Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Daniele Pereira Batista Amaral

Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2014

Daniele Pereira Batista Amaral

Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Luciene Pimentel da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Luiz da Fonseca

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B333 Batista Amaral, Daniele Pereira.
Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de janeiro / Daniele Pereira Batista Amaral. - 2014.
153 f.

Orientadora: Luciene Pimentel da Silva.
Coorientador: Paulo Luiz da Fonseca.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Engenharia sanitária - Dissertações. 3. Drenagem urbana - Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel da. II. Fonseca, Paulo Luiz da. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 628:556.18

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Daniele Pereira Batista Amaral

Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em: 11 de abril de 2014.

Banca Examinadora:

_____

Prof.ª Dr.ª Luciene Pimentel da Silva (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

_____

Prof.ª Dr.ª Rosa Maria Formiga Johnsson

Faculdade de Engenharia - UERJ

_____

Prof. Dr. Paulo Luiz da Fonseca

Universidade Federal Fluminense / Rio Águas

_____

Prof. Dr. Marcelo Gomes Miguez

Universidade Federal do Rio de Janeiro

_____

Prof. Dr. Elson Antônio do Nascimento

Universidade Federal Fluminense

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

Ao meu Deus, meu marido e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, que sempre me ajudou durante a minha caminhada e me deu forças para vencer todos os meus desafios.

Ao meu amado esposo e companheiro Thiago Amaral, meu eterno agradecimento por compreender todos os meus momentos e dificuldades. Seu valioso apoio foi significativo para a concretização deste trabalho.

À minha mãe, Vera Lúcia, meu profundo apreço por todo o apoio durante a minha vida, pelo exemplo e incentivo contínuos.

À minha orientadora Professora Luciene Pimentel da Silva, que pelos conhecimentos passados, pela dedicação e por todo o seu auxílio, tornou-se uma pessoa muito querida para mim.

Ao meu co-orientador Professor Paulo Fonseca, um excelente profissional, que sempre mostrou-se muito solícito e contribuiu de forma significativa para a realização deste trabalho.

Ao grupo de alunos, pesquisadores e participantes do Projeto HIDROCIDADES, especialmente o Wagner, a Mayara e o Gustavo, pela cooperação.

Ao CNPq, FAPERJ e FINEP pelo apoio financeiro ao Projeto HIDROCIDADES e à bolsa concedida, permitindo que eu me dedicasse integralmente ao mestrado no último ano do curso.

Ao professor Marcelo Miguez, pela boa recepção e integração com a UFRJ e pela oportunidade de ter participado do programa Hydrolatinamerica, onde adquiri um pouco de experiência na utilização do SWMM.

Aos colegas de mestrado em Meio Ambiente da UERJ, especialmente a Fernanda Vissirini, pela rica convivência e troca de experiências.

À Coordenação e Secretaria do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da UERJ.

Ao INEA, onde atuo profissionalmente, pelo apoio à minha dedicação à escrita e defesa da dissertação.

Apesar de nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da existência e entender que não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas. O que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles.

Augusto Cury

RESUMO

BATISTA AMARAL, Daniele Pereira. *Aplicação do modelo hidrológico SWMM na gestão das águas pluviais urbanas: estudo de caso da bacia hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro*. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

O crescimento da população e dos núcleos urbanos durante o século XX, sobretudo nos países em desenvolvimento, contribuiu para o aumento das áreas impermeáveis das bacias hidrográficas, com impactos importantes nos sistemas de drenagem urbana e na ocorrência de enchentes associadas. As enchentes trazem prejuízos materiais, na saúde e sociais. Recentemente, têm sido propostas práticas conservacionistas e medidas compensatórias, que buscam contribuir para o controle das enchentes urbanas, através do retardo do pico e amortecimento dos hidrogramas. Modelos matemáticos hidrológicos-hidráulicos permitem a simulação da adoção destas medidas de controle, demonstrando e otimizando sua localização. Esta dissertação apresenta os resultados da aplicação do modelo hidrológico Storm Water Management Model (SWMM) à bacia hidrográfica de estudo e representativa do rio Morto localizada em área peri-urbana em Jacarepaguá na cidade do Rio de Janeiro, com área de 9,41 km². O processamento do modelo SWMM foi realizado com o apoio da interface Storm and Sanitary Analysis (SSA), integrada ao sistema AutoCAD Civil 3D. Além da verificação da adequabilidade do modelo à representação dos sistemas hidrológico e hidráulico na bacia, foram desenvolvidos estudos para dois cenários como medidas de controle de enchentes: cenário 1, envolvendo implantação de um reservatório de detenção e, cenário 2, considerando a implantação de reservatórios de águas pluviais nos lotes. Os hidrogramas resultantes foram comparados ao hidrograma resultante da simulação nas condições atuais. Além disso, foram avaliados os custos associados a cada um dos cenários usando o sistema de orçamento da Empresa Rio Águas da PCRJ. Nas simulações foram adotadas a base cartográfica, e os dados climatológicos e hidrológicos previamente observados no contexto do projeto HIDROCIDADES, Rede de Pesquisa BRUM/FINEP, na qual este estudo se insere. Foram representados os processos de geração e propagação do escoamento superficial e de base. Durante o processo de calibração, realizou-se a análise de sensibilidade dos parâmetros, resultando como parâmetros mais sensíveis os relativos às áreas impermeáveis, especialmente o percentual de área impermeável da bacia (Ai). A calibração foi realizada através do ajuste manual de sete parâmetros do escoamento superficial e cinco do escoamento de base para três eventos. Foram obtidos coeficientes de determinação entre 0,52 e 0,64, e a diferença entre os volumes escoados e observados entre 0,60% e 4,96%. Para a validação do modelo foi adotado um evento pluviométrico excepcional observado na cidade em abril de 2010, que à época causou enchentes e grandes transtornos na cidade. Neste caso, o coeficiente de determinação foi igual a 0,78 e a diferença entre volumes foi de 15%. As principais distorções entre hidrogramas observados e simulados foram verificados para as vazões máximas. Em ambos os cenários as enchentes foram controladas. A partir destes estudos, pôde-se concluir que o melhor custo-benefício foi o cenário 2. Para este cenário, foi observado maiores amortecimento e retardo da vazão de pico do hidrograma, igual a 21,51% da vazão simulada para as condições atuais da bacia. Os custos de implantação orçados para os reservatórios de lote ficaram 52% a menos do que o do reservatório de detenção.

Palavras-chave: Simulação hidrológica e hidrodinâmica; Drenagem urbana; SWMM; Civil 3D; LID; LIUDD; Hidrocidades.

ABSTRACT

BATISTA AMARAL, Daniele Pereira. *Application of hydrological model SWMM on urban stormwater management: a case study of the Rio Morto basin, Rio de Janeiro*. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Population and urban occupation growth during 20th century, mainly in underdeveloped countries, contributed for increasing impermeable surfaces in drainage basins, leading to important impacts on urban drainage systems and associated floods. Floods cause material losses, healthy and social problems, apart of great disruptions in large city's mobility. Recently, a number of, non-conventional, conservative practices and compensatory measurements have been proposed seeking urban flood control, by lengthening hydrograph's time lag and promoting shallow rising limb. Hydrologic-hydraulic mathematical models allow the simulation of these flood control measurements, demonstrating and optimizing their location, maximizing the benefits of their application. This dissertation presents the results of the application of the Storm Water Management Model (SWMM) to the representative and under study catchment of Morto River, with 9,41 km2 of area, located in a peri urban area, in Jacarepaguá, city of Rio de Janeiro, Brazil. Storm and Sanitary Analysis (SSA) tool integrated to AutoCAD Civil 3D System supported the model processing. Apart of verifying the representativeness of the hydrologic-hydraulic modelling system to the physical processes in the Morto river catchment, two different scenarios were studied as means of flood control: scenario 1, involving the simulation of one retention reservoir and, scenario 2, involving the use of multiple distributed rainwater reservoirs in the lots. The resulting hydrographs were compared to the one for catchment's actual conditions. Additionally, the associated costs for each scenario were evaluated applying the official budget system of Rio Águas of Rio de Janeiro Council. It was applied the cartographic data base, climatological and hydrological data obtained in the HIDROCIDADES Project, FINEP BRUM Research Network, under which this work has been developed. The processes of generation and propagation of runoff and baseflow were modelled. During the calibration process, was performed a sensitivity analysis of the parameters, resulting as the most sensitive parameters those related to impervious areas, especially the percentage of impervious area in the basin (Ai). Manually calibration was performed, seven parameters for runoff simulation and five for baseflow were adjusted, for three events, presenting values for the coefficient of determination between 0.52 and 0.64. The difference between simulated and observed volumes varied from 0.60% to 4.96 %. Model validation was performed for an exceptional rainfall event in April 2010, which caused floods in many places in the city. In this case, the coefficient of determination was equal to 0.78 and difference in runoff volumes equal to 15 %, being identified that the main differences are in peak flows discharges. In both scenarios floods were totally controlled. It was concluded that the best cost-benefit was for scenario 2. For this scenario it was observed the best result, considering both reduction on hydrograph's peak flow discharge and increasing on time to peak. Peak flow discharge was reduced by 21,51% when compared to the simulated hydrograph for catchment's current stage. It was found a much lower cost for scenario 2, the budget was 52% less than the budget for scenario 1.

Keywords: Hydrologic and hydrodynamic simulation; Urban drainage; SWMM; Civil 3D; LID; LIUDD; Hidrocidades.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Terminologia dos elementos básicos do sistema pluvial de microdrenagem 26
Figura 2 - Relações entre os sistemas das águas urbanas 29
Figura 3 - Reservatório de retenção e detenção /Colorado, EUA 42
Figura 4 - Faixas Gramadas/Colorado, EUA e reservatório em edifício 42
Figura 5 - Esquema de pavimentos permeáveis 42
Figura 6 - Esquema de poço de infiltração e sua integração a uma área de lazer/ Kingston, Austrália 43
Figura 7 - Esquema de trincheira de infiltração/Kingston, Austrália 43
Figura 8 - Esquema de telhado verde – Projeto HIDROCIDADES e Unidade demonstrativa-experimental na Escola Municipal Teófilo Moreira da Costa 43
Figura 9 - Localização da Bacia do Rio Morto - Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro..... 60
Figura 10 - Bacia Hidrográfica representativa e experimental do rio Morto 63
Figura 11 - Estação Climatológica SL 2000 localizada dentro dos limites do Parque Aquático 66
Figura 12 - Localização da Estação Climatológica do Projeto HIDROCIDADES e das Estações de Apoio do Estudo de Análise de Consistência 66
Figura 13 - Curva-chave da estação fluviométrica WP/HIDROCIDADES 68
Figura 14 - Localização das seções transversais 71
Figura 15 - Bacia Hidrográfica do Rio Morto 72
Figura 16 - Relação entre os módulos estruturais do SWMM 73
Figura 17 - Modelo de águas subterrâneas 77
Figura 18 - Esquema de representação do aquífero 78
Figura 19 - Localização do reservatório de detenção proposto 83
Figura 20 - Dimensões do reservatório de lote de águas pluviais 85
Figura 21 - Diagrama simplificado com os procedimentos para formação da base de dados e realização de simulação com o SSA. 89
Figura 22 - Definição dos métodos de cálculo a serem considerados para o projeto 90
Figura 23 - Importação da hidrografia e sub-bacias através de arquivos shapefile. 91
Figura 24 - Representação da bacia no modelo 91
Figura 25 - Séries Temporais 92

Figura 26 - Edição de uma seção transversal irregular 94
Figura 27 - Criação de aquíferos 94
Figura 28 - Discretização dos aquíferos 95
Figura 29 - Propriedades do aquíferos associadas à uma sub-bacia 95
Figura 30 - Atribuição do passo de tempo 97
Figura 31 - É necessário um passo de tempo pequeno o suficiente para identificar o valor de pico da vazão 97
Figura 32 - Influência da largura (W) no hidrograma de saída 98
Figura 33 - Influência do percentual de áreas impermeáveis (Ai) no hidrograma de saída 99
Figura 34 - Influência do coeficiente de Manning para áreas impermeáveis (ni) no hidrograma de saída 99
Figura 35 - Influência do coeficiente de Manning para áreas permeáveis (np) no hidrograma de saída 100
Figura 36 - Influência da altura de armazenamento em depressões para áreas impermeáveis (d_i) no hidrograma de saída 100
Figura 37 - Influência da altura de armazenamento em depressões para áreas permeáveis (d_p) no hidrograma de saída 101
Figura 38 - Influência do coeficiente CN no hidrograma de saída 101
Figura 39 - Calibração do modelo SWMM para o mês de junho 106
Figura 40 - Calibração do modelo SWMM para o mês de novembro 107
Figura 41 - Calibração do modelo SWMM para o mês de março 108
Figura 42 - Simulação sem condições iniciais definidas 111
Figura 43 - Resgate registrado pela impressa após a chuva ocorrida no dia 06/04/2010 111
Figura 44 - Imagem do alagamento na Estrada do Rio Morto após a chuva do dia 07/04/2010 112
Figura 45 - Validação do modelo 113
Figura 46 - Resultado da simulação para a chuva de abril de 2010, mostrando os trechos onde houve extravasamento da calha (em azul) 115
Figura 47 - Evolução da simulação para o período de 05/04/2010 às 17:15h até 06/04/2010 às 06:35h 116
Figura 48 – Hidrogramas de Vazões Simulados dos Cenários Propostos – abril/2010 117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Conceito de Canalização x Conceito de Reservação 37
Quadro 2 - Consolidação das estruturas utilizadas nas metodologias de urbanismo de baixo impacto: LIUDD, LID, WSUD, e SUDS – português – inglês 41
Quadro 3 - Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água 50
Quadro 4 - Alguns sistemas computacionais Hidráulico- Hidrológicos com enfoque em drenagem urbana 58
Quadro 5 - Cenários propostos 86
Quadro 6 - Valores dos parâmetros do escoamento superficial obtidos na calibração 104
Quadro 7 - Valores dos parâmetros dos aquíferos obtidos na calibração 105
Quadro 8 - Consolidação dos resultados das simulações de cenários para abril de 2010 118
Quadro 9 - Estimativa de custo do reservatório proposto no cenário 2 119
Quadro 10 - Estimativa de custo dos reservatórios nos lotes (cenário 3) 119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Morfométricas da Bacia do Rio Morto até a Ponte da Estrada dos Bandeirantes 64
Tabela 2 - Diferença entre Volumes de Escoamento Simulados e Observados (ΔV), e Coeficiente de Determinação (r2) 109
Tabela 3 - Valores para “Moda” 110

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 74
Equação 2 75
Equação 3 76
Equação 4 77
Equação 5 80
Equação 6 80
Equação 7 82
Equação 8 84

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 17

1 **GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS EM ÁREAS URBANAS** 24

1.1. **Caracterização da Drenagem Urbana** 24

1.1.1. Macrodrenagem *24*

1.1.2. Microdrenagem *25*

1.2. **Gestão Integrada das Águas Urbanas** 27

1.3. ***Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD)** 31

1.3.1. Medidas de Controle do Escoamento *35*

1.3.2. Dispositivos para Controle das Águas Pluviais *39*

1.4. **Simulação Hidrológica-Hidráulica e Drenagem Urbana** 44

1.4.1. Concepção de modelagem *45*

1.4.2. Constituição da Base de dados *54*

1.4.3. Ajuste e Calibração de Parâmetros *55*

1.4.4. Validação do Modelo *56*

1.4.5. Simulação de Cenários *56*

1.4.6. Interpretação dos Resultados *57*

2 **METODOLOGIA** 59

2.1. **Caracterização da Área de Estudo** 59

2.1.1. Localização da Bacia Hidrográfica *59*

2.1.2. Características Morfométricas da Bacia do Rio Morto *64*

2.1.3. Dados Climatológicos e Hidrológicos *65*

2.1.4. Cálculo do Tempo de Concentração *68*

2.1.5. Seções Topobatimétricas *70*

2.1.6. Base de Dados Cartográficos e Informações Espaciais *71*

2.2. **O Modelo SWMM** 72

2.2.1. Descrição da Concepção e dos Módulos do Modelo *72*

2.2.2. Geração dos Elementos Gráficos e Informações Espaciais *78*

2.3. **Processamento do Modelo** 80

2.4. **Descrição dos Cenários Estudados** 82

2.5. **Apropriação dos Custos Associados aos Diferentes Cenários** 86

3 **APLICAÇÃO DO MODELO SWMM NA BACIA DO RIO MORTO** 88

3.1. **Formação da Base de Dados para a Bacia do rio Morto** 88

3.1.1. Definição dos Métodos de Cálculo *90*

3.1.2. Elementos hidrográficos *90*

3.1.3. Dados pluviométricos e evapotranspirimétricos *92*

3.1.4. Seções Transversais *93*

3.1.5. Aquíferos *94*

3.1.6. Passo de Tempo *96*

3.2. **Análise de Sensibilidade** 98

3.3. **Ajuste e Calibração dos Parâmetros do Modelo** 102

3.4. **Validação do Modelo** 111

4 **SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS** 114

4.1. **Análise da Simulação dos Cenários** 114

4.2. **Estimativa dos custos de implantação** 118

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 122

REFERÊNCIAS 127

APÊNDICE A 132

APÊNDICE B 133

APÊNDICE C 136

APÊNDICE D 150

INTRODUÇÃO

Problemática e Justificativa

O processo de ocupação urbana vem se acentuando ao longo do tempo. A expansão e consolidação das áreas urbanas são cada vez mais intensas. No Brasil esse crescimento gerou grandes metrópoles que possuem um núcleo principal e várias áreas circunvizinhas, peri urbanas, resultado da expansão desse crescimento. Essas áreas caracterizam-se pela expansão irregular, com menor atendimento da regulamentação urbana relacionada com o Plano Diretor e normas específicas de loteamento, além da ocupação irregular por população de interesse social de áreas públicas, caracterizadas pela fragilidade ambiental e/ou indefinição fundiária (CERQUEIRA, 2006). Segundo IBGE (2010), a taxa de urbanização no Brasil chegou a 84,36% no ano de 2010 e na região sudeste, este valor ultrapassou 92%.

A região da baixada de Jacarepaguá, localizada no município do Rio de Janeiro representa uma área de expansão importante da cidade, onde está em construção parte do aparelhamento para a realização das Olimpíadas em 2016. Caracteriza-se por seu sistema lagunar, manguezais, mata de restinga, cercada pela área de preservação do maciço da Pedra Branca, que constitui o Parque Estadual da Pedra Branca, importante remanescente de mata Atlântica da Cidade e do Estado. Naturalmente, por sua paisagem, Jacarepaguá se caracteriza nas áreas de baixo relevo por *wetlands* naturais. Assim, no período chuvoso, sobretudo nos meses de verão, as áreas alagadas se ampliam, e o transbordamento de seus rios são recorrentes. O crescimento da ocupação da região se deu a partir da implementação de um polo de indústrias químicas, sobretudo remédios e cosméticos, concomitantemente com a implementação de vias expressas que facilitaram o acesso à região, antes com paisagem dominada por áreas agrícolas que serviam de abastecimento para as áreas mais centrais da cidade (ROSA,2002). Esse crescimento não se deu de forma ordenada ou exatamente conforme planejamento, e observam-se ocupações irregulares na região, algumas com altas taxas de densidade de ocupação. O nível de qualidade de vida nesses locais é muito baixo. São recorrentes os problemas sociais e econômicos, agravados pela baixa infraestrutura urbana com rebatimentos na saúde de sua população (CERQUEIRA, 2006).

A implantação da infraestrutura de drenagem urbana em Jacarepaguá vem se dando, como no resto da cidade, com a alteração do traçado e retificação dos rios e canais naturais,

promovendo aterro de *wetlands* naturais, uma tendência seguida em muitas partes do mundo, em regiões de paisagem análoga, embora ocorram áreas remanescentes, que ainda não tiveram sua paisagem tão alterada.

Em 1996 e 2010 ocorreram enchentes com impactos importantes, que deixaram vários desabrigados e isolaram temporariamente a região do resto da Cidade, e observou-se um aumento dos índices de leptospirose. Tipicamente, os alagamentos são agravados pela concomitância de eventos pluviométricos intensos e pelo estágio da maré, e permanecendo por alguns dias.

São muitas as implicações da substituição da paisagem natural pelo das cidades, entre elas, a impermeabilização do solo. O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica urbanizada difere significativamente do comportamento das bacias ainda em situação próxima das condições naturais. A impermeabilização do solo, causada pelo desenvolvimento da malha urbana, altera profundamente o escoamento superficial das águas pluviais. O volume que anteriormente era retido pela vegetação e infiltrava no solo, passa a escoar rapidamente até atingir a rede de drenagem, o que resulta em um aumento significativo da vazão máxima dos rios, causando inundações que podem ter consequências de grandes proporções (HALL, 1970).

Diante deste cenário, há uma busca pelo aumento da capacidade dos sistemas de drenagem urbana, no qual muitas vezes, na abordagem mais convencional dos projetos de engenharia, está envolvida a canalização desses excessos e transferência dos mesmos para jusante. Neste contexto se insere o conceito higienista associado aos sistemas de drenagem, cujo principal objetivo é evacuar as águas pluviais, efluentes e esgoto sanitário o mais rápido possível, principalmente com o uso de canalizações e retificação dos rios e canais. Ao longo de décadas, a canalização foi considerada a intervenção mais comum e eficaz para controlar os níveis de inundação nas áreas urbanizadas (TUCCI, 2005).

A canalização de um curso d’água reduz os riscos de inundação de determinada área por certo tempo. Entretanto, como desdobramento, outros impactos são gerados. A aceleração do escoamento aumenta os riscos de inundações mais a jusante, a chuva efetiva provoca erosão das superfícies, aumentando as cargas de sedimentos, que junto a detritos e efluentes das atividades urbanas podem acumular-se em trechos de menor declividade e velocidade, podendo gerar problemas na operação do sistema de drenagem. Além disso, os sedimentos e poluentes carreados junto com a água serão lançados em corpo receptor, constituindo carga concentrada de contaminantes. Ressalta-se ainda, os riscos de vazamentos, transtornos e custos decorrentes da manutenção de todo o sistema. Eventuais vazamentos, não detectados,

podem gerar poluição pontual de outros corpos hídricos intermediários e poluição difusa. As cargas poluentes podem impactar a qualidade das reservas de águas subterrâneas, que já sofrem redução gradativa de volume, devido à redução das taxas de infiltração nas áreas urbanas (já que a maior parte da chuva é transformada em escoamento superficial por conta da impermeabilização das superfícies na paisagem urbana).

A sensação de confiança provocada pela obra, atrairá a população e novas atividades econômicas para as áreas mais próximas ao curso d'água, reduzindo o espaço natural das cheias fluviais (TUCCI, 2005). Além disso, a dinâmica do desenvolvimento humano nas áreas urbanas, sobretudo pela infraestrutura promovida, contribui para a expansão da mancha urbana e aumento da densidade populacional, que aumenta a demanda por água potável e das áreas impermeáveis, sendo que, no último caso, as áreas impermeáveis contribuirão para o aumento dos escoamentos superficiais, suscitando a necessidade frequente de ampliação do sistema de drenagem vigente, com oneração do poder público dos custos associados.

Desde 1970, a abordagem tradicional para projetos de sistemas de drenagem urbana começou a passar por transformações, tendo em vista a necessidade de soluções mais sustentáveis. Como alternativa ao conceito higienista, diversas medidas que pretendem compensar as alterações do crescimento urbano no ciclo da água começaram a ser desenvolvidas no contexto do dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana, indo em direção à sustentabilidade. Os princípios adotados têm como fundamento o conceito de desenvolvimento urbano de baixo impacto, que se traduz em soluções mais efetivas e econômicas quando comparadas às soluções tradicionais, e que contribuem para a conscientização ambiental, descentralizando o controle dos excessos pluviais e poluição geradas nas ocupações urbanas (BAHIENSE, 2013).

O fio condutor na concepção mais atual proposta para os sistemas de drenagem é a conservação ou compensação do ciclo hidrológico natural, a partir da redução do escoamento superficial adicional gerado pelas alterações da superfície do solo decorrentes do desenvolvimento urbano. As técnicas utilizadas diferem das utilizadas pela engenharia convencional que privilegiam o afastamento rápido das águas pluviais. A redução do escoamento acontece pela infiltração do excesso de água no solo, pela evaporação e evapotranspiração – que devolve parte da água para a atmosfera - e pelo armazenamento temporário, possibilitando o reuso da água ou um descarte lento, após a chuva (Ministério das Cidades, 2012).

O resultado é que a área alterada passa a ter um comportamento aproximadamente análogo às condições hidrológicas de pré-desenvolvimento, significando menor escoamento

superficial, menores níveis de erosão e de poluição das águas e, consequentemente, menores investimentos públicos na ampliação da infraestrutura de drenagem urbana.

Observa-se a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias e tecnologias que facilitem a realização de ações preventivas e corretivas na drenagem urbana, considerando a bacia hidrográfica (área de drenagem completa) de maneira integrada. Nesse sentido, os modelos computacionais de simulação podem prestar grandes serviços, seja no dimensionamento das novas medidas de controle e estruturas ou na geração de cenários e/ou alternativas em prol da gestão sustentável das águas pluviais. Ressalta-se que, na nova concepção, a água pluvial é entendida como um recurso natural a ser conservado e ter seu uso racionalizado e não como um "mal" a ser afastado, o mais rápido possível, das áreas ocupadas. Isso vem sendo feito, com o desenvolvimento e utilização de modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos, que facilitam o processo de avaliação e diagnóstico da situação física, juntamente com informações georreferenciadas, que facilitam o processo de aquisição e utilização de dados e acabam por aumentar a qualidade dos bancos de dados, e facilitam sua manipulação.

Através do monitoramento hidrológico e hidráulico e da aplicação dos modelos matemáticos associados, muitos dos impactos causados pela urbanização podem ser antecipados, reconhecidos e devidamente estudados. O conhecimento dos modelos e as faixas de valores válidos e aceitáveis dos seus parâmetros são essenciais para avaliar realisticamente as respostas para diferentes usos do solo, cheias de projeto, avaliação de áreas de risco, entre outros (GARCIA, 2005).

O Projeto de pesquisa e extensão HIDROCIDADES (PIMENTEL DA SILVA *et al*., 2008) vem atuando em atividades de extensão universitária e no contexto do estudo e da pesquisa sobre tecnologias inovadoras para controle dos excessos pluviais na fonte, além do monitoramento e estudo da qualidade da água e das relações chuva-vazão, tomando como objeto de estudo uma pequena bacia hidrográfica experimental e representativa, localizada no chamado lote 3 do Projeto de Drenagem da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, para a região hidrográfica da Baixada de Jacarepaguá. É a área mais preservada em termos relativos e corresponde aproximadamente aos Bairros de Vargem Grande, Vargem Pequena e Camorim.

De forma abrangente o Projeto tem contribuído para a melhoria do planejamento e da gestão dos recursos hídricos, integrados ao planejamento urbano (CERQUEIRA, 2012). Atualmente, o Projeto HIDROCIDADES integra a Rede de Pesquisa de Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM), FINEP (2010). Este trabalho buscou em parte o

atendimento de algumas das metas da Rede, sobretudo no que se refere a implementação de estudos de modelagem hidrológica e hidráulica, e simulação de cenários envolvendo projetos de drenagem que incorporem estruturas de controle das águas pluviais que integram novas propostas para o desenvolvimento urbano como o "*Low Impact Urban Design and Development*" (LIUDD) para as bacias representativas que integram a Rede de Pesquisa. Nessa dissertação tomou-se como objeto de estudo a bacia hidrográfica do rio Morto.

Preliminarmente à execução do presente trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica relacionada a modelos chuva-vazão que se adequassem aos objetivos da pesquisa. Alguns critérios foram levados em consideração na escolha do modelo e o "*Storm Water Management Model*" (SWMM), da Agência de Proteção Ambiental Americana (ROSSMAN, 2008), apresentou algumas características relevantes para sua escolha.

O SWMM apresenta uma interface bastante amigável e flexibilidade na divisão da área de modo a representá-la da maneira mais adequada, devendo obedecer a critérios de homogeneidade no agrupamento, o que permite uma representação mais aproximada da realidade. Ele é um programa que trabalha com modelagem do escoamento em regime unidimensional, exigindo, assim, uma menor quantidade de dados de entrada. Trabalha tanto com o método da onda cinemática, como com o método completo da onda dinâmica. Possui uma documentação muito farta, sendo mundialmente utilizado na área de drenagem urbana.

Cabe ressaltar que nesta dissertação foram aplicados dados hidrológicos/hidráulicos observados inéditos, originados na operação da bacia experimental-representativa do rio Morto e que não há registro de estudos envolvendo simulação matemática para esta bacia.

Objetivos Geral e Específicos

O objetivo geral deste trabalho foi implementar e analisar a adequação da concepção de modelagem do módulo chuva-vazão do modelo SWMM à representação dos processos envolvidos no ciclo hidrológico na bacia hidrográfica do rio Morto, localizada em Jacarepaguá no Rio de Janeiro, assim como cumprir as etapas associadas à aplicação dos modelos hidrológicos-hidráulicos: seleção de períodos e eventos para ajuste, calibração e validação dos parâmetros, e simulação de cenários, nesse caso, contrastando o uso de reservatórios de águas pluviais em lotes e a aplicação de um reservatório de detenção, inclusive com estimativas dos custos associados.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Identificar e revisar marcos teóricos importantes associados aos Projetos de Drenagem Urbana e da nova abordagem envolvida no LIUDD ou Desenvolvimento e Desenho Urbano de Baixo Impacto (DDUBI), assim como das estruturas de controle envolvidas.
- Identificar e revisar marcos teóricos sobre modelos hidrológicos-hidráulicos, no sentido de identificar as etapas e os procedimentos em suas aplicações, assim como a contextualização do modelo SWMM, sua descrição e resultados de suas aplicações na literatura;
- Formar base de dados para a bacia em estudo no software AutoCAD Civil 3D® e interface SSA, para processamento do modelo SWMM;
- Implementar e testar o modelo SWMM, sobretudo o módulo chuva-vazão;
- Ajustar, calibrar e validar os parâmetros do modelo;
- Analisar a resposta da bacia à eventos extremos mediante adoção de diferentes métodos de controle do escoamento superficial, sobretudo no sentido de contrastar diferentes cenários: cenário 2 - opção de reservatórios de águas pluviais para controle em lotes e cenário 3 - reservatório de detenção na escala de macrodrenagem;
- Análise da relação custo-benefício aproximado de cada um dos cenários simulados.

Estrutura da Dissertação

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação de mestrado foi organizada da seguinte forma:

No capítulo 1 é apresentada a revisão de marcos teóricos importantes que envolvem as principais questões envolvidas na gestão das águas pluviais em áreas urbanas. Adicionalmente, são apresentados os principais conceitos de desenvolvimento urbano de baixo impacto e simulação hidrológica-hidráulica, assim como a identificação do modelo SWMM nesse contexto.

No capítulo 2 são apresentados os elementos metodológicos da pesquisa da dissertação:

1. A caracterização da região da Baixada de Jacarepaguá com destaque para a bacia hidrográfica do rio Morto, objeto dessa pesquisa;

2. O modelo SWMM, a descrição da concepção e dos módulos do modelo, geração dos elementos gráficos e informações espaciais;
3. Processamento do modelo;
4. Descrição dos cenários estudados;
5. Apropriação dos custos associados aos diferentes cenários.

No capítulo 3 são apresentados os resultados da elaboração da base de dados espaciais constituída no AutoCAD Civil 3D/SSA, além do estudo de sensibilidade de parâmetros importantes do SWMM, resultados do ajuste, calibração e validação dos parâmetros do modelo;

No capítulo 4 são apresentados os resultados do estudo prevendo diferentes formas de intervenção na bacia com vistas ao controle de enchentes, envolvendo reservatórios de águas pluviais nos lotes e reservatórios de retenção na bacia, assim como a análise custo-benefício associada a esses diferentes cenários.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões da pesquisa realizada nessa dissertação de mestrado, suas principais contribuições, limitações e sugestões para investigações futuras.

1 GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS EM ÁREAS URBANAS

1.1. Caracterização da Drenagem Urbana

A drenagem urbana envolve a rede de coleta da água (junto a outros resíduos), que se origina devido à precipitação sobre as superfícies urbanas, seu tratamento e o retorno aos rios e outros corpos hídricos receptores (adaptado de TUCCI, 2005). Ela se insere na infraestrutura urbana e compreende um conjunto de ações para gestão das águas pluviais.

Inicia-se nas edificações e nos coletores de águas pluviais ligados à rede pública, na drenagem superficial das sarjetas que recebe a parcela superficial das ruas, calçadas, pátios e outras áreas impermeáveis ou permeáveis onde são gerados escoamentos superficiais. O escoamento proveniente das sarjetas, interceptado pelas bocas de lobo, e o proveniente dos coletores residenciais são drenados pelos condutos pluviais, que constituem a microdrenagem, alimentam os condutos secundários até os principais sistemas compostos de pequenos rios (arroios, riachos ou ribeirões) que compõem a macrodrenagem urbana. A drenagem urbana é dimensionada em dois níveis principais: a macrodrenagem e a microdrenagem. A distinção entre esses dois níveis nem sempre é clara, mas pode-se caracterizar como macrodrenagem os escoamento em fundos de vale que normalmente são bem definidos mesmo que não correspondam a um curso d'água perene. Essas bacias possuem área de pelo menos 5 km², dependendo da cidade e do grau de urbanização. O termo microdrenagem aplica-se a áreas onde o escoamento natural não é bem definido e, portanto, acaba sendo determinado pela ocupação do solo. Em uma área urbana, a microdrenagem é essencialmente definida pelo traçado das ruas (TUCCI, 2004).

1.1.1. Macrodrenagem

Um projeto de macrodrenagem deve ser suficiente para comportar os escoamentos provenientes das chuvas mais intensas (precipitação com período de retorno até a ordem de 100 anos), considerando-se os possíveis danos às propriedades e os riscos de perdas de vidas humanas.

As obras e serviços de macrodrenagem visam melhorar o escoamento para atenuar inundações, erosões e assoreamentos. Eles devem constar de Planos de Macrodrenagem e

podem reduzir a necessidade de algumas tubulações subterrâneas da microdrenagem. São em geral constituídos de:

- Grandes galerias;
- Canais naturais e construídos;
- Melhoria de canais e calhas de rios (retificação, alargamento, aprofundamento, dragagem, revestimento etc.);
- Manutenção de canais e bacias de detenção com remoção de sedimentos, lodos orgânicos, lixos, detritos urbanos e ervas daninhas;
- Adequação e manutenção de reservatórios para controle de inundações;
- Dispositivos de proteção à erosão (drenos sub-horizontais, muros de arrimo etc.);
- Reposição de vegetação em áreas erodidas e nas várzeas (matas ciliares).

O projeto básico de macrodrenagem resulta em (DIOGO, 2008):

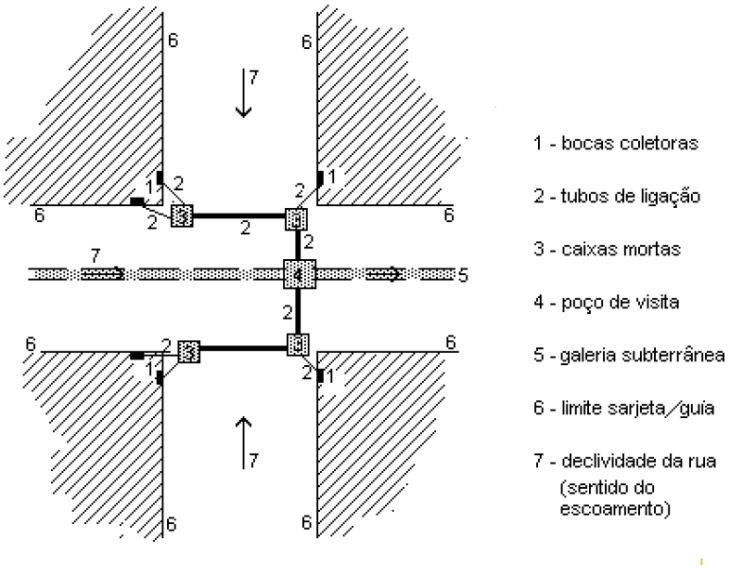
- Relatório técnico: Deve incluir descrição da bacia, situação atual e prospectiva, dados pluviométricos disponíveis, estudos de hidrogramas, cálculo de vazões, critérios básicos de engenharia utilizados, planos alternativos, aspectos ambientais e legais e recomendações. Deve apresentar memória que demonstre a capacidade do sistema de macrodrenagem.
- Quadros e desenhos: Devem apresentar a planta geral do projeto e os perfis na escala 1:500 ou 1:1.000. Devem apresentar, também, as cotas do fundo do canal ou da galeria, os perfis aproximados da linha d'água, pontes e seções transversais típicas. Devem conter informações para orientar as desapropriações antes da construção.

1.1.2. Microdrenagem

Uma obra de microdrenagem faz-se necessária para criar condições razoáveis de circulação de veículos e pedestres, por ocasião de chuvas frequentes (precipitação com período de retorno entre 2 e 25 anos). A microdrenagem urbana é constituída pelo sistema de condutos pluviais relacionados aos espaços dos loteamentos ou rede primária urbana.

A Figura 1 descreve uma representação esquemática dos elementos constituintes de um sistema de microdrenagem.

Figura 1 - Terminologia dos elementos básicos do sistema pluvial de microdrenagem



Fonte: FERNANDES, 2013.

Os principais dados necessários à elaboração de um projeto de rede pluvial de microdrenagem são os seguintes (TUCCI, 2004):

Plantas: a) planta de situação da localização dentro do Estado; b) planta geral da bacia contribuinte: escalas 1:5.000 ou 1:10.000. No caso de não existir planta plani-altimétrica da bacia, deve ser limitado o divisor topográfico por poligonal nivelada; c) planta plani-altimétrica da área do projeto na escala 1:1.000 ou 1:500, com pontos cotados nas esquinas e em pontos notáveis.

Levantamento topográfico: o nivelamento geométrico em todas as esquinas, mudança de direção e mudança de greides das vias públicas.

Cadastro: de redes existentes de esgotos pluviais ou de outros serviços que possam interferir na área de projeto.

Urbanização: devem-se selecionar os seguintes elementos relativos à urbanização da bacia contribuinte, nas situações atual e previstas no plano diretor: a) tipo de ocupação das áreas (residências, comércio, praças etc.); b) porcentagem de ocupação dos lotes; c) ocupação e recobrimento do solo nas áreas não urbanizadas pertencentes à bacia.

A drenagem urbana acaba interferindo fortemente no planejamento de um município ao abranger aspectos urbanísticos, sociais, econômicos, ambientais e de segurança da população.

1.2. Gestão Integrada das Águas Urbanas

*"A gestão integrada, entendida como interdisciplinar e intersetorial dos componentes das águas urbanas, é uma condição necessária para que os resultados atendam as condições de desenvolvimento sustentável urbano" (*TUCCI, 2005).

No final do século 19 e parte do século 20, água urbana se resumia no abastecimento, entregar água à população, retirar esgoto para longe e dispor no meio natural sem tratamento. Esta é a fase que pode ser chamada "higienista", em função da preocupação dos sanitaristas em evitar a proliferação de doenças e reduzir as doenças de veiculação hídrica. Neste período a solução sempre foi de coletar água a montante e dispor o esgoto à jusante. As águas pluviais eram planejadas para escoar pelas ruas até os rios. Este cenário foi aceitável enquanto as cidades tinham população de até 20 mil habitantes e se encontravam distantes umas das outras.

As cidades cresceram, ficaram mais próximas e a estratégia de desenvolvimento se manteve na fase "higienista", gerando o que é chamado de ciclo de contaminação, onde a cidade de montante polui a de jusante e esta deverá poluir a seguinte. Muitas cidades, através de seus gestores, consideraram que o investimento em tratamento de esgoto era muito alto e optaram por investimentos em setores considerados mais importantes, sem entender que estavam deixando de combater o problema na sua origem.

Os países desenvolvidos saíram da fase chamada aqui de "higienista" para a fase corretiva com o tratamento do esgoto doméstico e controle das inundações urbanas com detenções (amortecimento). O esgoto doméstico foi implementado até a cobertura quase total; desta forma, o ambiente urbano se tornou melhor. Observou-se que, além do esgoto sanitário, existia a carga do esgoto pluvial e a distribuição dos resíduos sólidos, processos totalmente inter-relacionados.

Para buscar uma solução ambientalmente sustentável é necessário o gerenciamento integrado da infraestrutura urbana, iniciando-se pela definição da ocupação do espaço com preservação das funções naturais, como a infiltração e a rede natural de escoamento.

Para desenvolver a gestão integrada, é necessário conhecer a interface entre os sistemas. Na figura 2 são caracterizadas as principais relações entre os sistemas de infraestrutura no ambiente urbano, relacionadas com a água.

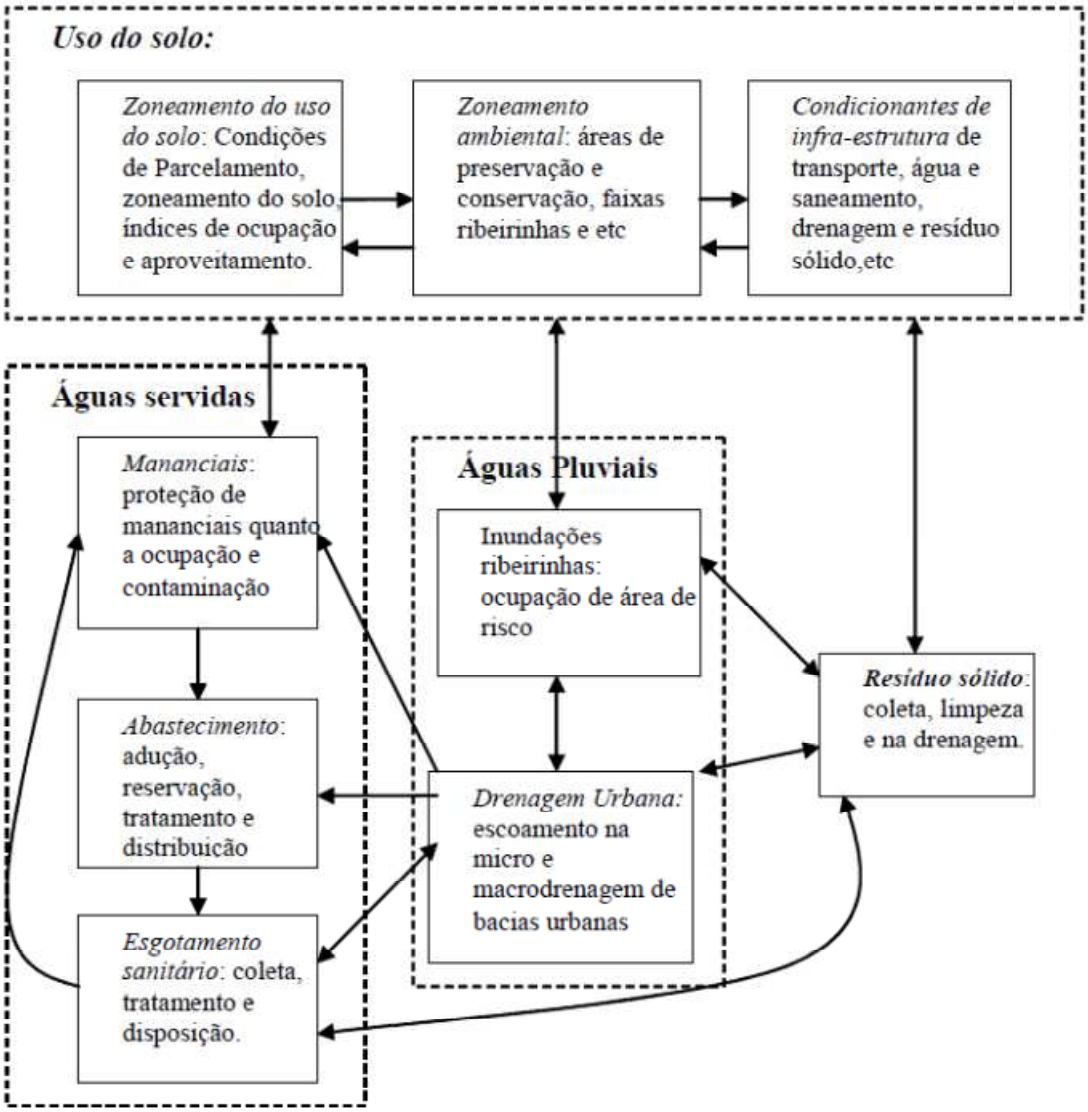
A visão integrada se inicia no planejamento da ocupação do espaço na fase do loteamento, quando o projeto deve procurar preservar as ravinas[1] naturais existentes. Ao contrário do que é projetado atualmente, baseando-se apenas na maximização da exploração do espaço independente da rede de drenagem natural, o projeto sustentável preserva o sistema natural. Desta forma, é reduzido o escoamento às condições pré-existentes para as chuvas frequentes, a água infiltra, não transferindo excessos para jusante.

No âmbito do esgotamento sanitário, é necessário que se desenvolva a ligação da rede de esgoto com padrão adequado e executado através da gestão da empresa de serviços de água e saneamento. Desta forma, evita-se ligações inadequadas e possibilita o tratamento de esgotos com padrões adequados.

Nos resíduos sólidos deve-se buscar aprimorar a coleta domiciliar e limpeza das ruas, disposição automática de retenção de resíduos sólidos e educação da população com sistemas de reciclagem economicamente eficientes.

[1] Ravinas são cavidades estreitas e profundas, abertas pelas águas que correm numa vertente.

Figura 2 - Relações entre os sistemas das águas urbanas



Fonte: TUCCI, 2005.

No escoamento pluvial, o custo da infraestrutura sustentável tende a ser menor que o custo do sistema corretivo e este é ainda menor que a infraestrutura tradicional, devido a retirada de vários sistemas, como a eliminação de redes de condutos de drenagem, sarjetas, entre outros, que são substituídos por gramados que infiltram, valas gramadas, e sistemas naturais protegidos.

O desenvolvimento do planejamento das áreas urbanas envolve principalmente:

- Planejamento do desenvolvimento urbano;
- Transporte;
- Abastecimento de água e saneamento;

- Drenagem urbana, controle de inundações e da erosão urbana;
- Resíduo sólido;
- Controle ambiental.

A atuação preventiva no desenvolvimento urbano reduz o custo da solução dos problemas relacionados com a água. Planejando a cidade com áreas de ocupação e controle da drenagem na fonte, a distribuição do espaço de risco e o desenvolvimento dos sistemas de abastecimento e esgotamento, os custos serão muito menores do que quando ocorrem os eventos críticos.

O Plano Diretor de Drenagem Urbana é um instrumento de gestão e contém referencial técnico para que a gestão da drenagem do município possa ser executada. Ele pode ser considerado estratégico, uma vez que nele consta um conjunto de documentos que apresentam os programas de ações, medidas de controle do escoamento superficial, além do cronograma de implantação do plano e acompanhamento das ações propostas (monitoramento).

SMDU (2012) determina que o plano deve ser concebido para um determinado horizonte de planejamento. Os principais objetivos de um Plano Diretor de Drenagem devem ser:

- Redução das inundações;
- Zoneamento;
- Minimizar os efeitos da poluição difusa;
- Eficiência econômica;
- Desenvolvimento da região;
- Preservação e melhorias ambientais;
- Satisfação das necessidades sociais e de recreação.

Esses objetivos, ou a combinação deles, podem ser modificados devido às necessidades específicas de cada região.

As premissas técnicas básicas que devem nortear o Plano Diretor são:

- O espaço de planejamento e gestão da drenagem urbana deve ser a bacia hidrográfica. A segmentação da bacia em sub-bacias deverá ser avaliada em cada caso, tendo em vista principalmente o tamanho das áreas envolvidas.

- Interferir no escoamento dos canais de tal forma a manter o volume e velocidade o mais próximo possível das condições naturais da bacia, sendo possível em alguns casos a redução destas características a valores inferiores aos naturais.
- Considerar que o escoamento superficial transporta a poluição difusa e, portanto, são necessárias medidas para controle e/ou tratamento da sua qualidade.
- As ações devem seguir os princípios da sustentabilidade.
- As medidas estruturais de controle do escoamento superficial e as medidas não estruturais deverão ser consideradas conjuntamente.
- Considerar devidamente, dentro de um horizonte de planejamento, as condições futuras de uso e ocupação do solo. Para tal, a análise da eficácia do sistema de drenagem deverá ser bem avaliada, segundo diferentes cenários de ocupação e uso do solo da bacia.
- Recuperar e/ou preservar, na medida do possível, as áreas de várzea.
- Delimitar as zonas de inundação diante do risco hidrológico.

1.3. *Low Impact Urban Design and Development* (LIUDD)

No DDUBI o sistema de drenagem urbana é integrado, de uma certa forma, usa a água como "fio condutor" para o desenvolvimento da cidade, com o objetivo de reduzir os impactos sobre o ciclo hidrológico, unindo preocupações, restrições e sinergias da Engenharia Hidráulica e do Urbanismo, e tem se constituído como uma opção fundamental para controlar as inundações urbanas (adaptado de CERQUEIRA, 2012). Além dos aspectos de quantidade, tornou-se também uma questão relevante que as águas residuais e resíduos sólidos sejam assuntos tratados em conjunto.

Esta nova visão vai ao encontro do conceito de Desenvolvimento Sustentável, definido no relatório Brundtland (1986), intitulado "Nosso Futuro Comum", como sendo: "O desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades".

Na literatura, identifica-se também o uso do termo drenagem sustentável: "*sistemas de drenagem precisam ser concebidos no intuito de minimizar impactos da urbanização sobre os padrões naturais de escoamento, combinando aspectos quantitativos e qualitativos, alcançando objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no espaço e no tempo*" (MIGUEZ e*t al.*, 2010).

Uma abordagem pioneira que considera a drenagem de forma integrada ficou conhecido como "*Best Managements Practices*" (BMPs) – Melhores Práticas de Gestão. Desenvolvidas nos Estados Unidos, as BMPs são definidas pela AMEC (2001) como um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, considerando não somente preocupações com a quantidade de água, mas também aspectos de qualidade. Sua origem está relacionada com o controle da poluição na área de efluentes industriais, sendo mais tarde adotadas como uma possibilidade de controle da poluição difusa e, em seguida, associadas à gestão de águas pluviais. Podem ser classificadas como **estruturais**, definidas por US EPA (2004) como dispositivos construídos para oferecer armazenamento temporário e tratamento de águas pluviais escoadas, ou, **não estruturais**, definidas como técnicas de tratamento de escoamento de águas pluviais que usam medidas mais abrangentes, que não implicam em grande mobilização ou unidades construídas e visam a gestão das águas pluviais, incluindo as questões associadas ao controle da poluição. As BMPs evoluíram para um conjunto de ações integradas e mais abrangentes que recebeu o jargão de LID, "*Low Impact Development*" (LID), que na atualidade fazem parte da concepção dos projetos de drenagem urbana nos Estados Unidos.

O LID adota um conjunto de procedimentos que buscam reproduzir o comportamento hidrológico do local antes da urbanização. Para tal, a utilização de paisagens funcionais aparece como um elemento útil na malha urbana, permitindo a recuperação das características de infiltração e de detenção da bacia natural associadas ao projeto (BAHIENSE, 2013).

Devido à necessidade de alternativas aos sistemas de drenagem tradicionais, torna-se essencial o desenvolvimento de soluções sustentáveis aplicadas de forma integrada, considerando a bacia como unidade básica de planejamento, levando em consideração aspectos socioeconômicos e ambientais nos projetos de drenagem e controle de inundações. Para tal, é importante destacar a eficiência das medidas aplicadas de forma distribuída e na escala dos lotes, cujos efeitos, quando aplicados para a escala da bacia hidrográfica, são considerávelmente mais expressivos do que aqueles obtidos com medidas pontuais nas redes de drenagem. Neste contexto, o conceito LID ganhou força, uma vez que o planejamento de novas áreas, baseado neste conceito, passa por um processo diferenciado, considerando as características naturais do terreno de forma a minimizar os impactos causados pela urbanização. Resumidamente, este método baseia-se nos seguintes passos (CERQUEIRA, 2012; BAHIENSE, 2013):

- Identificação de regulamentação de zoneamento urbano, uso do solo e outras aplicáveis ao projeto;

- Identificação e estabelecimento dos limites de perturbação do solo e vegetação, respeitando áreas mínimas exigidas para ruas, elementos estruturais, edificações, paisagismo e manuseio de equipamentos;
- Redução de modificações da superfície da terra;
- Utilização de caminhos de fluxo e características naturais do terreno, em vez de propor drenos artificiais, minimizando a remoção de vegetação e desconectando áreas impermeáveis do sistema de drenagem, de forma a favorecer todas as oportunidades de infiltração;
- Minimização das taxas de impermeabilização, utilizando telhados verdes, pavimentos porosos, jardins de chuva e ruas mais estreitas;
- Concentração em aspectos hidrológicos naturais como um elemento do projeto, controlando o excesso de geração de descarga e aumentando os caminhos de drenagem;
- Elaboração de planejamento integrado preliminar para avaliar a efetividade do empreendimento em controlar águas pluviais e produção de sedimentos, além de estimar a necessidade de adoção de práticas de manejo;
- Definição de locais para parques e oportunidades de armazenamento, bem como integração destes aspectos hidrológicos com paisagens urbanas; e
- Desenvolvimento de práticas de gestão integrada para tornar o desenvolvimento de baixo impacto efetivo.

O LID foi adaptado e particularizado para as realidades diferenciadas de outros países, evoluindo para o SUDS (“*Sustainable Urban Development System*”) no Reino Unido, WSUD (“*Water Sensitive Urban Design*”) na Austrália, e LIUDD (“*Low Impact Urban Design and Development*”) na Nova Zelândia.

No SUDS os ideais de desenvolvimento sustentável são incluídos no processo de concepção do sistema, ou seja, os impactos sobre a bacia, graças às soluções de drenagem, não podem ser transferidos no espaço ou no tempo. Além disso, estes sistemas de drenagem podem ser desenvolvidos para melhorar o desenho urbano e a gestão de riscos ambientais, assim como promover a melhoria do ambiente construído. Os projetos de SUDS buscam reduzir os escoamentos superficiais através de estruturas de controle da água pluvial em pequenas unidades. Desta maneira, o controle dos escoamentos superficiais realizado na fonte diminui a necessidade de grandes estruturas de atenuação e controle na calha dos rios (REZENDE, 2010). O documento “*The* SUDS *Manual*” (CIRIA, 2007) afirma que, se

adequadamente concebidos, construídos e mantidos, os SUDS são tecnicamente mais eficientes ao longo do tempo que os métodos convencionais de drenagem, uma vez que são capazes de diminuir muitos dos efeitos adversos sobre o ambiente causados pelo escoamento das águas pluviais, através dos seguintes efeitos de sua implantação (CERQUEIRA, 2012; BAHIENSE, 2013):

- Redução dos volumes adicionais de escoamento, que tendem a ser aumentados como resultado da urbanização, o que pode aumentar o risco de inundação e a degradação da qualidade da água;
- Facilitação dos processos de recarga das águas subterrâneas para minimizar os impactos sobre os aquíferos e a vazão de base do rio na bacia receptora;
- Redução das concentrações de poluentes nas águas pluviais, protegendo, assim, a qualidade do corpo receptor;
- Redução do volume de água da chuva nas redes de drenagem em sistemas unitários, reduzindo, assim, descargas de águas poluídas nos cursos d'água através de dispositivo *by-pass*.
- Contribuição para a melhoria do valor ambiental e estético de áreas urbanas consolidadas; e
- Criação de habitats para a vida selvagem em áreas urbanas e oportunidades para o aumento da biodiversidade.

O WDUD busca integrar as ciências físicas e sociais, propondo uma gestão mais abrangente das águas urbanas. Segundo WONG (2006), um sistema de drenagem urbana baseado no WSUD deve considerar os seguintes princípios básicos:

- Gestão integrada de água potável, águas residuárias e águas pluviais;
- Integração da gestão das águas urbanas na escala individual do lote à escala regional;
- Integração da gestão sustentável das águas urbanas, arquitetura e paisagismo;
- Integração de medidas estruturais e não-estruturais no manejo sustentável das áreas urbanas.

No LIUDD, além das premissas estabelecidas no WSUD, há referência clara aos processos participativos de tomada de decisão, envolvendo políticas de disseminação de hábitos pessoais que possam diminuir a pressão sobre a água enquanto recurso natural (VAN ROON, 2006). Integra também a gestão das "três águas" dentro dos limites da bacia hidrográfica em escala local, visando a redução e contenção de contaminantes, restaurar,

melhorar e proteger a população nativa (de valor social, cultural e histórico) e a biodiversidade (terrestre e aquática), reduzir as necessidades de mobilidade (pessoas e materiais). O Projeto HIDROCIDADES, ao qual essa dissertação está vinculada, apresenta grande aderência aos princípios do LIUDD.

Essas práticas buscam a utilização de dispositivos de drenagem incorporados na paisagem natural em detrimento dos sistemas de tubulações para a gestão das águas pluviais, contribuindo para o controle da erosão e dos acúmulos de sedimentos que aumentam em virtude do crescimento urbano. A adoção de medidas que minimizem os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico, aplicadas em diferentes escalas espaciais e envolvendo diversas áreas do conhecimento (hidráulica, hidrologia, engenharia, urbanismo, arquitetura, economia, legislação, ciências sociais, etc.), mostra-se uma tendência promissora na elaboração de projetos de sistemas de drenagem. As abordagens sustentáveis para a drenagem urbana buscam, ainda, agregar valor ao ambiente construído e gerar um quadro participativo, onde as comunidades desempenham um importante papel. A aplicação desses princípios de forma integrada no desenho urbano adaptada à realidade brasileira foi proposta através de *framework* e ilustrado por CERQUEIRA (2012) na forma de projeto de novo desenho urbanístico para assentamentos de interesse social.

KAUFFMANN (2011) propõe a criação de um indicador, denominado IOS-BH, como recurso à identificação da intensificação da ocupação urbana face à sustentabilidade. Segundo a autora, este novo indicador, facilmente incorporado à legislação urbanística, agrega os parâmetros: impermeabilização do solo e qualidade das águas, disponibilidade de áreas verdes e densidade de habitantes; relacionados à gestão dos recursos hídricos, urbanos e ambientais.

1.3.1. Medidas de Controle do Escoamento

No contexto atual, a drenagem das águas pluviais e o desejável controle de inundações é obtido por um conjunto de medidas estruturais e não estruturais, permitindo à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio. As ações incluem medidas de engenharia e de cunho social, econômico e administrativo. A pesquisa para a combinação dessas ações constitui o planejamento da proteção contra a inundação ou seus efeitos (TUCCI, 2005).

As medidas estruturais são obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes. Essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como a alteração

da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. As intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser de três tipos:

- **Aceleram o escoamento:** construção de diques e polderes, aumento da capacidade de descarga dos rios (canais) e corte de meandros. Estas medidas geralmente podem produzir impactos a jusante e fora da área protegida. Atualmente devem ser adotadas com cuidado, examinando todos os seus efeitos;
- **Retardam o escoamento:** Reservatórios e as bacias de amortecimento. Este tipo de medida trata de amortecer o pico no reservatório, reduzindo as vazões para jusante. Para isto necessita de área e volume de inundação.
- **Desvio do escoamento:** são obras como canais de desvios, que transferem o escoamento para outras bacias ou trechos de rios. Neste cenário é essencial que os impactos desta nova vazão sejam avaliados para verificar se o sistema que receberá a vazão tem capacidade de suportar esta nova vazão durante as inundações.

As medidas estruturais de controle do escoamento podem ser ainda divididas em dois grandes grupos de soluções, de acordo com a finalidade de cada medida. Conforme CANHOLI (2005):

- **Técnica Convencional ou de Canalização:** Consiste em obras destinadas a retirar rapidamente as águas acumuladas em regiões baixas, baseadas em intervenções com o intuito de melhorar o fluxo das águas, através da aceleração do escoamento e do aumento da capacidade hidráulica dos rios e canais.
- **Técnica Compensatória (não-convencional):** São soluções que diferem do conceito convencional de canalização, mas podem estar a ela associadas, para adequação ou otimização do sistema de drenagem. Dentre as técnicas compensatórias mais frequentemente adotadas, destacam-se aquelas que visam incrementar o processo de infiltração, reter os escoamentos em reservatórios, ou retardar o fluxo nas calhas dos córregos e rios.

WALESH (1989) apud CANHOLI (2005) classifica as diretrizes gerais de projeto de drenagem urbana em “Conceito de Canalização” (convencional) e “Conceito de Reservação” (não-convencional). Ele apresenta uma comparação entre as características dos dois conceitos, cuja adaptação é exposta no Quadro 1.

Quadro 1 - Conceito de Canalização x Conceito de Reservação

CARACTERÍSTICA	CANALIZAÇÃO (medidas convencionais)	RESERVAÇÃO (medidas não-convencionais)
Função	Remoção rápida dos escoamentos	Contenção temporária para subsequente liberação.
Componentes principais	Canais abertos / galerias	Reservatórios a superfície livre, reservatórios subterrâneos, retenção subsuperficial.
Aplicabilidade	Instalação em áreas novas. Construção por fases. Ampliação da capacidade pode se tornar difícil (centros urbanos).	Áreas novas (em implantação). Construção por fases. Áreas existentes (à superfície ou subterrâneas).
Impacto nos trechos de jusante (quantidade)	Aumenta significativamente os picos das enchentes em relação à condição anterior. Maiores obras nos sistemas de jusante.	Áreas novas: podem ser dimensionadas para impacto zero (legislação EUA). Reabilitação de sistemas: podem tornar as vazões a jusante compatíveis com a capacidade disponível.
Impacto nos trechos de jusante (qualidade)	Transporta para o corpo receptor toda carga poluente afluente.	Facilita remoção de material flutuante por concentração em áreas de recirculação dos reservatórios e dos sólidos em suspensão, pelo processo natural de decantação.
Manutenção / operação	Manutenção em geral pouco frequente (pode ocorrer excesso de assoreamento e de lixo). Manutenção nas galerias é difícil (condições de acesso).	Necessária limpeza periódica. Necessária fiscalização. Sistemas de bombeamento requerem operação/manutenção. Desinfecção eventual (insetos).
Estudos hidrológicos / hidráulicos	Requer definição dos picos de enchente.	Requer definição dos hidrogramas (volumes de enchentes).

Fonte: WALESH, 1989 apud CANHOLI, 2005.

As medidas não-estruturais visam a melhor convivência da população com as enchentes e são de caráter preventivo. Algumas destas medidas são discutidas a seguir.

- **Zoneamento de Áreas inundáveis**: Este é um item essencial de um Plano Diretor de Drenagem Urbana. A calha e a várzea inundável dos rios devem ser regulamentadas dentro do zoneamento urbano para que seja vetado qualquer tipo de construção. Nas regiões onde ocorra inundação eventual poderão ser permitidas atividades de recreação, construção de parques e outros usos onde a inundação não provoque prejuízos ou riscos importantes, conservando-se esta área para uso da população e proteção contra habitações ilegais.
- **Sistemas de previsão de cheias e de alerta:** Para que um sistema de previsão e alerta contra inundações funcione efetivamente, uma bacia urbana deverá ser monitorada em tempo real (Kruger, et al., 1999), com coleta contínua de dados hidrológicos.
- **Seguro contra enchentes:** Esta medida permite à população o ressarcimento contra prejuízos causados pelas enchentes. Pode ser uma medida muito útil em locais onde a relocação de habitações seja inviável. A sensação de aparente segurança e a falta de "memória" das grandes cheias do passado podem estimular a ocupação de regiões inundáveis. Construções de alto padrão dificilmente serão removidas, nesses casos, o seguro é uma alternativa a ser considerada. Contudo, há que se ressaltar dois aspectos importantes: o seguro depende do zoneamento prévio e áreas de alto risco não são seguráveis.
- **Educação Ambiental:** A conscientização da população sobre os efeitos negativos da impermeabilização do solo, campanhas contra o lançamento de resíduos sólidos nos córregos e vias públicas, apresentação das alternativas para detenção do escoamento superficial, entre outras iniciativas, representam esforços que produzirão resultados satisfatórios a médio e longo prazo.

A nova concepção dos projetos de drenagem visa uma integração com os planos de desenvolvimento urbano e a gestão da ocupação e uso do solo assim como o uso de técnicas preservacionistas. Essa visão propicia uma melhor abrangência temporal e espacial dos projetos de combate às inundações, uma vez que busca intervir não na consequência das grandes chuvas, mas nas causas das grandes inundações. A mudança para uma visão sustentável das soluções em drenagem urbana exige um compromisso com as consequências futuras das decisões tomadas no presente, portanto as soluções devem ser flexíveis o bastante para permitir possíveis modificações e adaptações no decorrer do desenvolvimento urbano (CANHOLI, 2005).

Tais questões contribuem para o crescente interesse na requalificação de rios e cursos d'água (RILEY, 1998; STANTON, 2007 apud VERÓL, *et al*., 2012) em todo o mundo, associando este conceito também a áreas urbanas. A requalificação fluvial pode ser descrita como um conjunto de práticas que objetivam melhorar a qualidade de um rio ou curso d'água através de ações estruturais e não estruturais. As ações estruturais são intervenções na bacia hidrográfica, enquanto as não estruturais dizem respeito a instrumentos de gestão que viabilizem o manejo sustentável da bacia.

Projetos de requalificação de rios em condições rurais, de uma forma geral, tendem a focar o corredor fluvial, favorecendo a reconstituição de ecossistemas inerentes ao rio. Em bacias muito urbanizadas, além da calha do rio sofrer muitas alterações, também a bacia perdeu suas características naturais. O desafio de requalificar rios urbanos traz uma discussão mais complexa, que precisa focar a bacia como um todo e definir os limites desta requalificação, estabelecendo um estado de referência, equilibrando ambiente natural e construído de forma aceitável e harmônica (VERÓL, 2013).

Neste contexto está inserido o conceito de Requalificação Fluvial Urbana (GUSMAROLI *et al*, 2011 apud VERÓL, *et al*., 2012), que visa a melhoria ambiental dos cursos d'água ou dos atributos relativos à sua qualidade físico-química, biológica e hidromorfológica, através da adoção de uma abordagem ecossistêmica, a fim de aproveitar a oportunidade de introduzir o conceito de reabilitação do rio a partir do ponto de vista de uma melhoria ambiental, olhando a cidade como um organismo em constante transformação e, portanto, capaz de modelar-se e adaptar-se, mesmo que apenas em parte, às demandas de recuperação dos cursos d'água.

Neste sentido, é um desafio encontrar formas de recuperar os rios de maneira mais natural e repensar o crescimento da cidade como consequência. Assim, mesmo ações de alcance restrito, pelas limitações urbanas, podem servir como exemplo para as cidades em desenvolvimento não cometerem o mesmo erro das cidades já muito consolidadas.

1.3.2. Dispositivos para Controle das Águas Pluviais

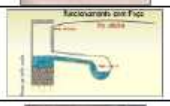
Tendo em vista que as metodologias apresentadas e discutidas aqui convergem para a questão da gestão das águas urbanas e para a adoção da água como recurso natural central associado à questão de urbanização, observa-se que as estruturas físicas propostas em cada uma das metodologias possuem, em grande parte, funções análogas entre si. Destaca-se também que as diferenças regionais proporcionam diferentes focos e preocupações em cada

uma das metodologias. As estruturas apresentadas aqui de forma isolada são, muitas vezes, combinadas para maximizar a infiltração de água no solo e a diminuição da pressão sobre a rede de drenagem. As estruturas fazem a tentativa de reproduzir a drenagem natural de uma determinada área antes das ações antrópicas associadas à urbanização.

Entretanto, verifica-se que há uma fluidez de conceitos no que tange estas estruturas, ou seja, muitas vezes um autor cita uma estrutura com uma nomenclatura e outros se referem a estruturas semelhantes com outros nomes. Desta forma, CERQUEIRA (2012) elaborou o quadro aqui apresentado como Quadro 2, nos quais são apresentadas as estruturas, informando os diferentes jargões observados, caracterizando tais estruturas, na versão português–inglês. Segundo o autor, a confecção destas tabelas tem como objetivo oferecer um glossário de consulta ágil a pesquisadores interessados no tema.

A seguir, a partir da Figura 3 à Figura 8 são ilustrados alguns destes dispositivos, como reservatórios de detenção e retenção, faixas gramadas, reservatório para captação de águas pluviais em edifício, esquema de pavimentos permeáveis, poço de infiltração, trincheira de infiltração e telhado verde, implantados em diferentes localidades.

Quadro 2 - Consolidação das estruturas utilizadas nas metodologias de urbanismo de baixo impacto: LIUDD, LID, WSUD, e SUDS – português – inglês

Consolidação das Estruturas Utilizadas em LIUDD, LID, SUDS e WSUD.				
Dispositivo	Device	Imagem	Descrição	Finalidade
Bacias de Amortecimento	Wetlands		São áreas no entorno de cursos d'água, que são utilizadas como amortecimento para o sistema de drenagem	Áreas voltadas para absorver o volume de água proveniente do transbordamento de um rio, lago ou canal.
Bacias de Detenção	Detention Basins		Reservatórios mantidos secos na maior parte do tempo, os quais frequentemente recebem outros usos nos períodos de tempo seco.	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do amarzenamento temporário das águas pluviais.
Bacias de Retenção	Retentions Basins		Reservatórios onde é mantida lâmina d'água mesmo nos períodos de tempo seco.	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do amarzenamento das águas pluviais e também ser utilizado como espelho d'água.
Caminhos Verdes	Greenways		Vias verdes para pedestres e ciclistas sem pavimentação., semelhantes à parques públicos utilizados para transportes.	Aumento da proporção de áreas verdes, aumento de áreas permeáveis, melhoria da qualidade de vida. .
Ciclovias Verdes	Bike Ways		Variação da estrutura Caminhos verdes, voltada para o transporte em bicicletas, e integradas ao sistema de transporte público.	Aumento da proporção de áreas verdes, aumento de áreas permeáveis, melhoria da qualidade de vida. .
Jardim de Chuva	Rain Garden / Water Garden		Jardins ornamentais implantados em estruturas preaparadas para absorver água e promover a infiltração desta no solo.	Diminuir o volume do escoamento superficial e aumentar a proporção de áreas verdes nas cidades.
Jardim de Infiltração	Vegeted Infiltration Swale or Bioretention Cell		Jardins implantados em áreas permeáveis, capazes de reter água e promover a infiltração no solo.	Diminuir o volume do escoamento superficial e aumentar a proporção de áreas verdes nas cidades.
Pavimento Permeável / Pavimento Poroso	Pervious Surface / Permeable Paving		implantação de revestimento de pisos de vias e áreas publicas que permitam a penetração águas pluviais no solo.	Esses dispositivos ampliam a área permeável, contribuindo para a diminuição do escoamento superficial das águas pluviais.
Poço de Infiltração	Pit of Infiltration		Reservatórios de pequena dimensão e fácil instalação. Costumam ser encontrados em variadas metodologias de implantação	Reduzir os picos de cheia à jusante, através do amarzenamento e ilfiltração das águas pluviais.
Telhados Verdes	Green Roofs		Cobertura de edificações utilizada para plantio de vegetação ornamental ou de genêros alimentícios.	Redução de volume de águas pluiviais, melhoria no desempenho térmico das edificações, aumento da proporção de áreas verdes.
Trincheiras de Infiltração	Infiltration Trench*		As trincheiras têm a propriedade de armazenar pequenos volumes enquanto as águas pluviais são infiltradas no solo	amplia a área permeável, infiltra água no solo e contribuir para a diminuição do escoamento superficial das águas pluviais.
Valas de Infiltração / Biovaletas	swales of Infiltration*		São como calhas capazes de receber ás águas pluviais, conduzir o quantitativo de água para jusante e permitir a infiltração de parte dela.	Tais estruturas possuem finalidade semelhante com a das trincheiras, entretanto são simplificadas.

Fonte: CERQUEIRA, 2012.

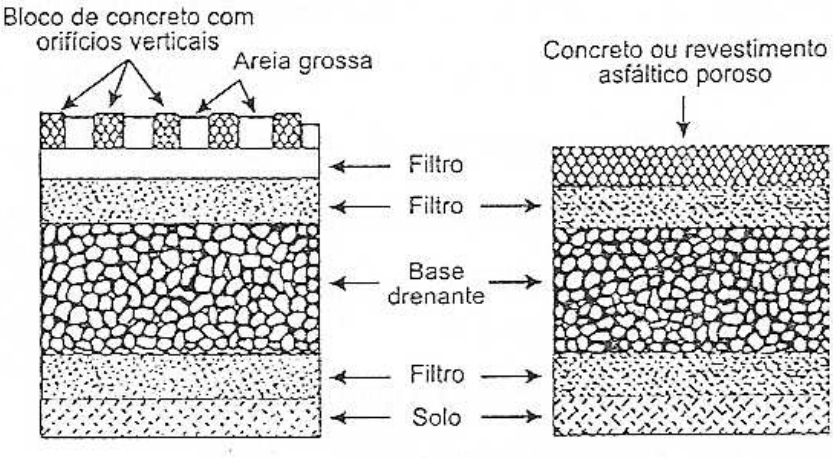
Figura 3 - Reservatório de retenção e detenção /Colorado, EUA

Fonte: SMDU, 2012.

Figura 4 - Faixas Gramadas/Colorado, EUA e reservatório em edifício

Fonte: SMDU, 2012; SEMADS, 2001.

Figura 5 - Esquema de pavimentos permeáveis

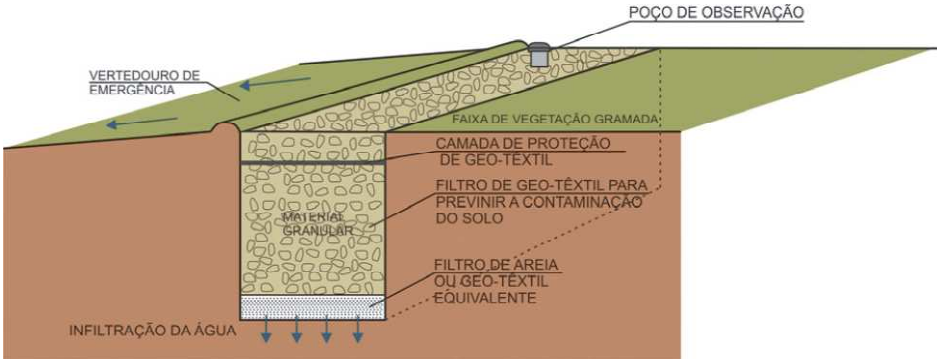


Fonte: URBONAS e STAHRE, 1993

Figura 6 - Esquema de poço de infiltração e sua integração a uma área de lazer/ Kingston, Austrália

Fonte: SMDU, 2012.

Figura 7 - Esquema de trincheira de infiltração/Kingston, Austrália



Fonte: SMDU, 2012.

Figura 8 - Esquema de telhado verde – Projeto HIDROCIDADES e Unidade demonstrativa-experimental na Escola Municipal Teófilo Moreira da Costa

Fonte: MARY *et al*., 2008 apud CERQUEIRA, 2012; PIMENTEL DA SILVA, *et al*., 2013.

1.4. Simulação Hidrológica-Hidráulica e Drenagem Urbana

Os modelos computacionais constituem elemento importante na gestão das águas pluviais e no estudo de alternativas para os Projetos de Drenagem Urbana. A simulação matemática envolve o uso de modelos que representam por analogia física-matemática o comportamento de um determinado sistema, nesse caso os processos envolvidos no ciclo hidrológico na bacia hidrográfica, assim como os processos que ocorrem nos escoamentos fluviais, a que estarão sujeitos o conjunto de componentes do projeto de drenagem urbana. A simulação permite a previsão de respostas do sistema, a partir de um estímulo de entrada e estado iniciais do sistema. O exercício da simulação com modelos permite analisar diferentes cenários e estudar alternativas para os projetos de drenagem, assim como para a gestão das águas pluviais. Os modelos determinísticos constituem um sistema de equações e sentenças matemáticas que representam o sistema hidrológico na bacia hidrográfica e os escoamentos hidráulicos nos diferentes trechos de rios da bacia. A solução do sistema de equações não é trivial e demanda a utilização de ferramentas computacionais para o processamento dos cálculos. Deste modo, são desenvolvidos programas computacionais para simulação dos modelos hidrológicos e hidráulicos.

Nos estudos de drenagem urbana a aplicação dos modelos hidrológicos-hidráulicos têm o objetivo de prever vazões e níveis de d'água a partir de eventos ou série histórica pluviométrica. Os eventos pluviométricos podem ser estimados a partir de equações de chuvas intensas, que relacionam intensidade de chuva, duração e frequência, chamadas de curvas I-D-F. Nos estudos hidrológicos de gestão das águas pluviais e dos projetos de drenagem urbana, o elemento de frequência é representado pelo risco ou probalidade de que um evento crítico seja igualado ou ultrapassado, e é representado pelo tempo de recorrência, dado em anos.

A partir das vazões e níveis d'água simulados a partir das chuvas críticas, são alocadas e dimensionadas as redes e estruturas de controle do projeto de drenagem. Em estudos de gestão de águas pluviais e projetos de drenagem, além de estudos com chuvas observadas, são adotadas chuvas com 25 anos de tempo de recorrência para o dimensionamento da microdrenagem e, até 100 anos para o projeto da macrodrenagem (Ministério das Cidades).

A modelagem e simulação da bacia hidrográfica constituem elementos importantes no gerenciamento da drenagem urbana, pois permitem avaliar cenários, planejar e definir políticas sustentáveis e resilientes para a gestão dos recursos hídricos e, de uso e ocupação do solo. As estapas envolvidas no processo de simulação e modelagem são:

a) Escolha da concepção de modelagem, assim como conjunto de softwares, incluindo os de interface (aquisição de dados alfa numéricos e geo-espaciais, assim como ilustração e representação gráfica das respostas das simulações);
b) Constituição das variáveis de entrada e séries de vazão ou níveis d'água para ajuste e calibração do modelo;
c) Ajuste e calibração de parâmetros do modelo;
d) Validação do modelo;
e) Simulação de cenários;
f) Interpretação dos resultados.

1.4.1. Concepção de modelagem

Os modelos trazem em sua constituição uma concepção do sistema real. Mas, o sistema real, o ciclo da água e os escoamentos na bacia hidrográfica, são de natureza complexa, e, por mais detalhada que seja sua concepção, há simplificações intrínsecas na representação da dinâmica dos processos chuva-vazão e da hidrodinâmica envolvida nos escoamentos fluviais.

A concepção de modelagem está diretamente associada aos objetivos dos estudos e resultados necessários, ao mesmo tempo que busca atender a uma representação fiel do sistema natural. Há uma lógica abrangente e descritiva da fase terrestre do ciclo hidrológico[2] pré-estabelecida e aceita. No entanto, os sistemas naturais apresentam particularidades locais, passam por alterações naturais e são influenciados por ações antrópicas que impactam o ciclo da água. Em uma bacia hidrográfica coberta por floresta densa, os processos de interceptação vegetal e evapotranspiração serão mais relevantes do que em uma bacia densamente urbanizada e impermeabilizada que apresenta pouca vegetação. Se o interesse de modelagem for apenas dimensionar um canal fluvial, a partir de uma vazão inicial de entrada, é possível com a aplicação e solução das equações que representam a hidrodinâmica dos escoamentos

[2] A precipitação que ocorre sobre a terra se dispersa de formas variadas. Parte da água que se precipita da atmosfera retorna em forma de vapor d'água antes mesmo de atingir a superfície terrestre. Além disso, a água, interceptada pela vegetação e outros seres vivos, retorna ao estado gasoso através da evapotranspiração. A parte restante atinge o solo dando origem a dois tipos de escoamento: o subterrâneo e o superficial, formas de transporte da água na fase terrestre. Devido à influência da gravidade, tanto o escoamento superficial como o subterrâneo são realizados na direção das áreas mais baixas do relevo e transportados, em sua maioria, para os oceanos.

fluviais obter as vazões (e níveis d'água) em diferentes trechos e adequar/projetar seções de escoamento compatíveis, de forma a evitar transbordamentos e os transtornos associados. Por outro lado, se o interesse está no estudo dos principais elementos do ciclo hidrológico, os escoamentos fluviais podem ser representados de forma mais simplificada, e maior detalhe pode ser incorporado na representação da evapotranspiração, da infiltração, do escoamento superficial, do armazenamento e escoamentos nos solos, sem prejuízo da qualidade e da precisão dos resultados das diferentes abordagens.

Os modelos podem também se diferenciar em relação à representação ou discretização de suas variáveis e parâmetros no espaço, neste contexto são classificados em concentrados ou distribuídos. Quanto maior a variabilidade das características morfométricas e dos condicionantes climáticos ao longo da área da bacia hidrográfica, maior a necessidade de usar modelos distribuídos para representar os seus processos, pois a variabilidade espacial pode constituir influência significativa na representação dos processos físicos.

O uso de modelos distribuídos requer maior complexidade de fornecimento de informações, o que deve ser feito com cautela, pois a incerteza na estimativa dos parâmetros e variáveis pode representar maior erro que a precisão dos resultados fornecidos.

Os modelos podem ainda ser contínuos ou discretos no tempo. Os primeiros são com licençaaqueles cujos processos são contínuos, ao passo que nos sistemas discretos as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos no tempo. A maioria dos modelos é contínuo, porém representado de forma discreta no tempo.

Os modelos podem ainda, ser conceituais, quando os processos físicos são a base da formulação de suas funções, ou empíricos, quando o ajuste matemático das variáveis de entrada e saída calculadas e observadas é a base da formulação das funções do modelo, que não têm uma aderência direta ou explícita aos processos físicos envolvidos.

Os modelos conceituais chuva-vazão essencialmente envolvem a aplicação do princípio da conservação de massa representado pela equação da continuidade. A bacia hidrográfica recebe como aporte hídrico as precipitações. Parte da precipitação infiltra-se e contribui para o armazenamento nos solos da bacia, a outra parte escoa sobre as superfícies. As águas infiltradas nos solos, além de contribuir para o armazenamento nos solos podem escorrer lateralmente, constituindo o escoamento sub-superficial, além disso está sujeita a percolação no solo até atingir a região saturada do mesmo. Na região saturada dos solos é representado, além do armazenamento, o escoamento subterrâneo, também conhecido como básico ou de base. Alguns modelos também representam as águas que excedem a capacidade de armazenamento dos solos, constituindo um componente de escoamento superficial por

excesso de saturação. Todas as águas armazenadas estão sujeitas à evaporação e as partes vegetadas à transpiração. Nesses modelos, cada um desses componentes é representado por equacionamento clássico para representação conceitual dos mesmos. Por exemplo, adotam a equação de Horton para representar o fluxo de infiltração das águas pluviais nos solos ou a equação do *"Soil Conservation Service"* (Curva Número) para representar o escoamento superficial, e por diferença da precipitação, estimam a infiltração. É muito comum nesses modelos a analogia da bacia com um sistema de reservatórios, onde são representados em diferentes etapas, o armazenamento, os fluxos entre os mesmos, e parcelas de saída dos reservatórios que representam os escoamentos. O somatório dos elementos de escoamento (superficial, subsuperficial e subterrâneo) constituem a vazão no exutório da bacia hidrográfica. A cada intervalo de tempo é verificado o balanço hídrico, ou seja, as precipitações constituem a entrada de água no sistema e as saídas são representadas pelas taxas de evapotranspiração e vazões que deixam a bacia. A diferença entre entrada e saída do sistema constituem o armazenamento no mesmo.

Os modelos chamados de base física diferem dos modelos conceituais por considerarem também em sua concepção uma abordagem física, representada por equações diferenciais clássicas estabelecidas na literatura. Esses modelos, acabam também por incluir um maior detalhamento para representar a variabilidade espacial dos parâmetros, das variáveis de entrada/saída e de estado do modelo. Tipicamente, as equações diferenciais não possuem solução analítica e esses modelos incorporam rotinas computacionais que propiciam a solução das mesmas por métodos numéricos (diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno).

O projeto de sistemas de drenagem urbana requer também a avaliação da capacidade de veiculação de vazão dos canais existentes, a identificação de pontos de estrangulamento do escoamento e a capacidade de amortecimento de cheias nas calhas dos rios e canais. Normalmente os canais existentes possuem diferentes seções com diferentes tipos de revestimento ao longo dos trechos, que conduzem a diferentes tipos de escoamento, gradual ou bruscamente variado. Para análise hidráulica destes canais são utilizados modelos hidráulicos, que variam conforme o tipo de escoamento.

Existem basicamente dois tipos de modelos hidráulicos utilizados em drenagem urbana, que são os modelos de remanso e os hidrodinâmicos. Os modelos de remanso são baseados nos princípios da conservação de energia (equação de Bernoulli) e conservação da massa (equação da Continuidade). Eles podem ser aplicados quando for admitida a hipótese de distribuição hidrostática de pressões, não havendo componente de aceleração do

escoamento, de modo que o atrito seja o fator determinante do escoamento. Na prática esta condição ocorre para o regime de escoamento permanente uniforme, podendo ser estendida para o regime gradualmente variado, em que a geometria, a declividade, a lâmina d'água e a velocidade são constantes em cada seção transversal. A quantificação do atrito no escoamento é feita normalmente por meio das equações de Chézy e Manning.

Os modelos de remanso possibilitam obter a altura da lâmina d'água, uma vez conhecidas a vazão de projeto nas seções de interesse, a geometria do canal (transversal e longitudinal), a rugosidade do canal e das várzeas (expressa em termos de coeficientes hidráulicos estimados de acordo com o modelo utilizado) e o nível d'água na seção inicial (para o escoamento subcrítico) e final (para o escoamento supercrítico) do trecho considerado. O estudo do escoamento em canais onde ocorrem variações bruscas das características hidráulicas, causadas por obstáculos diversos como mudança brusca de seção transversal, é feito com base nas equações de conservação da quantidade de movimento e equilíbrio de forças, como é o caso do ressalto hidráulico.

Os modelos hidrodinâmicos são aplicados quando o regime de escoamento é não permanente, ou seja, as características do escoamento variam no tempo em cada seção. Eles possibilitam o estudo da passagem de uma onda de cheia pelo canal. Os modelos de propagação de cheias em canais incorporam as equações de balanço de massa e de quantidade de movimento (FONSECA, 2008).

A formulação dos modelos hidrodinâmicos de propagação do escoamento em canais baseia-se em duas leis: a lei de conservação de quantidade de movimento (ou segunda lei de Newton), que estabelece que a variação temporal da quantidade de movimento em um sistema é igual à resultante das forças aplicadas ao sistema (BAPTISTA *et al*., 2001), e na lei de conservação de massa, representada pela equação da continuidade. Juntas, estas equações formam um sistema conhecido por Equações de Saint Vennant. As variáveis dependentes nestas equações são a vazão Q(x,y,z,t) e a altura de escoamento h(x,y,z,t). O tratamento unidimensional é aplicado em muitos casos a fim de simplificar o equacionamento, tratando as variáveis independentes vazão, Q(x,t), e nível d'água, h(x,t), em termos dos seus valores médios na seção transversal. A solução do sistema de equações de Saint Vennant requer procedimentos numéricos para o tratamento das equações diferenciais, por métodos de discretização por diferenças finitas, que podem ser implícitos ou explícitos.

Mais recentemente, os sistemas computacionais evoluiram para uma representação mais integrada e próxima do sistema real. Módulos de simulação que antes funcionavam de forma isolada para simular o ambiente construído, assim como os ciclos bio-geoquímicos,

incluindo a simulação dos elementos químicos e suas reações com o ambiente, sejam elas intrínsecas do sistema real ou decorrentes de atividades antrópicas, foram integrados. Esse desenvolvimento se deu em paralelo com a evolução das tecnologias de monitoramento dos processos naturais, computacionais de processamento e, dos métodos e dispositivos da geomática, que possibilitaram a criação de bases dados relacionais complexas dos sistemas terrestres, análises espaciais, e até mesmo, nesse mesmo framework dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a integração e processamento de sistemas (antes isolados) de forma integrada e mais dinâmica – aproximando-se dos sistemas naturais. Os SIGs podem ainda estender suas aplicações agregando análises multicritério com indicadores que além dos aspectos técnicos, combinam aspectos sociais, culturais e econômicos, fornecendo suporte aos processos de tomada de decisão que envolvem os sistemas ambientais terrestres naturais e nele incluído o ciclo da água e seus escoamentos na forma mais abrangente.

No Quadro 3 são apresentados de forma ilustrativa vários pacotes computacionais que constituem sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água, inclusive escoamentos. A escolha da concepção de modelagem mais adequada a cada caso depende de fatores como tamanho da bacia, uso e ocupação do solo, a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, dados disponíveis e resultados necessários/esperados. É muito importante que seja utilizado um modelo cujos parâmetros de entrada sejam condizentes com as informações disponíveis para a bacia hidrográfica de estudo. A experiência do usuário com determinado Programa Computacional pode ser também importante na escolha do sistema e sua concepção de modelagem.

Quadro 3 - Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
3D-Catchment Conceptual Multilayer Model (ArcEGMO)	Modelo 3D, determinístico, conceitual, multicamadas	Modelagem chuva-vazão; simulação de balanço hídrico; balanço de nitrogênio e carbono, se desejado, em escala regional; modelagem da vegetação (rotação de culturas, produção, desenvolvimento florestal com/sem distúrbios e/ou colheita); estudos de impacto das mudanças climáticas; estudos de impacto da mudança no uso do solo.	Bureau of Applied Hydrology, Germany	www.bah-berlin.de
Bochum Water Balance Model (BWBM)	Modelo espacialmente distribuído, contínuo, que leva em consideração a umidade do solo e a precipitação/degelo para a simulação do escoamento superficial	Simulação de vazão e estimativa espacial das variáveis hidrológicas para a previsão, gestão dos recursos hídricos, manejo do solo, modelagem da qualidade da água, os estudos de mudanças climáticas	U. S. Department of Agriculture	http://www.wcc.nrcs.usda.gov
CASCade of Planes, 2-Dimensional (CASC2D)	Espacialmente variado	Simulaçãohidrológica de bacias hidrográficas espacialmente variadas e erosão / transporte de sedimentos para estudos científicos hidrológicos e análises detalhadas de engenharia. Solução de problemas, onde a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas, precipitação, escoamento superficial e erosão são importantes.	US Army Research Office and US Army Corps of Engineers	
CEQUEAU	Determinístico distribuído. Precipitação contínua e escoamento de degelo	Simulação de vazão; previsões de curto e médio termo com várias opções de atualização. Balanço hídrico através de reservatórios interconectados	Institut National de la Recherche Scientifique. Québec, Canadá	
Central Valley Groundwater and Surface water model (C2VGSM)	Elementos finitos, Quasi 3D	Simular a distribuição de água / movimento ao longo de todo o Vale Central da Califórnia. Este modelo é realmente uma aplicação específica do IGSM mais geral (Integrated Groundwater/Surface Water Model). O CVGSM foi atualizado e migrou para um novo código IWFM (Integrated Water Flow Model)	Department of Water Resources of California	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/
Dynamic Watershed Simulation Model (DWSM)	O DWSM é de base física; baseado em eventos; distribuído; chuva-vazão em regime não permanente; propagação da inundação; erosão-transporte-deposição do solo/sedimentos; modela a mistura-transporte de agrotóxicos. Detalhes apenas o componente chuva-vazão (DWSM-Hydro) estão listados aqui. Para os componentes de sedimentos e agrotóxicos, em contato com o desenvolvedor do modelo	1. Avaliar as condições ambientais de uma bacia hidrográfica, como inundações, erosão do solo em montanhas e rios, sedimentação e contaminação da água por agrotóxicos. 2. Avaliar o uso da terra alternativo e melhores cenários de práticas de gestão na redução de enchentes, erosão de leitos, assoreamento de leitos e açudes (represas, lagos, lagoas de detenção, etc), e poluição de corpos hídricos. 3. Determinar parâmetros de projeto confiáveis (taxa de escoamento, velocidade do escoamento, profundidade, etc) para a concepção de medidas e estruturas de controle de enchentes e erosão.	Woolpert	

Fonte: Adaptado de *Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation*.

Quadro 3 - Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água. CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
DHSVM	Modelo distribuído, escala regional	Representa explicitamente os efeitos da topografia e vegetação em fluxos de água através da paisagem.	University of Washington	http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml
Hydrological River Basin Environment Assessment Model (HydroBEAM)	Modelo distribuído com qualidade da água e ecossistema	i) modelo de escoamentode base física (onda cinemática, equilíbrio térmico e outros); ii) Modelo de escoamento distribuído usando DEM e GIS; iii) Cálculo da quantidade de água, qualidade (incluindo disruptor endócrino) e ecossistema para avaliação ambiental.	Water Resources Research Center, Disaster Prevention. Research Institute, Kyoto University	
Hydrospheric Atmospheric Sciences Model (IHAS)	Modelo hidrológico numérico	Compreender a dimensão do aquecimento na bacia e regimes hídricos através de modelagem hidrológica	Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences (IHAS), Nagoya University, Japan	
Integrated Water Flow Model (IWFM)	Modelo hidrológico contínuo integrado	Os objetivos do IWFM são simular: • necessidades de água para áreas agrícolas e urbanas, bem como da zona de raiz e processos de escoamento na superfície terrestre sob condições climáticas especificadas pelo usuário; • águas subterrâneas e dinâmica do escoamento sob tensões em termos de bombeamento e desvios, bem como recarga de aquífero e escoamento superficial em vazões geradas devido à irrigação e chuva. • a utilização conjunta das águas subterrâneas e das vazões de rios para atender às demandas agrícolas e urbanas.	California Department of Water Resources	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/index.cfm
Kinematic Runoff and Erosion Model, Version 2 (KINEROS2)	Um modelo distribuído de parâmetros, modelo chuva-vazão-erosão baseado em eventos	Interpola interrupção de chuvas espacialmente distribuídas e encaminha água e sedimento através de um sistema de cascatas de infiltração dinâmica e planícies erodidas, canais abertos trapezoidais, condutos fechados circulares e reservatórios de detenção.	Southwest Watershed Research Center. Tucson, Arizona	http://www.tucson.ars.ag.gov
Physically-Based Distributed Erosion Model (MEFIDIS)	Base física, distribuído espacialmente, modelo hidrológico para eventos climáticos extremos	1. Simular geração de escoamento e encaminhamento, juntamente com os padrões de desprendimento, transporte e deposição de solo para um evento climático extremo dentro de uma única bacia hidrográfica. 2. Simular os processos hidrológicos e de erosão mais importantes em bacias hidrográficas 1. Simular geração de escoamento e encaminhamento, juntamente com os padrões de desprendimento, transporte e deposição de solo para um evento climático extremo dentro de uma única bacia hidrográfica. 2. Simular os processos hidrológicos e de erosão mais importantes em bacias hidrográficas Mediterrânicas de médio a grande porte utilizando dados disponíveis localmente.	Center for Ecological Modeling, IMAR – Institute for Marine Research (hosted by the New University of Lisbon).	

Fonte: Adaptado de *Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation*.

Quadro 3 - Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água. CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
MIKE SHE	Base física, distribuído e integrado	O objetivo do MIKE SHE é a simulação de processos hidrológicos com ênfase em águas superficiais - interações com águas subterrâneas, escoamento em canais, escoamento em zonas não-saturadas e escoamento subterrâneo.	DHI Inc.	http://www.dhigroup.com
Object Watershed Link Simulation (OWLS)	Modelo contínuo chuva-vazão. Modela escoamento de degelo e o encaminhamento de ondas de cheia em escoamento não-permanente	Simular fisicamente e visualmente o tempo real ou processos hidrológicos de curto prazo para as pequenas bacias hidrográficas florestadas e fornecer informações detalhadas sobre a resposta das bacias hidrográficas às mudanças ambientais.	Wilson Environmental Consulting	http://hydromodel.com
One-Dimensional Numerical Model (SVAT-HYCY)	Modelo numérico 1D	Entender o aquecimento e os regimes hídricos em uma escala de bacias hidrográficas através de modelagem hidrológica.	Frontier Research Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	
Storm Water Management Model (SWMM)	Modelo de base física, distribuído, não-permanente, contínuo. Modelagem de escoamento de águas pluviais e qualidade da água em áreas urbanas	É um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão usado para um único evento ou simulação contínua da quantidade e qualidade do escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas. O componente de escoamento do SWMM opera sobre um conjunto de sub-bacias que recebem a precipitação e geram escoamento e cargas poluentes. O módulo de transporte do SWMM transporta este escoamento através de um sistema de tubos, canais, dispositivos de armazenamento / tratamento, bombas e reguladores. Permite a avaliação de dispositivos LIDs para atender às metas de sustentabilidade.	U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.	http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/swmm.html
TOPographic Kinematic Approximation and Integration (TOPIKAPI)	Modelo chuva-vazão semi-distribuído	1. Tirar proveito de modelos distribuídos contendo parâmetros significativos fisicamente; 2. Superar a inconsistência de negligenciar a fase transiente como no TOPMODEL; 3. Incorporar a possibilidade de obtenção de uma versão agrupada do mesmo modelo integrando os processos durante o aumento de tamanho de domínios, sem a necessidade de recalibração, e 4. Permitir a aplicação do modelo em escala crescente espacial de encosta a escala de captação para GCMs.	Department of Earth and Geo-Environmental Sciences, University of Bologna, Bologna, Italy	
WASH123D	Baseado no príncipio da conservação de massa, de base física, modelo distribuído	Simular o escoamento de fluidos, o transporte térmico, transporte de salinidade, transporte de sedimentos, transporte da qualidade da água dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos em uma bacia hidrográfica.	University of Central Florida; ORD, U.S. EPA; and ERDC, US Army Corps	

Fonte: Adaptado de *Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation*.

Quadro 3 - Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água. CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:
Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX)	Modelo contínuo de simulação chuva-vazão e qualidade da água	O modelo APEX foi construído para avaliar diferentes estratégias de manejo de solo, considerando sustentabilidade, erosão (eólica e fluvial), economia, oferta e qualidade da água, qualidade do solo, clima e pragas.	Texas AgriLife Research
Geomorphology-Based Hydrological Model (GBHM)	Modelo hidrológico distribuído de base física	Simulação chuva-vazão, análise de recursos hídricos em bacias com grandes rios	Institute of Industrial Science, University of Tokyo
Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	O programa começou como um simulador chuva-vazão baseado em eventos para estudos hidrológicos da água superficial. Ele agora inclui evapotranspiração, degelo, e os modelos de infiltração para estudos de simulação contínua.	O programa é projetado para simular os processos do ciclo hidrológico na superfície terrestre. Consequentemente, contém componentes para a precipitação, evapotranspiração potencial, degelo, interceptação das copas, armazenamento superficial, infiltração, escoamento superficial, escoamento de base, transporte em canais, e as perdas no canal. Ele também inclui componentes para a simulação de reservatórios e desvios. Cada uma das fases do ciclo hidrológico podem ser descritas com um modelo de desses processos específicos. Sempre que possível, várias opções de modelo estão disponíveis para permitir que o programa se adapte a uma grande variedade de regiões geográficas, disponibilidade de dados, escalas espaciais, escalas temporais, e as exigências do projeto. Destina-se a ser usado isoladamente ou em combinação com outros softwares HEC para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de vazões, melhoria ambiental, impacto da urbanização futura , projeto de vertedouros de reservatórios, redução de danos causados pelas inundações, a regulação de planícies de inundação e operação do sistema	US Army Corps of Engineers
MIKE 11 RR (Rainfall Runoff)	É um modelo chuva-vazão contínuo, determinístico e concentrado	O modelo MIKE 11 RR é aplicado para: 1. Análise hidrológica geral; 2.Previsão de inundações (geralmente em combinação com o modelo hidrodinâmico MIKE 11); 3. Preenchimento de registros de vazões; 4.Previsão de vazões baixas	DHI Inc
Soil Conservation Service Curve Number Model (SCS-CN)	Modelo determinístico	Determinar infiltração, volumes do escoamento superficial, taxa de infiltração, e hidrograma de escoamento.	Natural Resources Conservation Service
Watershed Bounded Network Simulation Model (WBNM)	Modelo de simulação chuva-vazão, baseado em eventos. Modela bacias naturais e urbanas.	Estudos de cheias em bacias naturais e urbanas, mitigação de inundações.	Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia
IPH II	Concentrado	Perdas por evaporação e interceptação; separação do escoamento; propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fonte: Adaptado de *Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation.*

Elementos que necessitam ser entendidos na utilização de um modelo, na solução de um determinado problema:

(a) objetivos do estudo: o objetivo para o qual o modelo é utilizado influencia na escolha do mesmo, já que modelos com muitos parâmetros podem ser ineficientes quando o problema não exige grande detalhamento dos processos;

(b) as características da bacia e do rio: a variabilidade das características físicas e climáticas das bacias é muito grande, por isso é necessário conhecer bem as vantagens e desvantagens de cada modelo e das técnicas para melhor utilizar os modelos e algoritmos existentes;

(c) disponibilidade de dados: os dados existentes podem inviabilizar algumas metodologias mais sofisticadas que exigem muitas informações, enquanto outras, que utilizam poucos parâmetros, podem ser úteis para responder as questões pendentes;

(d) familiaridade com o modelo: muitas vezes, o melhor modelo costuma ser aquele com que o usuário tem maior sensibilidade sobre o seu uso, dentre aqueles tecnicamente aplicáveis a um problema.

1.4.2. Constituição da Base de dados

A seleção e preparo das variáveis de entrada constituem uma das etapas na aplicação do modelo e das técnicas de simulação hidrológica-hidráulica na elaboração e estudo dos projetos de drenagem. As variáveis de entrada normalmente utilizadas em modelos são séries históricas de precipitação, evapotranspiração potencial (ou dados climatológicos que permitam o seu cálculo), dados de vazão para a calibração, além de características básicas do escoamento, sobretudo perfil das seções transversais de escoamento e a declividade de cada trecho (percurso entre as seções transversais).

É preciso definir um período de dados ou um conjunto de eventos representativos a serem utilizados na calibração dos parâmetros do modelo e outro(s) para validação dos mesmos. É preciso também um conhecimento prévio da estrutura computacional do sistema ou software, assim como o conhecimento da concepção de modelagem, permitindo ao usuário uma estimativa inicial coerente dos parâmetros do modelo e de valores iniciais para as variáveis de estado. É comum iniciar as simulações no início do ano hidrológico (ou seja em outubro), de forma a facilitar a estimativa do estágio inicial de umidade na bacia e níveis

fluviais, já que nesse período corresponde ao fim da estiagem e predomina o escoamento de base.

Dependendo da sofisticação da concepção do modelo, serão necessários outros dados espaciais, sobretudo a caracterização morfométrica, caracterização de uso e ocupação dos solos e divisão da bacia de estudo em elementos básicos caracterizados na concepção de modelagem (células quadráticas, vertentes ou elementos hidrográficos homogêneos, unidades de resposta hidrológica). Muitos modelos utilizam o modelo digital de terreno (MDT) para definição das declividades, direção dos escoamentos e limites da bacia hidrográfica. Quanto menor a área da bacia de estudo, mais detalhada deverá ser a escala do mapeamento, de forma a identificar a morfologia dos terrenos e direcão dos escoamentos. Alguns estudos envolvem mapeamento até na escala 1:5.000. A escala do mapeamento influencia de forma direta a precisão do MDT.

Para alguns sistemas computacionais estão disponíveis interfaces facilitadoras para armazenamento e alimentação dos dados no sistema, e até mesmo para o processamento e exibicão de resultados.

É importante um bom leventamento de dados bibliográficos a fim de identificar valores coerentes para a estimativa inicial dos parâmetros.

1.4.3. Ajuste e Calibração de Parâmetros

O processo de ajuste e calibração dos parâmetros envolve a identificação do conjunto que resultará na melhor aproximação entre valores observados e estimados no sistema computacional. Na calibração dos parâmetros pode ser adotado, o que é mais comum, uma série histórica de vazões observadas, mas os ajustes podem ser feitos para níveis d´água ou velocidades de escoamento.

A calibração pode ser por tentativa e erro, chamada manual. Exige domínio da concepção de modelagem para chegar a um conjunto “ótimo” de parâmetros e pode ser bastante trabalhosa. Em geral, não é trivial a calibração ou ajuste dos parâmetros. Alguns sistemas dispõem de um dispositivo para a calibração automática. Nesse caso, o sistema adota um ou mais algoritmos matemáticos para otimização de funções de forma a minimizar as diferenças entre valores observados e calculados pelo modelo. Nessa opção será necessária a definição da função que será otimizada, chamada de objetivo, que relaciona os valores observados e calculados pelo sistema. A cada passo, o algoritmo calcula novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção de busca de um menor

valor da função objetivo. O processo termina ao ser encontrado um ponto de mínimo da função. É frequente o uso da função de erros quadráticos para função objetivo. Mas há outras opções. A calibração automática dos parâmetros pode introduzir maior velocidade e diminuir a subjetividade na fase de calibração.

Para o ajuste dos parâmetros pode-se ainda combinar os dois processos, iniciar com o ajuste manual e proceder um refinamento do ajuste com a utilização do algorítmo de busca. É importante também que na seleção do período da série histórica escolhido para calibração, haja períodos mais úmidos e mais secos, o que torna a escolha dos parâmetros mais abrangente.

1.4.4. Validação do Modelo

Após a seleção do melhor conjunto de parâmetros, deve-se proceder à validação. Nesse caso, adota-se o conjunto obtido anteriormente e procede-se a simulação no sistema para outro conjunto de dados de entrada. Aferem-se então os erros, comparando valores observados e simulados pelo sistema são aceitáveis. Caso contrário, a recomendação é refinar o procedimento de calibração e ajuste dos parâmetros.

1.4.5. Simulação de Cenários

Após o ajuste final dos parâmetros e dependendo da concepção do sistema de modelagem, são inúmeras as possibilidades de cenários de estudo. Deve-se, contudo, evitar redundâncias, focando nos objetivos que motivaram todo o estudo.

Pode ser interessante, adotar na escolha dos cenários, “situações extremas”, que submeterão todo o sistema a estágios críticos – criando e delimitando o comportamento do sistema a uma espécie de condições “limite”.

Nessa etapa, é comum a adoção de eventos pluviométricos estimados para tempos de recorrência característicos. Em projetos de drenagem, esses serão os volumes para a definição e dimensionamento dos elementos de controle dos escoamentos superficiais em excesso e controle de alagamentos.

1.4.6. Interpretação dos Resultados

Nessa etapa, é importante, considerar as limitações intrínsecas dos estudos que envolvem a aplicação de sistemas de simulação computacional. Qualquer modelo hidrológico e, em parte, também os hidráulicos, mesmo aplicados nas melhores circunstâncias, fornecerão resultados com incertezas. Algumas dessas fontes de incertezas, adaptadas de O'DONNELL e CANEDO (1980), são:

- ✓ Registro de Dados Hidrometeorológicos da Bacia Hidrográfica;
- ✓ Erros na coleta de dados hidrometeorológicos;
- ✓ Redução de dados pontuais em médias espaciais, e vice-versa;
- ✓ Redução de dados contínuos em médias temporais;
- ✓ Erros no processo de estimação de dados de vazão;
- ✓ Estrutura e concepção do modelo;
- ✓ Conhecimento limitado dos processos físicos-ambientais;
- ✓ Aproximações para que representações desses processos sejam viavelmente tratadas;
- ✓ Tratamento de variáveis com variação espacial de forma agregada;
- ✓ Tratamento seqüencial de processos que de fato ocorrem de forma dinâmica e concomitante;
- ✓ Omissão de processos considerados menos relevantes;
- ✓ Calibração e ajuste do modelo: a subjetividade do processo tentativa-e-erro, ou no procedimento automático, a escolha da função objetivo e o critério de convergência na otimização, a ocorrência de mínimos locais, o tamanho das séries de dados de calibração.

O Quadro 4 apresenta a relação de alguns sistemas computacionais de simulação hidráulica-hidrológica voltados para áreas urbanas. Nele podem ser visualizadas as caracteristicas de separação do escoamento, os processos simulados e a forma de acesso aos modelos.

Quadro 4 - Alguns sistemas computacionais Hidráulico- Hidrológicos com enfoque em drenagem urbana

Sistema	Instituição	Separação do escoamento	Módulo de Separação do Escoamento		Escoamento - Processos Simulados				Acesso	Site
					Superficial	Subterrâneo	Degelo	Qual. Água		
InfoWorks	Innovyze	Horton, Green-Ampt, Soil Conservation Service (SCS) e mais três modelos que utilizam coeficientes baseados nas características da superfície do solo.	Pode ser feita através de cinco modelos: Double linear reservoir, Large contributing area, SPRINT, Desbordes runoff model e SWMM runoff model. O módulo de propagação do escoamento resolve as equações de Saint Venant em sua forma completa através do esquema implícito de Preissmann.	1D 2D	X	X		X	Aquisição do software	http://www.innovyze.com/products/infoworks_icm/
Plataforma HEC	U.S. Army Corps of Engineers	Horton, Green and Ampt, SCS concentrado ou semi-distribuído, Smith Parlange (baseado na condutividade hidráulica do solo), método do déficit constante, método do cálculo da umidade do solo.	Modelo do hidrograma unitário de Clark, concentrado ou semi-distribuído, modelo de onda cinemática, modelo do hidrograma unitário de Snynder, hidrograma triangular do SCS, concentrado ou semi-distribuído, hidrograma unitário fornecido pelo usuário. Possibilita a simulação unidimensional do escoamento em canais abertos, sob o regime permanente e não-permanente e também na condição de fundo móvel (transporte de sedimentos).	1D	X		X	X	Livre	http://www.hec.usace.army.mil/software/
SOBEK-Urban	Delft Hydraulics	Horton	Resolve as equações completas de Saint Venant através do esquema do Delft Hydraulics Laboratory permitindo a simulação de inundações no sistema, escoamento supercrítico sem simplificação das equações, simulação de redes multiplamente conectadas e ressaltos hidráulicos.	1D 2D	X			X	Aquisição do software	http://www.deltaressystems.com/hydro/product/108282/sobek-suite
Plataforma MIKE	Danish Hydraulic Institute – DHI	Solução da equação de Richards 3D e do modelo difusivo 2D utilizando diferenças finitas.	MIKE 11: Simulação hidrodinâmica unidimensional baseada na solução das equações de Saint Vennant. MIKE 21: Modelo de escoamento baseado na solução das equações de continuidade e conservação de massa na forma bidimensional, por método de diferenças finitas.	1D 2D	X	X	X	X	Aquisição do software	http://www.dhigroup.com/
SWMM	Environmental Protection Agency-EPA	Green and Ampt, SCS e Horton	São utilizadas equações hidrodinâmicas completas. A solução do sistema de equações de Saint Vennant é obtida por meio de um processo explícito de discretização numérica das equações diferenciais. A solução do sistema de equações não-linear é feita pelo método iterativo de Newton-Raphson.	1D	X	X	X	X	Livre	http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/swmm.html **O software traduzido para o português pode ser obtido através do site:** http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=1019

2 METODOLOGIA

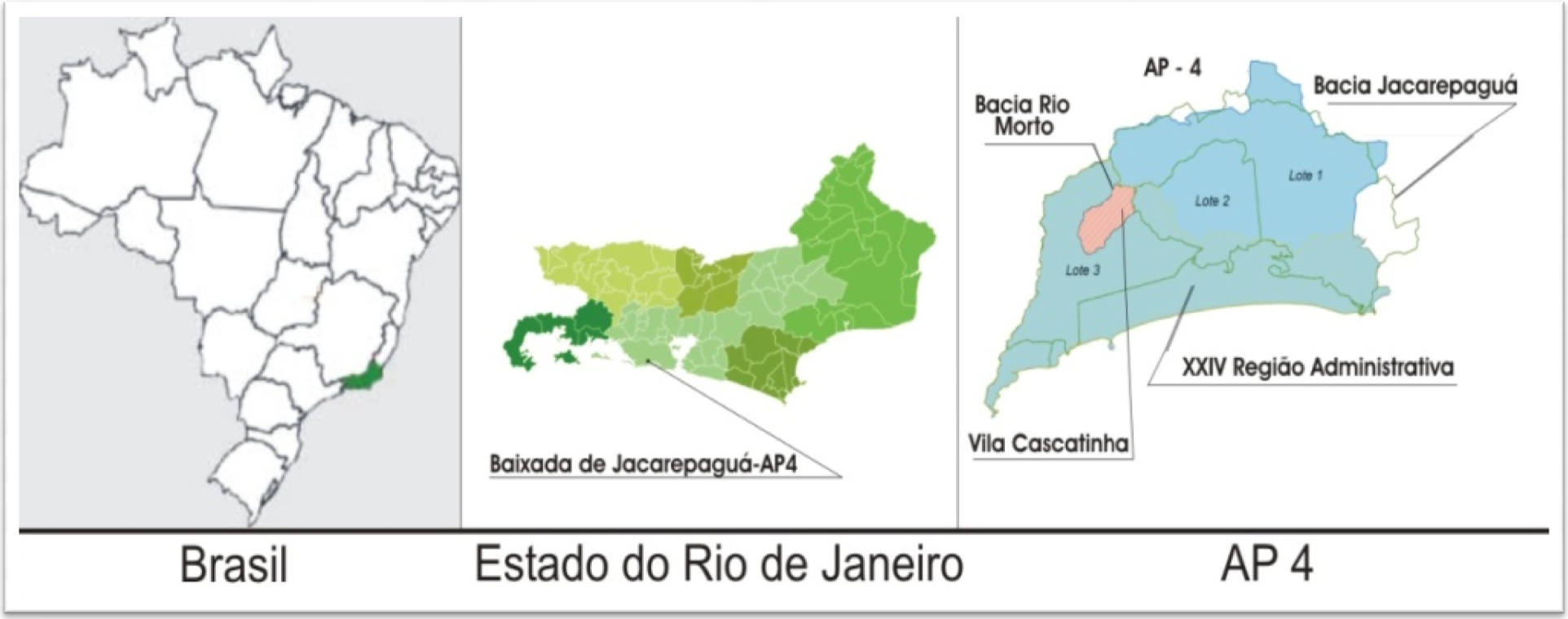
2.1. Caracterização da Área de Estudo

2.1.1. Localização da Bacia Hidrográfica

A Baixada de Jacarepaguá, área na qual a bacia hidrográfica do rio Morto está inserida, está situada no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, no município do Rio de Janeiro, estando limitada pelos paralelos 22° 53’ 29’’ S e 23° 04’ 25’’ S e meridianos 43° 15’ 24’’ W e 43° 33’ 28’’ W.

Segundo a divisão institucional da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a Baixada de Jacarepaguá, está localizada na Área de Planejamento 4 (AP 4) (Figura 9), sendo constituída pelas Regiões Administrativas de Jacarepaguá e Barra da Tijuca, XVI e XXIV respectivamente. As Regiões Administrativas (RA) citadas compreendem 19 bairros, são eles: Jacarepaguá, Anil, Gardênia Azul, Cidade de Deus, Curicica, Freguesia, Pechincha, Taquara, Tanque, Praça Seca, Vila Valqueire, Joá, Itanhangá, Barra da Tijuca para a XVI RA, e Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes e Grumari para a XXIV RA.

Figura 9 - Localização da Bacia do Rio Morto - Baixada de Jacarepaguá, Rio de Janeiro



Fonte: ROSA, 2003; Anuário Estatístico do Rio de Janeiro – Instituto Pereira Passos – PMRJ.

A Baixada de Jacarepaguá apresenta uma área de 301,40 km², dos quais aproximadamente 120 km² se encontram abaixo da cota 100, constituindo a chamada baixada (ROSA, 2002). Tem como elementos determinantes da sua área, o Maciço da Pedra Branca ao Norte, o Oceano Atlântico ao Sul, o Maciço da Tijuca a Leste e a Baixada de Guaratiba a Oeste.

O cenário urbano desta área é diversificado, contendo localidades com as maiores taxas de crescimento na cidade, como a Barra da Tijuca e Taquara, e locais de características peri-urbanas, tais como Vargem Grande e Vargem Pequena. Entretanto, o processo de urbanização vem se intensificando sobre estes locais; sobretudo após o início das obras no local para implantação dos equipamentos e vila para realização das Olimpíadas.

A Bacia do rio Morto é constituída como representativa e experimental da bacia hidrográfica de Jacarepaguá, sobretudo da sub-região denominada pela Prefeitura para efeito de planejamento para implantação de rede de drenagem, como Lote 3 (aproximadamente os bairros de Camorim, Vargem Pequena e Vargem Grande). É também o principal objeto de estudo do Projeto HIDROCIDADES, que visa a conservação das águas em meio urbano e peri-urbanos por meio de atividades de pesquisa e ações de extensão universitária para o desenvolvimento urbano integrado à gestão sustentável dos recursos hídricos (PIMENTEL DA SILVA *et. al*., 2008).

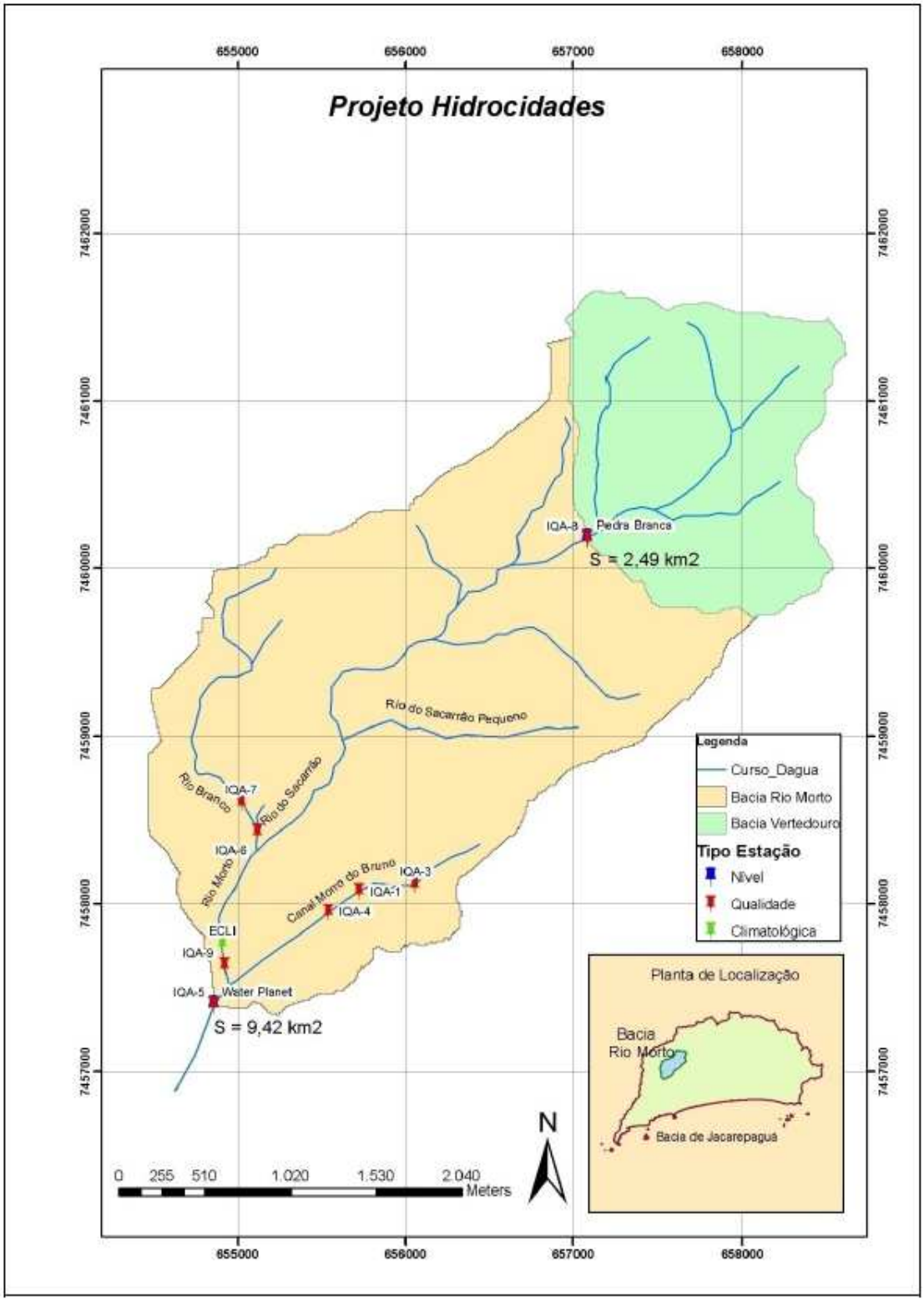
A bacia do rio Morto até a seção de controle denominada "*Water Planet*" por conta de sua localização logo a jusante do Parque de Águas local, abrange uma área de drenagem de 9,41 km² e encontra-se integralmente no bairro de Vargem Grande, bairro do extremo oeste da baixada de Jacarepaguá.

Os cursos d'água principais são os rios Sacarrão, Branco e o Morto (Figura 10). O rio Sacarrão tem suas nascentes no Parque Estadual da Pedra Branca, a uma altitude de aproximadamente 620m. Recebe a contribuição do rio do Café, além de alguns outros afluentes menores, recebe as águas do rio Branco e, após a confluência com o canal do morro do Bruno, tem origem o trecho denominado rio Morto. O Rio Morto deságua juntamente com o Rio Vargem Grande no canal de Sernambetiba, que deságua diretamente no oceano Atlântico (BATISTA, 2009).

A região constitui área de expansão da cidade do Rio de Janeiro com características peri-urbanas. Parte da bacia do Rio Morto está inserida em Área de Preservação Permanente (APP) do Parque Estadual da Pedra Branca, e parte, nos trechos médios e baixos do rio Sacarrão, com traços da ocupação típica do local, condomínios residenciais, pequenos comércios associados à jardinagem, materiais de construção, restaurantes e bares, e ocupações

com assentamentos informais. A ocupação está em desenvolvimento e ainda há terrenos com indefinição fundiária. Não há rede de drenagem construída e a rede de esgoto está implantada mas ainda há muitas edificações sem ligação com a rede. Observa-se a prática de lançamento de efluentes e resíduos, sobretudo entulho, águas servidas e esgotos, na rede de drenagem natural, além da ocupação nas regiões marginais e degradação da mata ciliar. O abastecimento de água se dá preferencialmente pela captação da CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro) no rio Sacarrão dentro dos limites da própria bacia, mas observa-se intensa pressão pelo uso de água subterrânea (KAUFFMAN *et al.*, 2004) (PIMENTEL DA SILVA, *et al*., 2010).

Figura 10 - Bacia Hidrográfica representativa e experimental do rio Morto



Fonte: PIMENTEL DA SILVA *et al*., 2010.

2.1.2. Características Morfométricas da Bacia do Rio Morto

PIMENTEL DA SILVA *et al.* (2010), através da aplicação de pequenos procedimentos computacionais associados à extensão ArcHydro do sistema ArcGis®, determinou alguns parâmetros morfométricos da bacia do Rio Morto. Foram determinados a área, o perímetro, o coeficiente de compacidade, fator de forma, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial e declividade da bacia. Os resultados podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Características Morfométricas da Bacia do Rio Morto até a Ponte da Estrada dos Bandeirantes

Características Físicas	Resultados
Área da bacia (A)	9.41 km²
Perímetro (P)	18,42 km
Coeficiente de compacidade (K_c)	1,68
Fator de forma (K_f)	0,226
Densidade de drenagem (D_d)	1,934 km/km²
Extensão média do escoamento superficial (l)	0,129 km
Declividade da Bacia	0,0083 m/m

Fonte: PIMENTEL DA SILVA, *et al.*, 2010.

A densidade de drenagem da bacia do rio Morto revela que a bacia é bem drenada[3]. O índice "extensão média do escoamento superficial" caracteriza a distância média em que os escoamentos pluviais teriam que percorrer sobre a superfície da bacia. Está também associado à densidade de drenagem. O baixo valor encontrado indica também a tendência para maiores velocidades de escoamento.

A declividade da bacia pode ser considerada alta quando comparada a outras bacias hidrográficas com características semelhantes. Contudo, PIMENTEL DA SILVA *et al.* (2010) ressalta que o trecho mais baixo da bacia, já na região costeira, apresenta declividades baixíssimas e que o trecho do rio Morto a jusante da área de drenagem é sujeito ao efeito de marés. Assim, as baixas declividades observadas no trecho costeiro da bacia do rio Morto conjugadas com os valores dos parâmetros físicos possibilitou concluir que a bacia é

[3] Valores próximos a 0,5 km/km² caracterizam drenagem pobre, enquanto valores maiores ou iguais a 3,5, bacias excepcionalmente bem drenadas (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2010).

suscetível à ocorrência de enchentes, sobretudo durante eventos concomitantes de maré alta e chuvas intensas, intermitentes e persistentes.

De fato, as enchentes na região da baixada de Jacarepaguá são comuns durante as chuvas intensas, sobretudo quando ocorrem de forma intermitente e persistente, e associadas às marés altas. Neste contexto, destacam-se as graves enchentes de 1996 e 2010, que causaram, sobretudo em 1996, perdas de vida humana, ambas deixaram desabrigados, isolaram temporariamente a região do resto da Cidade e contribuíram pontualmente para o aumento dos índices de leptospirose (CERQUEIRA, 2006). Observa-se que os alagamentos permanecem por alguns dias agravados pelo efeito das marés.

2.1.3. Dados Climatológicos e Hidrológicos

O monitoramento climatológico na bacia hidrográfica do rio Morto iniciou-se em 2008 de forma concomitante com o monitoramento fluviométrico, estando ainda em operação. É realizado em uma estação climatológica completa de fabricação da SOLAR, modelo SL 2000, onde são observadas as alturas pluviométricas, temperaturas médias, radiação solar, velocidade e direção dos ventos, umidade relativa e pressão atmosférica. Essas variáveis permitem o cálculo da evapotranspiração.

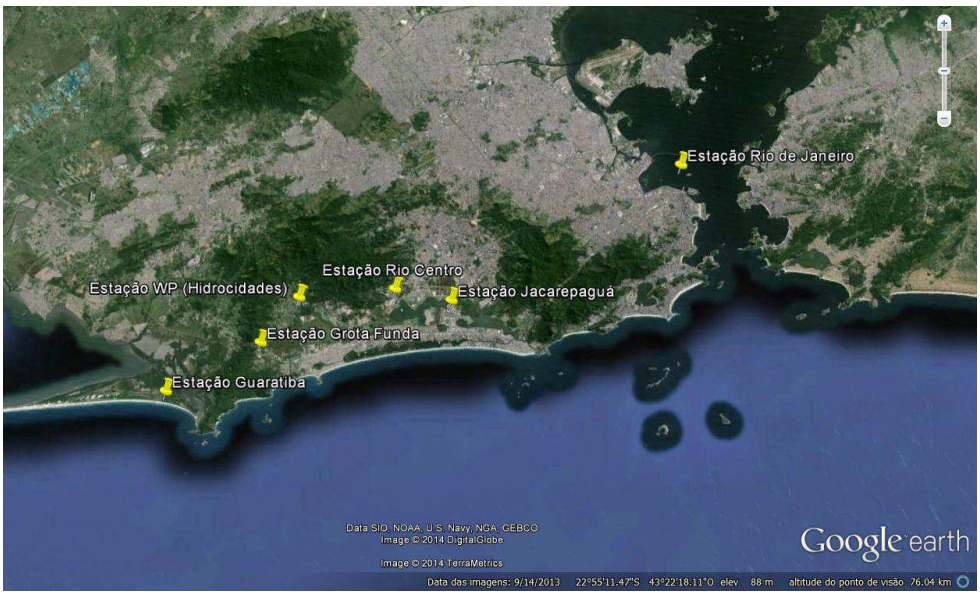
Os registros são feitos a cada cinco minutos em acordo com o monitoramento dos níveis d'água nas estações fluviométricas. A definição do intervalo de tempo do monitoramento foi definida pelos estudos e cálculos para o tempo de concentração da bacia (BATISTA, 2007).

A estação climatológica foi instalada segundo orientações da Organização Mundial de Meteorologia, respeitando a distância de barreiras, em área gramada. Por conveniência, a estação foi localizada no Parque de Águas *Water Planet* (Figura 11) dentro dos limites da bacia representativa (Figuras 9 e 10). Ressalta-se, no entanto, que o contexto geral e paisagem em que se insere o monitoramento, referem-se a paisagem alterada pela ocupação urbana, não se podendo garantir que as características dessa ocupação não interfiram pelo menos nas temperaturas, velocidades e direção dos ventos. Além disso, o relevo e vegetação expressivos do Parque Estadual da Pedra Branca influenciam a incidência de radiação solar, temperaturas e a variação espacial das chuvas. Foram observadas, de fato, ocorrências pluviométricas nas vertentes mais elevadas da bacia, nem sempre observadas na região mais baixa, próxima ao litoral, confirmadas pela elevação dos níveis d'água fluviais.

A análise de consistência dos dados climatológicos tem sido feita tomando por base os dados das normais climatológicas do período 1961-1990 das estações de Jacarepaguá e Rio de Janeiro do INMET, além dos dados da estação de Guaratiba, agora operada pelo Sistema Alerta Rio da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Em particular, para análise dos dados pluviométricos, são considerados os dados observados das estações Riocentro e Grota Funda do Sistema Alerta Rio, que são as localizadas mais próximas da estação do Projeto HIDROCIDADES (MOREIRA, 2009; AMARAL, 2013). Na Figura 12 é apresentada a localização da estação climatológica do Projeto HIDROCIDADES e das estações de apoio dos estudos de análise de consistência.

Figura 11 - Estação Climatológica SL 2000 localizada dentro dos limites do Parque Aquático

Figura 12 - Localização da Estação Climatológica do Projeto HIDROCIDADES e das Estações de Apoio do Estudo de Análise de Consistência



Fonte: Google Earth; 23/11/2013.

Para análise de sensibilidade, ajuste e calibração, e validação do modelo SWMM foram adotados respectivamente, os períodos: fevereiro de 2012; junho e novembro de 2011 e março de 2012; abril de 2010, sobretudo por terem apresentado boa correlação com dados observados nas estações de apoio do estudo de consistência.

A partir das variáveis climatológicas desses períodos, foram calculadas pelo método Combinado de Penman (conforme SHUTTLEWORTH, 1992) as taxas evapotranspirimétricas diárias. Preliminarmente foram calculadas as médias diárias das temperaturas, umidade relativa, radiação solar e velocidades do vento. De posse destes dados, foi procedido o cálculo com o auxílio de uma planilha MS Excel. Os gráficos com as taxas evapotranspirimétricas calculadas são apresentados no Apêndice A.

Na bacia são operados dois postos fluviométricos (Figura 10) onde são observados os níveis d'água, vazões fluviais e qualidade da água: um que controla área preservada e sem sinais de ocupação nas vertentes mais altas da bacia, e outro, no exutório da bacia, após a ocupação, no baixo relevo, à jusante dos limites do parque aquático "Rio *Water Planet*", próximo à estação climatológica. Aproximadamente, na mesma localização da seção que define o exutório da bacia, a extinta SERLA, operou uma estação para monitoramento dos níveis d'água e medição de descarga na segunda metade da década de 80 (PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2012).

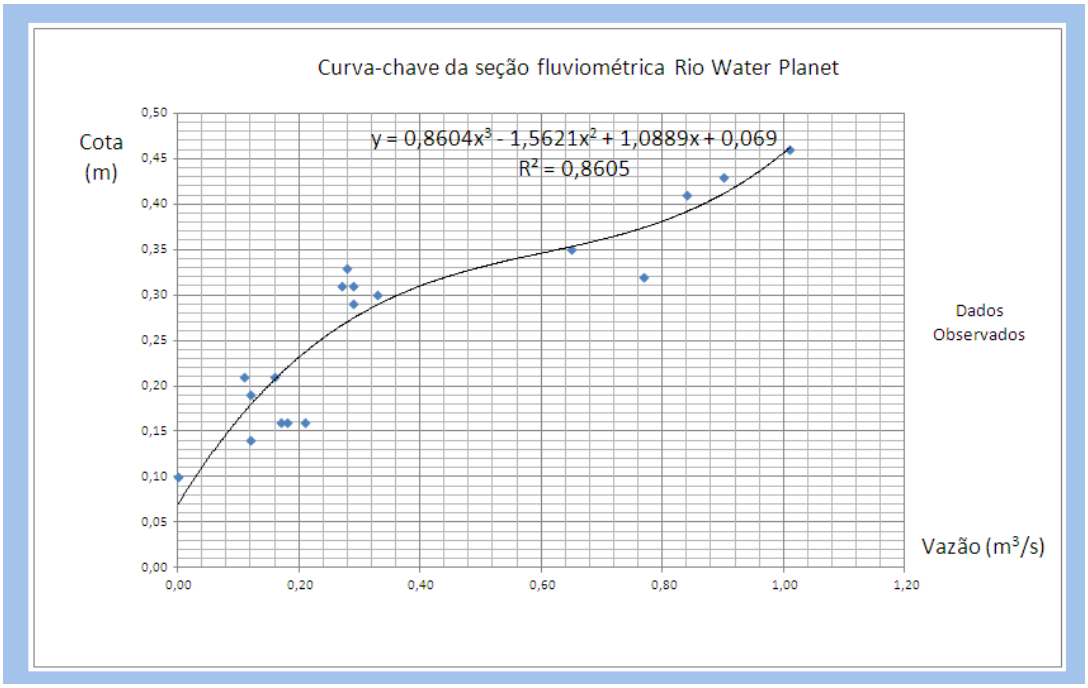
Em ambas as seções fluviométricas foram instaladas réguas fluviométricas, e linígrafos com sonda de pressão e registro automático dos níveis d'água. Na estação fluviométrica de montante, as vazões são medidas pelo método do regime crítico associado a um vertedor de seção retangular instalado no contexto do Projeto HIDROCIDADES.

Na seção de jusante as medições de descarga são realizadas pelo método área-velocidade e tem sido usado um medidor acústico de corrente de fabricação da Sontek (*Accoustic Doppler Velocimeter – ADV – Flow Tracker*). Este equipamento calcula automaticamente a vazão a partir de inferências da velocidade de escoamento e através do fornecimento das distâncias entre as seções/trechos e das profundidades, realizadas pelo operador por meio de medição a vau.

A série de vazões foi gerada pelo método da curva-chave. A versão atual da curva-chave compreende medições realizadas entre 20/03/2009 e 14/05/2012 e pode ser visualizada através da figura 13. Ressalta-se, no entanto, que até o momento, não foi possível a obtenção de vazões de cheia significativas. Para geração da série de vazões foi adotado o método logarítimico para extrapolação da curva-chave. Estuda-se no momento a instalação de uma segunda estação fluviométrica para detecção da declividade da linha d'água e de sistema

automático para medição do campo de velocidades para cálculo das vazões de cheia. (SILVA *et al.*, 2013).

Figura 13 - Curva-chave da estação fluviométrica WP/HIDROCIDADES



2.1.4. Cálculo do Tempo de Concentração

O tempo de concentração (Tc) é definido como o tempo necessário para o escoamento superficial, partindo-se do ponto mais remoto. Assim, Tc pode ser entendido como sendo o intervalo de tempo, considerado a partir do início da chuva, para que toda a bacia passe a contribuir no exutório (ROSA, 2002). O valor do Tc depende principalmente, da rugosidade e da declividade da superfície da bacia.

Na literatura, muitas fórmulas empíricas são apresentadas para estimativa do Tc. Para esta dissertação foram selecionadas algumas formulações para cálculo do tempo de concentração, onde os valores estão expressos em horas.

São elas:

- Ribeiro

$$Tc = \frac{16L}{60(1{,}05 - 2p)(100S)^{0{,}04}}$$

Onde:

L - o máximo comprimento em km;

P - percentagem da bacia com cobertura vegetal;

S - declividade em m/m.

- Kirpich

$$Tc = 0{,}39\left(\frac{L^2}{S}\right)^{0{,}385}$$

Onde:

L - máximo comprimento em km;

S - declividade %;

- Ventura

$$Tc = 0{,}0127\left(\frac{A}{S}\right)^{1/2}$$

Onde:

A - Área da bacia em km²

S - declividade em m/m

Para as formulações de Ribeiro, Kirpich e Ventura foi encontrado como resultado os valores 25,16 min., 10,93 min. e 9,25 min., respectivamente.

Muitas fórmulas empíricas são apresentadas para a estimativa do Tc, apresentando valores muitas vezes que não raramente diferem entre si (RAMOS, 404 p, 1989).

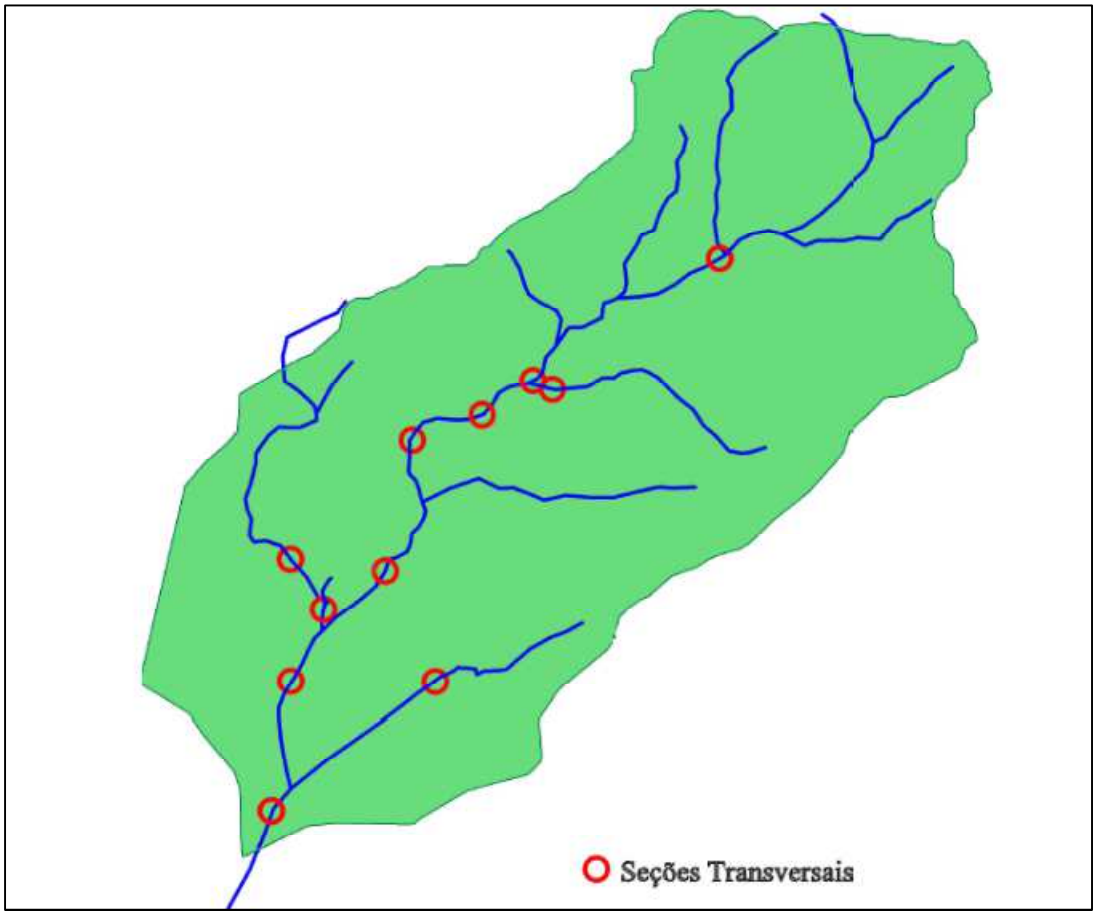
2.1.5. Seções Topobatimétricas

As seções transversais foram levantadas pela empresa Posição Engenharia em duas campanhas, uma finalizada em setembro de 2010 e outra em abril de 2013 (Posição Engenharia, 2010 e Posição Engenharia, 2013). Na primeira campanha foram levantadas as seções transversais a jusante e a montante da régua linimétrica sobre o rio Sacarrão e a jusante e a montante da ponte sobre o rio Sacarrão na Estrada dos Bandeirantes. Na segunda campanha o levantamento foi realizado através de topografia convencional para a geração de onze seções transversais de trechos do Rio Sacarrão e seus afluentes. Na Figura 14 estão indicadas a localização das seções transversais no contexto da bacia hidrográfica do rio Morto.

Na primeira campanha, para a determinação das coordenadas dos pontos de apoio, foi utilizado o posicionamento por satélites GPS através de posicionamento estático. Foi implantada na região de trabalho, a cerca de quinhentos metros da estação limnimétrica, uma estação de georreferenciamento para os pontos de apoio, com um período de ocupação ininterrupto aproximado de quatro horas (Posição Engenharia, 2010).

Na segunda campanha, as estações tiveram suas coordenadas determinadas com a utilização de receptores GPS geodésicos de uma e duas frequências, seguindo metodologia de posicionamento estático, com observação contínua e ininterrupta por um período de quarenta minutos, com intervalo de gravação de dados de cinco segundos (Posição Engenharia, 2013).

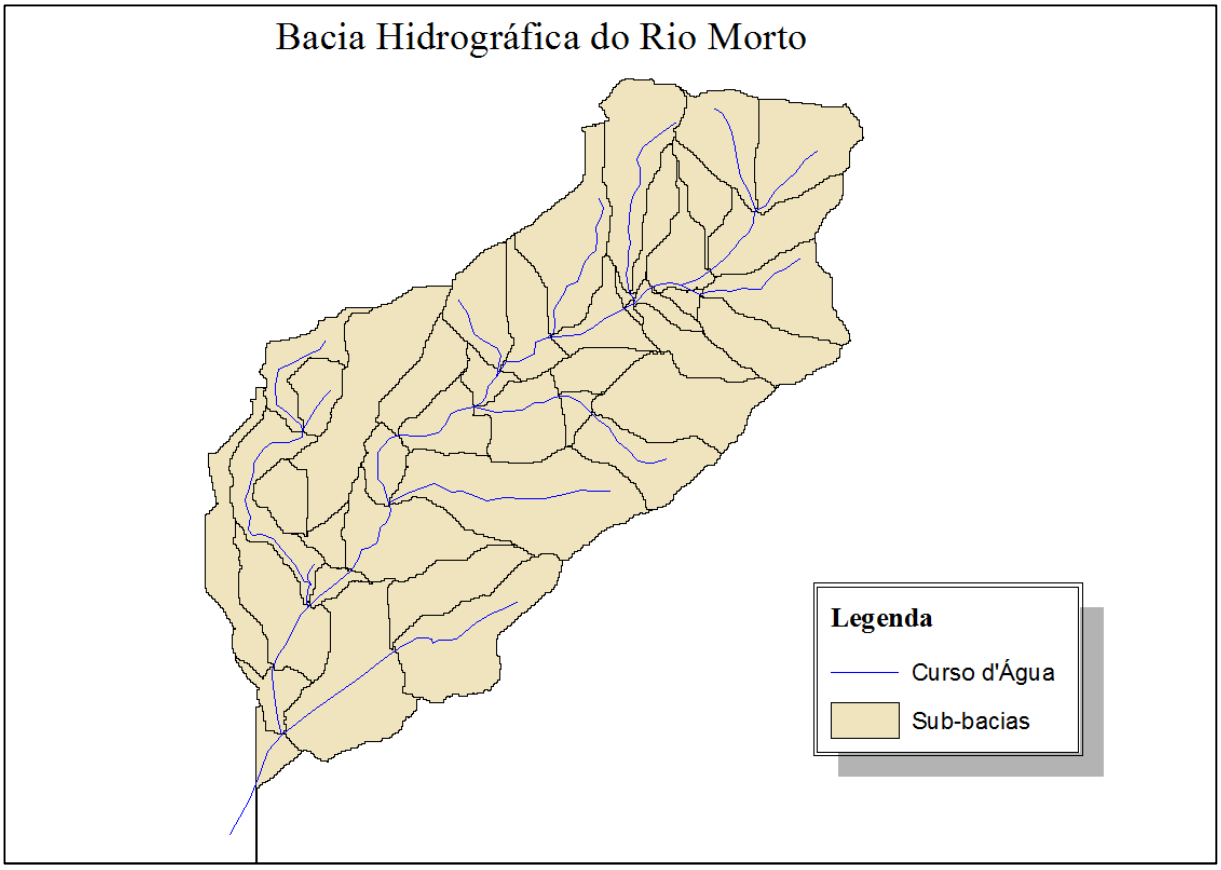
Figura 14 - Localização das seções transversais



2.1.6. Base de Dados Cartográficos e Informações Espaciais

A base cartográfica utilizada para o processamento do modelo SWMM foi obtida a partir de Rosa (2002) e Pimentel da Silva *et al.* (2010), tendo como referência a base do Instituto Pereira Passos (IPP) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro de 1999 na escala 1:10.000, assim como ortofotos originadas no mesmo levantamento e cedidas pelo IPP. Os dados apropriados a partir dessa base de dados incluíram: o divisor de águas/contorno da bacia hidrográfica, isolinhas, percurso dos cursos d'água e divisão das sub-bacias/elementos de drenagem. Nesse caso, a bacia hidrográfica do rio Morto foi dividida em 43 sub-bacias, de acordo com a topografia da região (ROSA, 2002). A Figura 15 apresenta a bacia hidrográfica do rio Morto e os elementos de drenagem (sub-bacias) conforme definido em Rosa (2002).

Figura 15 - Bacia Hidrográfica do Rio Morto



Fonte: ROSA, 2002.

2.2. O Modelo SWMM

2.2.1. Descrição da Concepção e dos Módulos do Modelo

O *Storm Water Management Model* – SWMM foi desenvolvido em 1971 pela U.S. EPA (Enviromental Protection Agency). Há várias edições do SWMM e nessa dissertação foi aplicado o SWMM 5.0 (ROSSMAN, 2008)

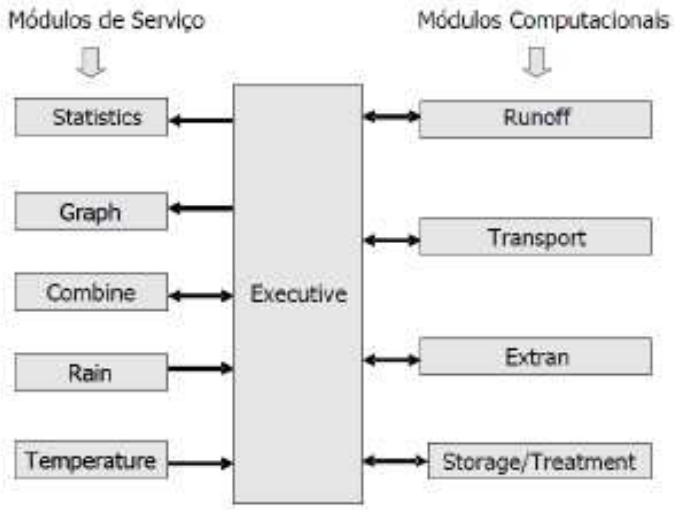
O SWMM é um modelo dinâmico chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, embora seja robusto o suficiente para simulação das áreas com paisagem peri urbana e rurais (BASTOS, 2007). Pode ser utilizado para a simulação de um único evento chuvoso, bem como para uma simulação contínua de longo prazo. O componente relativo ao escoamento superficial do SWMM opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos e cargas poluidoras. O módulo de transporte hidráulico do SWMM simula o percurso destas águas através de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de

armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação. O SWMM acompanha a evolução da quantidade e da qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como a vazão, a altura de escoamento e a qualidade da água em cada tubulação e canal, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo (ROSSMAN, 2008).

É amplamente utilizado em várias partes do mundo, para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuárias, com muitas aplicações, também, em áreas não urbanas (GARCIA, 2005; BASTOS, 2007).

HUBER E DICKINSON (1992) apresentam a estrutura do modelo SWMM em nove módulos (Figura 16), sendo quatro módulos computacionais (*Runoff, Transport, Extran* e *Storage/Treatment)* e cinco módulos de serviço (*Statistics, Graph, Combine, Rain, Temperature),* além do módulo *Executive.*

Figura 16 - Relação entre os módulos estruturais do SWMM



Fonte: Adaptado de HUBER & DICKINSON, 1992.

Os módulos computacionais são os responsáveis pelas principais etapas de cálculo.

O módulo *Runoff* refere-se à transformação da precipitação em escoamento. Este, processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis, detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou contínuos.

A bacia é representada na forma de um conjunto de elementos/sub-bacias e canais de propagação interconectados. A área de cada elemento é dividida em três subáreas: impermeável com armazenamento, permeável com e sem armazenamento.

O modelo permite ao usuário selecionar o método de cálculo da infiltração a ser utilizado: Curva Número do SCS, equação de infiltração de Horton ou equação de Green-Ampt. Somente um método de cálculo pode ser selecionado para simulação. Os cálculos de infiltração aplicam-se apenas à porção permeável das sub-bacias. Pressupõe-se que a porção impermeável da sub-bacia converte-se totalmente em escoamento superficial, menos qualquer retenção inicial devida à altura de armazenamento em depressão especificada para a área impermeável. Portanto, todos os parâmetros de infiltração, assim como o valor de CN, devem ser especificados para a parte permeável da sub-bacia. As áreas impermeáveis devem ser especificadas usando o parâmetro Percentual Impermeável. Segundo AUTODESK (2013), definindo um valor de CN que inclui a área impermeável, e também definindo o percentual impermeável da sub-bacia, o modelo irá considerar duplamente o efeito da área impermeável.

O escoamento superficial é representado através de um reservatório abstrato não-linear para cada subárea, combinando as equações de Manning e da continuidade, resolvidas pelo processo interativo de Newton-Raphson, para valores de *d* desconhecidos, conforme a Equação 1.

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{An}(d - d_p)^{5/3} S^{1/2}$$

Equação 1

Onde:

W– largura representativa da sub-bacia;

n – coeficiente de rugosidade de Manning;

A – área da sub-bacia;

S – declividade da sub-bacia;

d_p – altura do armazenamento em depressões ao longo da bacia;

i^* – precipitação efetiva;

d – nível de água no reservatório

t – tempo.

O módulo de propagação do escoamento em redes de condutos *Extran (Extended Transport*) foi desenvolvido na cidade de São Francisco (USA), em 1973, e chamado originalmente de "*San Francisco model*", sendo adicionado ao SWMM a pedido da EPA em 1974. Como o próprio nome sugere, o módulo foi introduzido no intuito de promover uma

forma de propagação alternativa à proposta pelo módulo *Transport* (baseado no modelo da onda cinemática), que adicionalmente considerasse os fenômenos mais complexos no escoamento, principalmente o escoamento sob pressão.

O modelo hidrodinâmico *Extran* propaga o escoamento em redes de condutos e canais de macrodrenagem, utilizando as equações completas de Saint Venant, tendo a vazão e a cota piezométrica como variáveis. A solução se dá através de um esquema explícito, segundo o método de Euler modificado. Intervalos de tempo de 5 a 60 segundos são utilizados nas simulações, fazendo com que o tempo de simulação seja uma variável importante no uso do modelo (ROESNER *et al*., 1988).

Conforme AUTODESK (2013), o método hidrodinâmico requer passos de tempo muito menores que outros modelos hidráulicos de transporte (onda cinemática ou regime uniforme) e os valores típicos para simulação hidrodinâmica variam de 1 a 60 segundos . Ainda assim, passos de tempo inferiores a 1 segundo podem ser manualmente especificados no modelo.

A representação da rede é baseada no conceito de vínculos e nós. Os vínculos (links) transmitem fluxo entre os nós, sendo a vazão a variável dependente. Os nós têm características de armazenamento.

A equação da continuidade é aplicada aos nós e a equação da quantidade de movimento ao longo das “ligações” (*links*). A equação dinâmica utilizada pelo modelo é descrita na Equação 2.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1+(gn^2\Delta t)\frac{|V|}{\bar{R}^{-4/3}}}\left\{Q_t + 2\bar{V}\left(\frac{\Delta A_c}{\Delta t}\right)_t + \bar{V}^2\left[\frac{(Ac_2.Ac_1}{L}\right]\Delta t - g\overline{Ac}\left[\frac{H_2.H_1}{L}\right]\Delta t\right\} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

g – aceleração da gravidade;

n – coeficiente de rugosidade de Manning;

R – raio hidráulico;

Ac – superfície da seção transversal do conduto;

L – comprimento do conduto;

H – cota piezométrica;

V – velocidade do escoamento no conduto.

Os valores de R, V e A são as médias ponderadas no extremo de jusante do conduto, no tempo “t” e, $(\Delta A/\Delta t)_t$ é a derivada no tempo para o passo de tempo anterior.

As incógnitas da equação são Qt+Δt, H_2 e H_1. Os sub-índices 1 e 2 referem-se aos extremos de montante e jusante do conduto, respectivamente. As variáveis V, R e A podem ser relacionadas com as variáveis Q e H. A relação entre estas variáveis é obtida da equação da continuidade aplicada aos nós, conforme a Equação 3, a seguir (BASTOS, 2007).

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum \left(\frac{Q_t . \Delta t}{A_{nt}} \right) \qquad \text{Equação 3}$$

Onde An é a área superficial associada a cada nó.

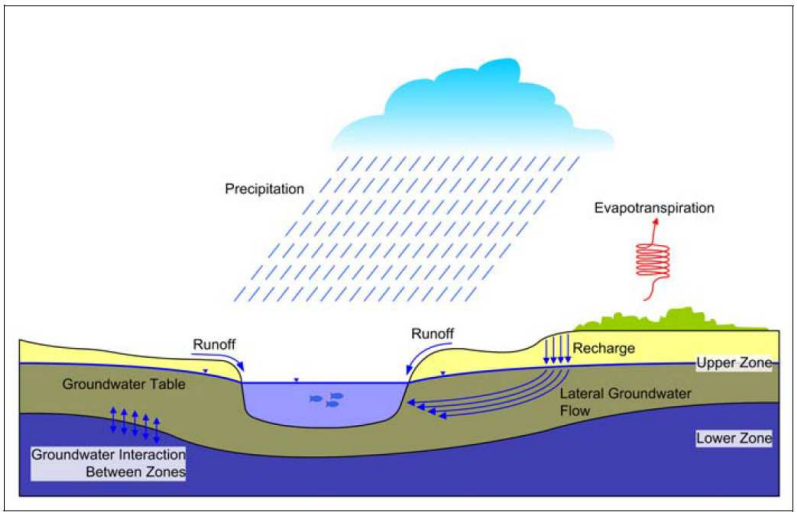
As equações 4 e 5 são resolvidas iterativamente, determinando a descarga em cada link e a cota piezométrica em cada nó, no final do passo de tempo.

Os módulos de serviço auxiliam os módulos computacionais possuindo diversas funções, como organização da ordem das simulações (*Combine*), dos dados de precipitação (*Rain*) e de temperatura (*Temperature*), apresentação de saída gráfica (*Graph*) e análises estatísticas (*Statistics*) dos resultados.

A consideração da água subterrânea é realizada através de elementos de aquíferos representativos de uma ou mais sub-bacias/elementos. Os fluxos efluentes são ligados aos canais da malha de drenagem discretizada e a recarga é oriunda da infiltração promovida nas áreas permeáveis. Conforme ROSSMAN (2008), cada aquífero contém uma zona insaturada e outra saturada que são representadas através de parâmetros como: porosidade do solo, condutividade hidráulica, taxa de evapotranspiração, elevação da base e taxa de perda para o aquífero profundo. Os parâmetros iniciais como o nível estático e o teor de umidade da zona insaturada também precisam ser fornecidos.

O modelo utiliza as duas zonas do aquífero para representar a interação da infiltração, evapotranspiração, percolação e o fluxo lateral das águas subterrâneas. Uma ilustração é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Modelo de águas subterrâneas



Fonte: Autodesk, 2013.

O fluxo nos aquíferos é computado de acordo com a Equação 4 (ROSSMAN, 2008) e o esquema geral é apresentado na Figura 18.

$$Q_{gw} = A1.\left(H_{gw} - H\right)^{B_1} - A2(H_{sw} - H)^{B_2} + A3.H_{gw}.H_{sw} \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

Q_{gw} – Fluxo subterrâneo ($m^3/s/ha$);

A1 – Coeficiente de fluxo subterrâneo;

B1– Expoente de fluxo subterrâneo;

A2– Coeficiente de fluxo superficial;

B2 – Expoente de fluxo superficial;

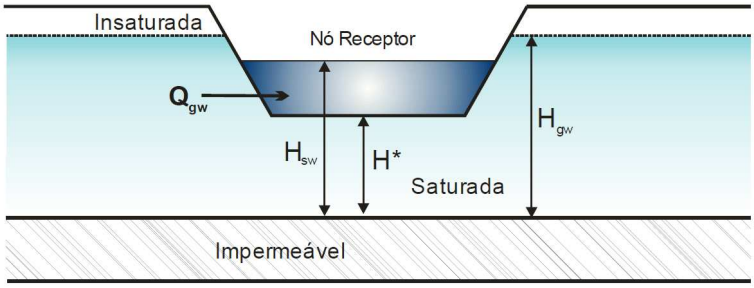
A3– Coeficiente de interação aquífero-superfície;

H_{gw} – cota da zona saturada (m);

H – Cota limite do aquífero (m);

H_{sw} – Cota da superfície da água no nó receptor (m).

Figura 18 - Esquema de representação do aquífero



Fonte: BELING, 2013.

No SWMM a evaporação pode ocorrer nas águas empoçadas nas superfícies das sub-bacias, na água subterrânea contida nos aquíferos e na água acumulada nas unidades de armazenamento.

2.2.2. Geração dos Elementos Gráficos e Informações Espaciais

Para geração dos elementos gráficos foi utilizado o software AutoCAD Civil 3D® da AUTODESK®. Optou-se pela utilização deste software por representar uma ferramenta inovadora a ser usada como auxiliar na definição dos parâmetros necessários à modelagem hidrológica-hidráulica. Além disso, um aspecto muito importante é a integração deste com a extensão SSA® (AUTODESK® *Storm and Sanitary Analysis*).

O SSA® é um software integrado ao pacote do AutoCAD Civil 3D® utilizado principalmente em análises e projetos de sistemas de drenagem urbana e esgoto. Tem a capacidade de realizar simulações através dos seguintes modelos hidrológicos (dependendo da escolha do usuário):

- EPA SWMM 5.0 (também pode trocar informações com o XPSWMM);
- NRCS (SCS) TR-55;
- NRCS (SCS) TR-20;
- HEC-1;
- Método Racional;
- Método Racional Modificado;
- UK Método Racional modificado (*Wallingford Procedure*);

- Método Racional conforme Dekalb;
- Hidrograma unitário Santa Bárbara;
- Hidrograma unitário Delmarva;
- Simulação contínua de longo termo;
- Metodologia de Papadakis-Kazan.

O software possui interface amigável, podendo criar automaticamente gráficos, perfis e relatórios em diferentes formatos de arquivo. Uma característica importante do SSA® é que os componentes do projeto podem ser importados diretamente de arquivos formato *shapefile* provenientes do ArcGIS (Sistema de Informacões Geográficas) ou de arquivos em formato CAD, o que não pode ser feito através do software SWMM 5.0 original da EPA.

Conforme PROBERT E WEDDING (2008) apud GONÇALVES, *et al*. (2013), uma superfície no AutoCAD Civil 3D® é construída com base em princípios matemáticos de geometria plana. Cada face de uma superfície baseia-se em três pontos que definem um plano. Cada um destes planos triangulares compartilha um lado com outro triângulo, e uma superfície contínua é assim construída. Essa metodologia é normalmente referida como uma rede irregular triangular – TIN, em inglês. Isso é feito com base na triangulação de Delaunay, significando que para qualquer ponto (x,y), pode haver apenas um único valor de elevação (z) dentro da superfície.

Também foram importados na base AutoCAD as 11 seções transversais levantadas nos rios Sacarrão, Morto e seus afluentes. Contudo, há pouca informação sobre as seções mais a montante da bacia. Para isso utilizou-se a ferramenta "*Create Surface Profile*" do software Civil 3D.

Após a obtenção do modelo digital do terreno (MDT), definição dos elementos (sub-bacias) e de nós, efetuou-se o traçado de vários alinhamentos sobre o rio Sacarrão e alguns dos seus afluentes. A partir desses alinhamentos foi possível obter seções transversais para os trechos de cursos d'água onde não existiam informações.

As informações necessárias para caraterização das sub-bacias no SWMM são: largura representativa das sub-bacias, coeficiente de rugosidade de Manning, declividade das sub-bacias, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração. Através da superfície gerada, foram levantadas as propriedades físicas como área, perímetro e declividade média.

Com o auxílio de Ortofotos atualizadas obtidas do Instituto Municipal Pereira Passos (IPP,2008), estimou-se de forma aproximada os percentuais de áreas permeáveis e impermeáveis em cada sub-bacia. As áreas permeáveis foram divididas em 4 tipos de cobertura vegetal: solo nu ou desmatado, cobertura média de vegetação, campos abertos e vegetação densa. As áreas impermeáveis foram divididas em loteamento ou pavimentação.

Na definição da largura equivalente das sub-bacias (W) foi adotado o valor da largura do retângulo equivalente (Le), conforme apresentado em BASTOS (2007) representado pela Equação 5.

$$Le = \frac{k_c\sqrt{A}}{1{,}12}\left[1 - \left(\frac{1{,}128}{K_C}\right)^2\right] \qquad \text{Equação 5}$$

$$K_{C=}0{,}282\frac{P}{\sqrt{A}} \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

Le = largura do retângulo equivalente;
A = área da bacia hidrográfica ou sub-bacia;
K_c = coeficiente de compacidade;
P = Perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia.

O resultado do levantamento das propriedades iniciais das sub-bacias é apresentado através dos quadros do Apêndice B. Cabe ressaltar que alguns parâmetros foram posteriormente alterados durante a etapa de calibração.

2.3. Processamento do Modelo

Para que fosse possível perceber de forma mais clara a influência de cada parâmetro do modelo no resultado da simulação, foi feita a análise de sensibilidade dos parâmetros considerados mais importantes. A definição destes parâmetros foi feita com base em referências bibliográficas (BASTOS, 2007; FARIA, 2013; GARCIA, 2005), nos conhecimentos adquiridos através do curso “Gestão de sistemas de drenagem urbana através do programa SWMM” ministrado por professores da Universidade Federal da Paraíba e na experiência adquirida após participação no programa “Hydrolatinamerica”, que através de

um desafio proposto aos participantes, proporcionou aprendizado do modelo e integração com especialistas da Universidade Politécnica da Cataluña (Espanha).

Os parâmetros avaliados foram: largura das sub-bacias (W), percentual impermeável (Ai), coeficiente de Manning para áreas permeáveis e impermeáveis (np e ni), armazenamento em depressão de áreas permeáveis e impermeáveis (dp e di) e o coeficiente CN (Curva número). O efeito foi verificado através da comparação gráfica.

Cada parâmetro foi avaliado individualmente, ou seja, quando se realizou a variação de um parâmetro os demais permaneceram fixos. A variação de cada parâmetro ocorreu para -90% e +90%, em relação aos valores iniciais apresentados nos quadros com as propriedades das sub-bacias.

A metodologia de calibração baseou-se no ajuste dos parâmetros através do processo manual, por tentativa e erro, sem a utilização de algoritmos de otimização, o que favorece ao usuário um melhor entendimento do comportamento dos processos que envolvem a calibração, porém com a desvantagem de que devido ao grande número de parâmetros a serem calibrados, a otimização alcançada pode não ser feita com o melhor conjunto de parâmetros.

Buscou-se a calibração dos parâmetros dos quais havia mais incertezas quanto aos seus valores. Deste modo, os parâmetros área e declividade (média) das sub-bacias não foram calibrados, pois foram obtidos por meio da caracterização da bacia realizado com base no modelo digital de terreno gerado no AutoCad Civil 3D®. Os parâmetros do escoamento superficial calibrados foram:

- Percentual de área impermeável (Ai);
- Coeficiente de rugosidade de Manning para superfície impermeável da sub-bacia (ni);
- Coeficiente de rugosidade de Manning para superfície permeável da sub-bacia (np);
- Altura de armazenamento em depressões em áreas impermeáveis (di);
- Altura de armazenamento em depressões em áreas permeáveis (dp);
- Coeficiente CN (curva número);
- Coeficiente de rugosidade de Manning para canais (nc).

Quanto ao escoamento subterrâneo, considerou-se os valores dos parâmetros A1 e B1, da Equação 4, iguais para todas as sub-bacias, pois havia incerteza quanto a esses valores.

Com isso, foi possível controlar melhor a influência destes parâmetros no hidrograma de saída. Para os aquíferos, foram calibrados os parâmetros: Porosidade, Capacidade de Campo e Condutividade Hidráulica.

A eficiência da calibração foi avaliada visualmente e pelo coeficiente de determinação (r^2), além do cálculo da diferença no volume escoado. Durante o processo de calibração procurou-se privilegiar o ajuste no volume total escoado, priorizando também o aumento do valor do coeficiente de determinação.

O coeficiente de determinação é calculado conforme apresentado na Equação 7 (BELING, 2013):

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})-(C_i-\bar{C})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\bar{C})^2}}\right]^2 \qquad \text{Equação 7}$$

Onde:

n – número de intervalos de tempo;

C_i – valor calculado no intervalo i;

O_i – valor observado no intervalo i;

$\bar{O}$ – valor médio observado;

$\bar{C}$ – valor médio calculado;

O resultado de r^2 pode variar de 0 a 1, sendo que o valor zero significa que não há correlação, enquanto o valor 1 significa que o ajuste é perfeito.

Com relação à validação, optou-se por utilizar o evento intenso e persistente ocorrido na Cidade do Rio de Janeiro em Abril de 2010. Toda a cidade foi afetada. A região baixa da bacia do rio Morto ficou alagada por alguns dias, isolando partes do bairro de Vargem Grande do resto da cidade.

2.4. Descrição dos Cenários Estudados

Após o ajuste dos parâmetros do modelo, foram simulados três diferentes cenários, sendo que o primeiro considera a situação atual da bacia e os demais preveem uma forma diferente de intervenção para o controle de enchentes.

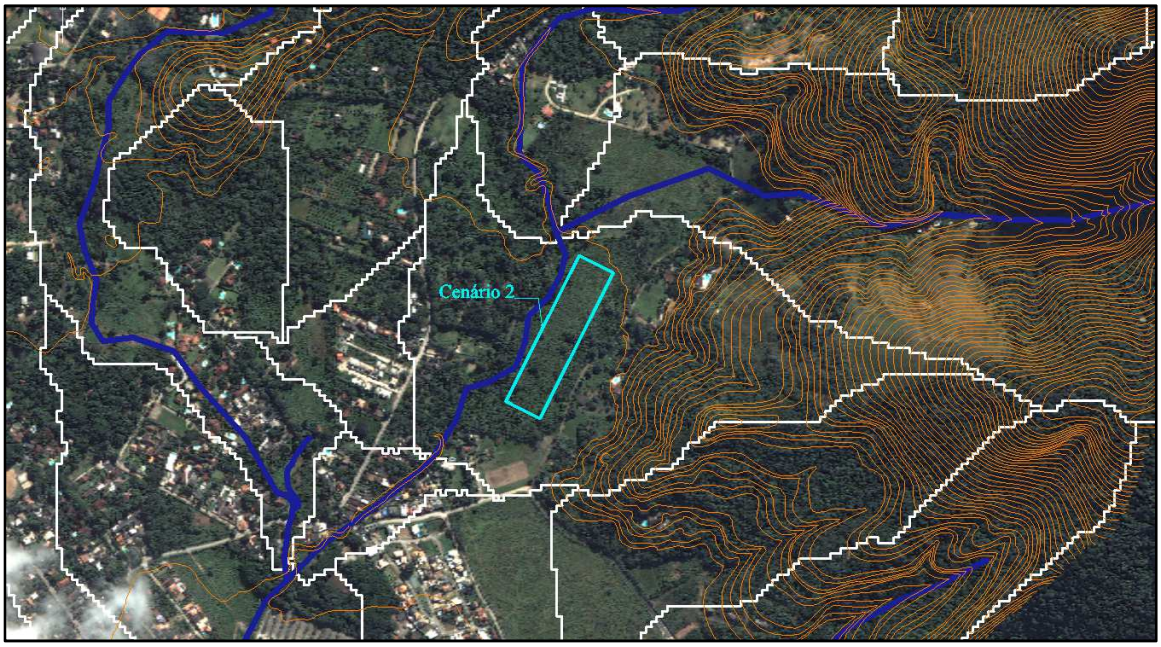
O cenário 2 considera a implantação de um reservatório de detenção nas proximidades do rio Sacarrão. A estimativa das dimensões e localização foi adaptada do trabalho de BATISTA (2009), que propôs a implantação de reservatório de detenção para fins múltiplos em um ponto específico da bacia hidrográfica do rio Sacarrão.

O reservatório de amortecimento de cheias ou reservatório de detenção, com volume de 42.750m^3, foi projetado como off-line, ou seja, retém volumes de água que são desviados do eixo do curso d'água principal quando ocorre a cheia e são restituídos ao sistema principal através de bombeamento, após obtido o amortecimento do pico de vazão do hidrograma bem como o retardo da onda de cheia. Um croqui elucidativo da Geometria do Reservatório de Detenção é apresentado no Apêndice D.

O reservatório possui área de 22.500 m² (BATISTA, 2009) e altura média de 1,9m, dois vertedores de 10m x 0,80m e um orifício de 0,40 m de diâmetro.

A Figura 19 representa de forma esquemática a localização do reservatório proposto no cenário 2.

Figura 19 - Localização do reservatório de detenção proposto



O cenário 3 considera a implantação de reservatórios distribuídos nos lotes da bacia hidrográfica. Foram considerados que os lotes na região possuem em torno de 400m² e que

250m² desta área seriam impermeáveis. Para o cálculo da capacidade do reservatório foi utilizada a Equação 8, prevista no decreto n° 23.940 de 30 de janeiro de 2004 para a cidade do Rio de Janeiro. Este decreto prevê a obrigatoriedade de construção de reservatório de retardo destinado ao acúmulo de águas pluviais para empreendimentos novos, públicos e privados, que tenham área impermeabilizada igual ou superior a 500m² (BATISTA, 2009).

$$V = kA_iH \qquad \text{Equação 8}$$

Sendo:

V o volume do reservatório em m³;

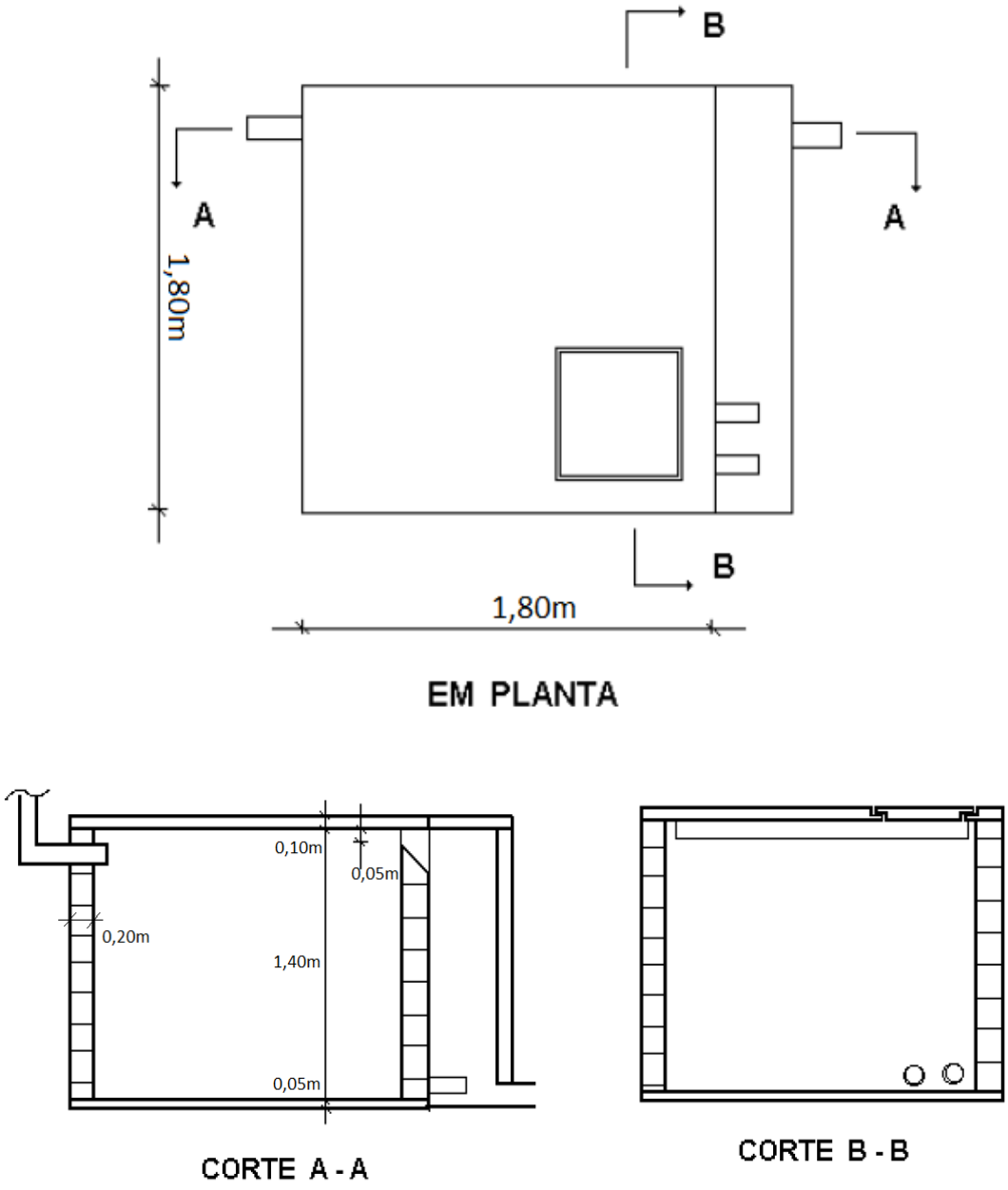
K o coeficiente de abatimento, correspondente a 0,15;

A_i a área impermeabilizada em m²;

H a altura de chuva, em metro, correspondente a 0,06 m nas Áreas de Planejamento 1, 2 e 4 e a 0,07 m nas Áreas de Planejamento 3 e 5.

No estudo de caso proposto, o resultado da equação foi um reservatório de 2.250l. Para estimativa orçamentária, foi considerado um reservatório de lote de concreto armado, cujas dimensões úteis são 1,40mx1,40mx1,40m (base, largura, altura), totalizando 2,7m³, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Dimensões do reservatório de lote de águas pluviais



Fonte: Adaptado de TUCCI, *et al.*,1998.

O Quadro 5 apresenta um resumo com os cenários propostos.

Quadro 5 - Cenários propostos

Cenário	Nome do Cenário	Descrição
1	Condições Atuais da Bacia	Não considera nenhuma intervenção na bacia.
2	Reservatório de detenção	Considera a implantação de um reservatório próximo ao rio Sacarrão, um dos principais afluentes do rio Morto. Possui área de 22.500m² e altura média de 1,9m, dois vertedores de 10m x 0,80m e um orifício de 0,40m de diâmetro.
3	Reservatório nos lotes	Considera a implantação de reservatórios de 2,7m³ nos lotes ocupados ao longo da bacia.

Um ponto importante a ser destacado é que o modelo SWMM, em sua interface original desenvolvido pela EPA, permite que alguns dispositivos LID (como o reservatório de águas pluviais) sejam facilmente inseridos nas sub-bacias. O mesmo não acontece com a interface SSA, por isso há a necessidade da utilização de um artificio para representar esses reservatórios no modelo. Neste trabalho considerou-se a soma do volume total dos reservatórios distribuídos nas sub-bacias e este volume foi representado através de um reservatório único em cada sub-bacia.

A análise dos cenários foi feita para o período de 01 a 12 de abril de 2010, com o objetivo de avaliar a eficácia das medidas propostas na mitigação da cheia ocorrida neste período.

2.5. Apropriação dos Custos Associados aos Diferentes Cenários

Para avaliação da alternativa que seria mais vantajosa economicamente, foi realizada a estimativa de cálculo dos custos de implantação dos reservatórios propostos.

Por tratar-se de uma região localizada na Área de Planejamento 4 da cidade do Rio de Janeiro, considerou-se, como referencial, o Sistema de Custos para Obras (SCO-RIO) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (PCRJ), que é utilizado, de forma compulsória, em projetos e obras públicas orçados no âmbito do Município do Rio de Janeiro.

No catálogo do SCO-RIO, são contempladas diversas categorias, tais como Administração (AD), Alvenaria (AL), Consultoria Especializada (CE), Drenagem (DR), Equipamentos (EQ), Estruturas (ET), Fundações (FD), Movimento de Terra (MT), Revestimentos (RV), Serviços Complementares (SC), Serviços Especializados (SE), Transporte de Carga (TC) etc. Os itens de serviço são compostos por itens elementares ou reutilizados, os quais são devidamente aprovados em reuniões da Câmara Técnica da Secretaria Municipal de Obras para posterior inclusão no catálogo do Sistema.

Além do Sistema de Custos para Obras (SCO-RIO) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, devem ser mencionados, no âmbito do poder público, o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) do Governo Federal e o Sistema de Custos da Empresa Municipal de Obras Públicas do Rio de Janeiro (EMOP), em sua 12ª edição, do Governo do Estado do Rio de Janeiro.

Para estimativa orçamentária referente ao reservatório de lote de concreto armado, cujas dimensões úteis são 1,4mx1,4mx1,4m (base, largura, altura), totalizando 2,7m^3, foram considerados os custos referentes à mão de obra, transporte, equipamentos, instalações físicas necessárias e sinalização, materiais e custo com escavação, reaterro e bota-fora etc. A estimativa orçamentária teve por referência o Sistema de Custos para Obras (SCO-RIO) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (PCRJ), cujo valor unitário do reservatório de lote, apropriado pelos itens de serviço do referido Sistema, foi da ordem de R$3.500,00 por unidade. A memória de cálculo é apresentada no Apêndice C.

A estimativa orçamentária para o reservatório de amortecimento de cheias ou reservatório de detenção teve por referência também o Sistema de Custos para Obras (SCO-RIO) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (PCRJ), de forma análoga à estimativa elaborada para o reservatório de lote. Para o reservatório de detenção, foram considerados custos referentes à mão de obra, transporte, equipamentos, instalações físicas necessárias e sinalização, materiais e custo com escavação, reaterro, bota-fora etc. O valor do reservatório de amortecimento de cheias ou reservatório de detenção projetado, apropriado pelos itens de serviço do referido Sistema, foi da ordem de R$12.100.00,00. A memória de cálculo é apresentada no Apêndice C.