2007). **Variação da Qualidade da Água de Chuva em Três Pontos Distinto da Cidade de Natal – RN**. In: 24º CBESA - Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais... Belo Horizonte/MG.

MIGUEZ, M. G., (1994). **Modelação Matemática de Grandes Planícies de Inundação, através de um Esquema de Células de Escoamento, com Aplicação ao Pantanal Mato-Grossense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M. G., (2001). **Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MOREIRA, L. F., (2007). Notas de aula: “**Vias Urbanas e Sarjetas**”. Natal, 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R., (2005). **Soil and water assessment tool**. Input/output file documentation: Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA, 530 p.

NEITSCH, S. L. et al., (2006). **Soil and Water Assessment Tool**. Theoretical documentation, version 2000. Temple, Grassland, Soil and Eater Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station. 2002. Disponível em:

<<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2006. 212 p.

OHNUMA JR., A. A. (2005). **Cenários de Reúso de Água Pluvial e Controle da Drenagem Visando a Recuperação Ambiental da Microbacia do Alto Tijuco Preto, São Carlos-SP**. Dissertação. (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). CRHEA-EESC-USP, São Carlos/SP. 199p.

PDDMA, (2009). **Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais – Natal/RN**. Diagnóstico do Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da cidade do Natal. Estudos Hidrogeológicos: segundo relatório.

POMPÊO, C. A., (2000). **Drenagem Urbana Sustentável**. Revista Brasileira dos Recursos Hídricos / ABRH, v. 5, n. 1, Porto Alegre, p. 15 – 23.

POMPÊO, C. A., (2001). **Notas de aula: “Sistemas Urbanos de Microdrenagem”**. Florianópolis.

PORTO, R. M., (2004). **Hidráulica Básica**. 3 ed. São Carlos: Editora da EESC-USP, 519 p.

RIBEIRO, C. H. A. E ARAÚJO, M., (2002). **Mathematical modeling as a management tool for water quality control of the tropical Beberibe estuary, NE Brazil**. Hidrobiologia, v. 475/476, p. 229 – 237.

RIGHETTO, A. M., (1998). **Hidrologia e recursos hídricos**. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos:Editora da EESC/USP, 840 p.

RIGHETTO, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; BRITO, L. P.; SALES, T. E. A. de; MEDEIROS, V. M. A.; FERREIRA, L. C. A.; LIMA, R. R. M., (2009). **Estudo Qualitativo de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade de Natal-RN**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009, v. 04, cap. 6, p. 218-255.

ROESNER, L. A. et al., (1988). **Storm Water Management Model Version 4**. User's manual addendum. I, EXTRAN. USEPA (EPA Report 600/3-88-001b). Cincinnati.

SANCHEZ, J. E., (1987). **Fundamentos de Hidrologia**. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 333p

TUCCI, C.E.M.; ORDONEZ, J.S.; SIMÕES LOPES, M. (1981). **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados**. Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Fortaleza.

TUCCI, C.E.M.; CAMPANA, N. (1993). **Simulação distribuída com IPH II**, Nova versão Anais X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Gramado V3 p495-504.

TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T., (1995). **Drenagem Urbana: Coleção ABRH de Recursos Hídrico. 5.ed**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 428 p.

TUCCI, C. E. M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. 1ª ed., Editora da Universidade, 669 p.

TUCCI, CARLOS E. M., (2001). **Gestão da água no Brasil**. UNESCO, Brasília, 156p.

TUCCI, CARLOS E. M., (2002). **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos / ABRH, v. 7, n. 1, p.5-27, Porto Alegre/RS.

TUCCI, CARLOS E. M; SILVEIRA, L. L. ANDRÉ., (2004). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3.ed., primeira reimpressão. – Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 943 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA., (1997). Technical guidance manual for developing Total Maximum Daily Loads Book 2: Streams and Rivers. **Biochemical Oxygen Demand/Dissolved Oxygen and Nutrients Eutrophication**. Washington, EUA, EP-823-97-002.

URBONAS, B.; STAHR, P., (1993). **Stormwater – Best Management Practices and Detention for Water Quality Drainage and CSO Management**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 449 p.

VON SPEARLING, MARCOS., (2007). **Estudos e modelagem da qualidade de água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 588p. – (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 7).

ZAHED, K. F.; MÉLLO JR. A. V., (2011). Material das aulas: “**Modelos de Simulação Hidrológica – Modelos ABC6 – Análise de Bacias Complexas**”. Disponível em: http://200.144.189.36/phd/default.aspx?id=1&link_uc=disciplina

WL | DELFT HYDRAULICS. SOBEK help files. Netherlands, 2004. Disponível em: <http://www.sobek.nl>

http://www.envirh2o.com/index.php?option=com_content&view=article&id=55:swmm&catid=41:soft&Itemid=59 Acesso: 01/05/2010