

OTIMIZAÇÃO DA DRENAGEM URBANA COM A INTEGRAÇÃO DO CADASTRO TÉCNICO E SIG NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E VARIÁVEIS DE PROJETO

Thiago Garcia da Silva Santim¹; Jefferson Nascimento de Oliveira²; José Augusto de Lollo³; Junior de Souza Sumai⁴; Celina Maria Alves Honorio⁵ & André Pazzini Bomfim⁶

RESUMO. O estudo feito teve como foco a realização do cadastro técnico do uso e ocupação do solo com as cartas temáticas sobre o tipo de solo, cartas de declividade, cartas topográficas e as plantas de uso e ocupação do solo. Houve a implementação dos parâmetros e das variáveis hidrológicas, geológicas e antrópicas de uma sub-bacia contida na área urbana de Ilha Solteira – SP em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), que pela álgebra de mapas, possibilitou a obtenção das grandezas de projeto de acordo com as condições das características atuais, e simulações de condições futura. Utilizando o SIG ArcMap 9.2 na determinação dos parâmetros da bacia de drenagem obteve-se uma estimativa mais precisa dos coeficientes de escoamento superficial, parâmetros da fórmula de Horton e coeficientes de Manning, pois o método racional foi utilizado para o cálculo das vazões. Com isso foi criada uma ferramenta computacional para dimensionar um novo sistema de drenagem urbana, incluindo obras de dissipação de energia. Isto dará ao município o controle das características urbanas, e a identificação de impactos do desenvolvimento antes que eles ocorram.

ABSTRACT. This study had the achieve of integrate the technical registration of land use and occupation with the thematic cards about type of soil, topographic, slope, and the land use and occupancy of the soil. Thus were implemented the parameters about geological, hydrological and human variable of a pilot Ilha Solteira's - SP urban sub-basin in a GIS, from which, for the algebra of maps, the project's values and project the characteristics of current conditions could be obtained, enabling also simulations and future conditions developments. Using GIS ArcMap 9.2 in determining the parameters of the drainage basin was provided a more accurate to estimate the runoff coefficient, parameters of the Horton's formula and coefficients of Mannin. Finally, got up as a result a computational tool that enables the dimensioning of a new urban drainage system, including dissipation of energy works. This product will permit the municipality exercising control of urban characteristics while where you can identify as will be the impact of future developments before they occur.

Palavras chave: Planilhas Excel, Fórmula de Horton, Coeficiente de Runoff.

¹ Mestrando em Engenharia Civil - *LHP* - FEIS – UNESP. Alameda Bahia, 550 – Norte 15385000 Ilha Solteira. E-mail tgssantim777@yahoo.com.br

² Professor Assistente Doutor ligado ao Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – *LH*² - Departamento de Engenharia Civil (DEC)- Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) – UNESP – Campus de Ilha Solteira. Alameda Bahia, 550 – Norte, Caixa Postal 31 Ilha Solteira – SP. Brasil. CEP 15385000. e-mail: jeffno@dec.feis.unesp.br

³ Professor Livre Docente - DEC – FEIS – UNESP. Alameda Bahia, 550 – Norte, 15385000 Ilha Solteira. E-mail lolloja@dec.feis.unesp.br

⁴ Graduando em Engenharia Civil – *LHP* - FEIS – UNESP . Alameda Bahia, 550, Norte 15385000 Ilha Solteira. E-mail sumaijunior@hotmail.com

⁵ Graduando em Engenharia Civil – *LHP* - FEIS – UNESP. Alameda Bahia, 550, Norte 15385000 Ilha Solteira. E-mail w_honorio@ig.com.br

⁶ Graduando em Engenharia Civil – *LHP* - FEIS – UNESP. Alameda Bahia, 550, Norte 15385000 Ilha Solteira. E-mail andre_pazzini@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional acelerado, somado à falta de planejamento para o desenvolvimento das cidades e ao descaso da sociedade na preservação dos recursos naturais, tem resultado em um quadro problemático, no qual a água - elemento essencial à vida - é tida apenas como um problema. Entretanto, diante das dúvidas que surgem acerca do futuro da água na vida dos homens e no planeta Terra, torna-se importante que ela seja entendida não mais como um problema e sim como um implemento no sistema urbano.

Essa nova visão, que implica em mudanças drásticas no comportamento e na forma de pensar da sociedade, trás consigo conceitos inovadores para a elaboração de projetos na tentativa de causar o menor impacto possível do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico. Segundo Canholi (2005); “Enquanto a bibliografia disponível em outros países sobre exemplos da aplicação desses conceitos inovadores é pródiga, no Brasil, surpreendentemente, a aplicação ou mesmo a especulação da sua aplicabilidade, ainda é incipiente”.

O atraso brasileiro segundo Tucci e Marques (2000) ocorreu devido ao crescimento acelerado, produzindo muitas cidades com centenas de milhares de habitantes em um curto período de tempo. Tal acontecimento condicionou o enfoque dos projetos por uma maior preocupação com a drenagem urbana de bacias de grande porte em vista das dificuldades enfrentadas pelas populações residentes nestas áreas: inundações, alagamentos, desmoronamentos, transmissão de doenças de veiculação hídrica.

Nos países desenvolvidos, por exemplo, as pesquisas em drenagem urbana foram feitas na maioria das vezes em bacias de alguns hectares ou dezenas de hectares. Estes estudos tinham como objetivo principal conhecer o impacto de certos tipos de urbanização na drenagem para fins de planejamento futuro. Isto permitiu a Europa consolidar o conceito de hidrologia urbana (Tucci e Marques, 2000) com conhecimento de causa para uma gama significativa de processos de ocupação urbana, pois apesar de se tratar do mesmo fenômeno cada área urbana possui peculiaridades que individualiza cada processo de urbanização. Enquanto isto o Brasil continuou atrelado ao conceito higienista da drenagem urbana, ou seja, a evacuação rápida do escoamento pela rede de esgoto pluvial separada da rede de esgoto doméstico para sanar as dificuldades dos aglomerados urbanos de grande porte.

De acordo com Tucci e Marques (2000), o princípio higienista foi consolidado no início do século passado pelo sanitarista Saturnino Brito. Canholi (2005) afirmou que o conceito higienista não trata o problema do aumento da vazão, apenas o empurra para jusante, implicando no futuro em novos problemas com inundações.

Nesse contexto, destacam-se a importância de se estudar os efeitos da urbanização em bacias de pequeno porte para que pesquisas em hidrologia urbana possam ser feitas e o processo de degradação do meio ambiente seja contido. Isto infelizmente, segundo Canholi (2005), não está acontecendo e sendo ampliado à medida que os limites urbanos aumentam ou a densificação das cidades se torna intensa.

A grande parte das pesquisas brasileiras tratam as bacias como um todo e assim é conhecida apenas a hidrologia da bacia, suprimindo os efeitos da urbanização nas variáveis hidrológicas, pois a área urbana em muitos casos, como ocorre em Ilha Solteira – SP, é muito menor do que a rural, assim um estudo da hidrogeologia de todo o município não seria representativo para o conhecimento da hidrologia urbana que necessita de um grau discretivo maior.

A Figura 1 demonstra as diferentes escalas de análise que conduzem a identificação dos mais variados componentes e arranjos espaciais.

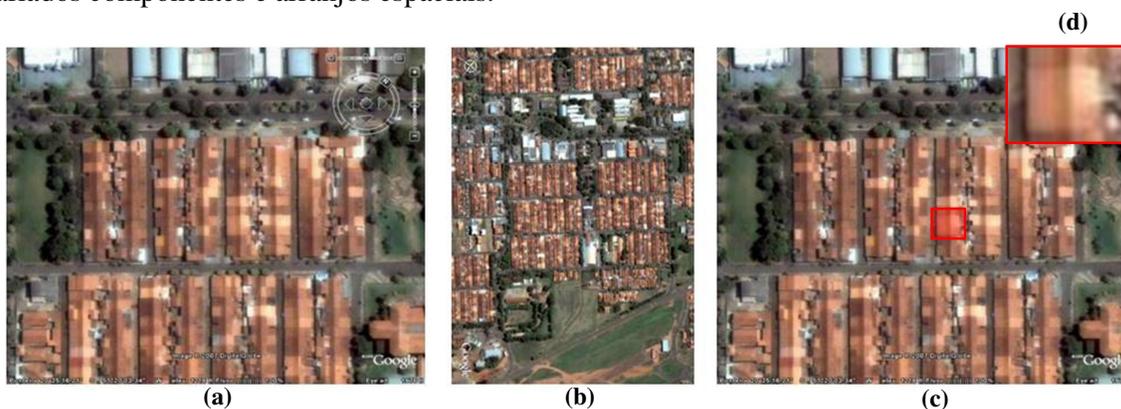


Figura 1 - Diferentes escalas de análise; priorizando (a) o município, (b) o bairro, (c) a quadra, e (d) o lote.

Em virtude das variáveis hidrológicas serem afetadas pelas alterações das características de ocupação do solo, as medidas de controle também serão influenciadas, pois as variáveis hidrológicas são utilizadas para o dimensionamento dos equipamentos de drenagem. Mesmo quando as medidas de controle a serem implantadas dizem respeito à educação ambiental é importante estudar as características de uso e ocupação do solo para que desta forma um panorama geral da cultura da comunidade com relação à urbanização seja estabelecido e a partir daí seja elaborado um plano de ação para conscientizar e informar de maneira mais eficiente.

Portanto, o produto desse estudo auxiliará na determinação das variáveis e parâmetros hidrológico-geológicos para a aplicação de métodos de dimensionamento de estruturas hidráulicas, tais como galerias, dissipadores de energia e bacias de sedimentação. Para tanto a integração do SIG com o cadastro do uso e ocupação do solo do centro urbano e as cartas temáticas torna-se pertinente para a obtenção de variáveis e parâmetros de projeto. Assim procede-se a elaboração de planilhas de

dimensionamento, estas que serão ferramentas de fácil manuseio, possibilitando simulações que farão prognósticos quantitativos dos impactos nos recursos hídricos superficiais para alterações na paisagem da sub-bacia.

De acordo com Figueiredo (1994), a falta de controle das alterações no uso e ocupação do solo implica em alterações nos parâmetros admitidos pelos planejadores urbanos, durante a elaboração dos equipamentos da cidade. Dentre estes equipamentos, Tomaz (2002) destaca a rede de drenagem, pois nela ocorre o efeito de sobrecarga hídrica em virtude do aumento do volume escoado, devido à impermeabilização dos espaços ocupados.

Esse incremento da vazão causa danos na micro-drenagem que lança o efluente na macro-drenagem e, assim, a degradação atinge as áreas naturais de descarga do escoamento superficial urbano no meio ambiente natural (MOTA, 2003).

Entretanto, com a elaboração dos planos diretores os municípios passaram a ter informações sobre suas características físicas e climáticas até então pouco conhecidas. Estas informações constituem uma fonte riquíssima de possibilidades a serem exploradas para aprimorar os novos projetos urbanos, porém existe um abismo entre as informações e os procedimentos técnicos.

As dificuldades têm as mais diversas origens: falta de ferramentas computacionais para tratar os dados, falta de conhecimento do corpo técnico ou mesmo capital limitado para investir em *softwares* já consagrados e de aplicação pouco constante na esfera dos municípios de pequeno porte.

Obter informações com vistas a sua utilização no futuro possibilita a integração dos planos diretores municipais, pois este deveria ser o conjunto de planos diretores que estabelecesse as diretrizes para as redes de drenagem, o sistema viário, o uso e ocupação do solo e o saneamento ambiental. Cada um destes planos gera uma gama de informações que podem ser interligadas promovendo a tão esperada integração entre os planos diretores. Tal proposição permite que os cálculos passem a assumir valores de variáveis cada vez mais próximas da condição real. Desta forma, o objetivo deste trabalho é fornecer um ferramental de controle dos parâmetros urbanos, monitoramento das vazões efluentes do centro urbano para o dimensionamento dos equipamentos de micro e macro-drenagem.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1 Características da Área de Estudos

A área de estudos, conforme ilustrado pela Figura 2, é uma sub-bacia urbana do município de Ilha Solteira – SP.

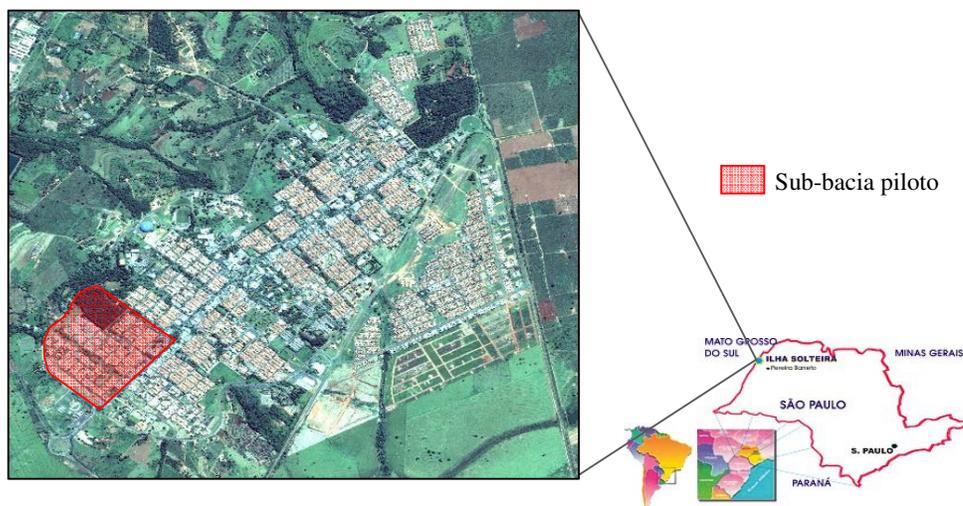


Figura 2 – Localização da área de estudo e histórico da ocupação
(Fonte: Modificado de Santim e Oliveira, 2007)

A cidade foi fundada em 1968 para dar abrigo aos responsáveis pela construção da Usina Hidroelétrica de Ilha Solteira, porém neste ano o núcleo habitacional ainda era denominado como alojamento, pertencendo ao município de Pereira Barreto – SP.

O projeto inicial do alojamento não previa a existência de habitações que fossem diferentes dos tipos pré-determinados, desta forma até meados de 1979 não houve alterações no *layout* das residências, mas a partir deste ano, na busca de um conforto maior, os moradores passaram a alterar as características das casas, aumentando a área coberta por telhados e impermeabilizando o solo. A Figura 3 proporciona o impacto visual da expansão urbana e da alteração da ocupação do solo na sub-bacia analisada.



Figura 3 – Área de estudos em 1970 (a); e atualmente (b)
(Fonte: (a) DEE, 2006; (b) Google Earth, 2008)

O alojamento foi emancipado em 1991 e de acordo com dados da Prefeitura Municipal de Ilha Solteira (2007) em 2006 a cidade contava com uma população de 24181 habitantes, em uma área territorial de 639,47 km² sendo 9,37 km² ocupados pela área urbana consolidada. A área foco dos estudos responde por 0,527 km² que diz respeito a 5,62% do núcleo urbano consolidado e onde

residem 1092 habitantes, conforme dados de densidade populacional deste setor fornecidos por Prefeitura Municipal de Ilha Solteira (2007).

O clima da região é o tropical tipo AW, segundo o critério de Köppen, ou seja, chuvas de verão e estiagem de inverno. Apresenta índice pluviométrico em torno de 1300 mm anuais e temperatura média anual de 28°C, com a média das máximas anuais atingindo 31°C. A Tabela 1 descreve as características físicas da região.

Tabela 1 – Características do sítio urbano de Ilha Solteira – SP (Fonte: Inventário de Ilha Solteira - Depto. de Turismo e Cultura PMIS *apud* Prefeitura Municipal de Ilha Solteira, 2007 e IPT, 2000)

Aspecto	Descrição
Geologia	Quanto à geologia, a região de Ilha Solteira possui rochas sedimentares do grupo Bauru (Formações Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá)
Geomorfologia	A região de Ilha Solteira é parte do chamado planalto ocidental ou planalto basáltico. Sua estrutura que data do mesozóico, constitui-se principalmente de arenitos e cretáceos. Ao longo dos principais rios regionais - Paraná, Tietê e São José dos Dourados - graças à retirada desse capeamento sedimentar, afloram rochas mais antigas. Desde Jupia, as rochas são eruptivas basálticas. Os depósitos ocorridos durante o período cretáceo, denominados arenitos Bauru, apresentam fácies diferentes: o Bauru inferior sem cimento calcário e o Bauru superior com cimento calcário.
Relevo	O relevo pode ser descrito em síntese por colinas médias e colinas amplas.
Solos	Os tipos de solo encontrados são o Podzólico Vermelho – Amarelo e Podzólico Vermelho – Escuro, ambos de textura arenosa/média, não abruptos.
Vegetação	Formações de mata e de cerrado. A cobertura vegetal original da região onde se localiza Ilha Solteira era representada pela mata tropical latifoliada semi-decídua, pelo cerrado e pelo cerradão. Observa-se escassez de vegetação natural que recobre apenas cerca de 1% da área do município. A maior parte dos ecossistemas agrícolas do município é constituída por pastagens.

2.2 – Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho tiveram por objetivo a determinação dos coeficientes, variáveis e parâmetros para serem utilizados pelo método de Horton, balanço de massas (método racional) para determinar a infiltração e a vazão respectivamente. Assim fez-se uso dos seguintes documentos e plantas:

- Plano diretor de Ilha Solteira – SP: para obter os dados de perdas no sistema de abastecimento de água e o volume utilizado no abastecimento, número de habitantes, densidade demográfica, sub-bacias urbanas e os usos do solo;
- Projeto inicial do núcleo habitacional de Mange (1963): para conhecimento do cenário urbano inicial;
- Planilhas do cadastro de uso e ocupação do solo de Santim e Oliveira (2007);
- Cartas temáticas sobre tipo de solo, geologia e relevo: para a obtenção da porosidade do solo e vertentes da área urbana;

- Plantas das residências: para conhecimento das áreas ocupadas por telhados, concreto e jardins;
- Imagens de satélite utilizadas no *ArcMap 9.2*: com o intuito de se obter informações de áreas não abrangidas por Santim e Oliveira (2007) e das residências cujas plantas não estava acessíveis;
- Dados da rede hidrometeorológicos da UNESP para a região de Ilha Solteira – SP: para desta forma obter a taxa de evapotranspiração e assim refinar o valor das perdas.

2.3 – O arcabouço computacional

Todo o método ateve-se ao fato de que os dados de vazão provenientes da sub-bacia urbana eram inexistentes, assim, a vazão foi obtida por meio da integração entre o método de Horton e o método do balanço de massas (método racional) em simulações.

A fundamentação do método foi baseada nos trabalhos de Rodriguez *et al* (2003) e Weng (2001) que priorizaram em seus estudos o uso de sensoriamento remoto e georreferenciamento para quantificar os parâmetros das bacias analisadas.

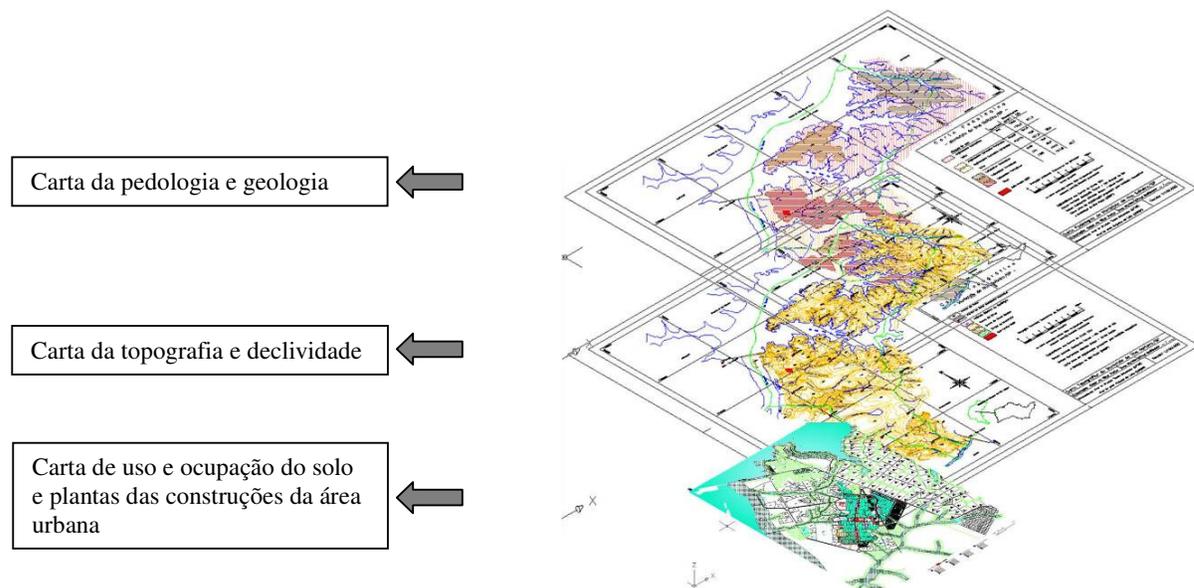


Figura 4 – Informações tratadas pelo SIG

Soma-se no método desta proposta de projeto a álgebra de mapas para uma melhor discretização do coeficiente de escoamento superficial das áreas permeáveis em decorrência da sua importância no amortecimento dos picos de cheias.

Esse estudo mais acurado para a determinação do coeficiente de escoamento superficial das áreas permeáveis visa o estabelecimento do comportamento das áreas que possibilitam a infiltração durante o evento de chuva. O objetivo do tratamento dessas informações no ambiente SIG foi para o estabelecimento de uma base de dados que descrevesse detalhadamente o uso e ocupação do solo,

bem como suas características físicas e pedológicas para então o cálculo dos hidrogramas em planilhas com macros pré-programadas para efetuar as operações matemáticas.

O método consistiu no cálculo do escoamento superficial em pontos da sub-bacia, sendo a localização destes pontos nos cruzamentos das vias. A ligação destes pontos é o trecho analisado e para cada trecho há uma área de contribuição, a Figura 5 demonstra o exposto.

A Figura 6 é o ambiente SIG em *ArcMap 9.2* visualizado após a inserção das cartas temáticas de interesse e a atribuição dos coeficientes para os *shapes*.

A tabela resultante caracterizou o trecho conforme as necessidades de cálculo da infiltração, tempo de concentração e do volume escoado superficialmente.

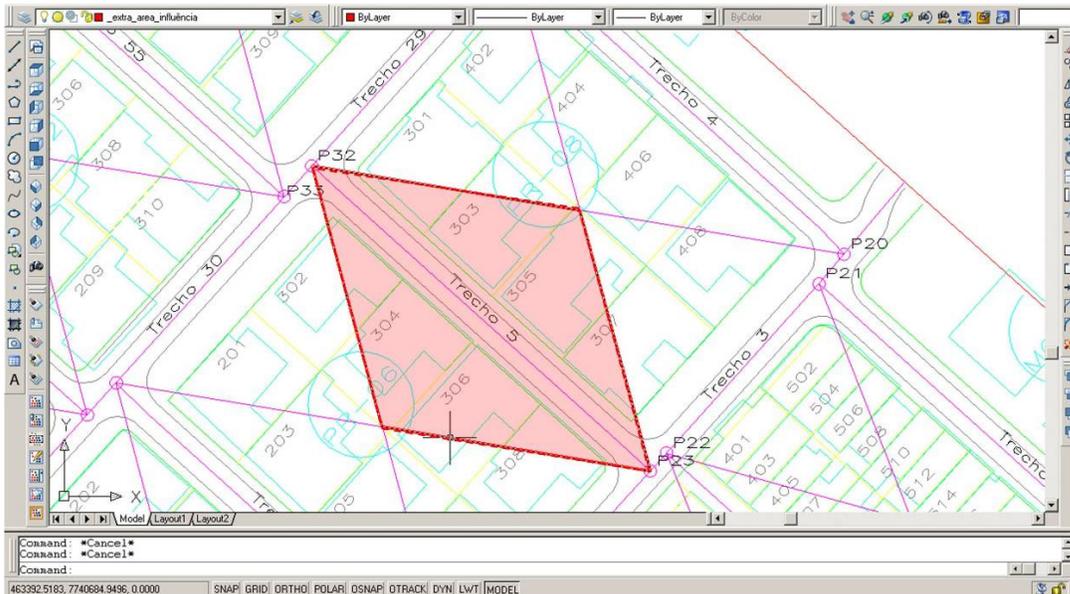


Figura 5 – Detalhe dos pontos de análise, trechos e área de influência para o trecho 5

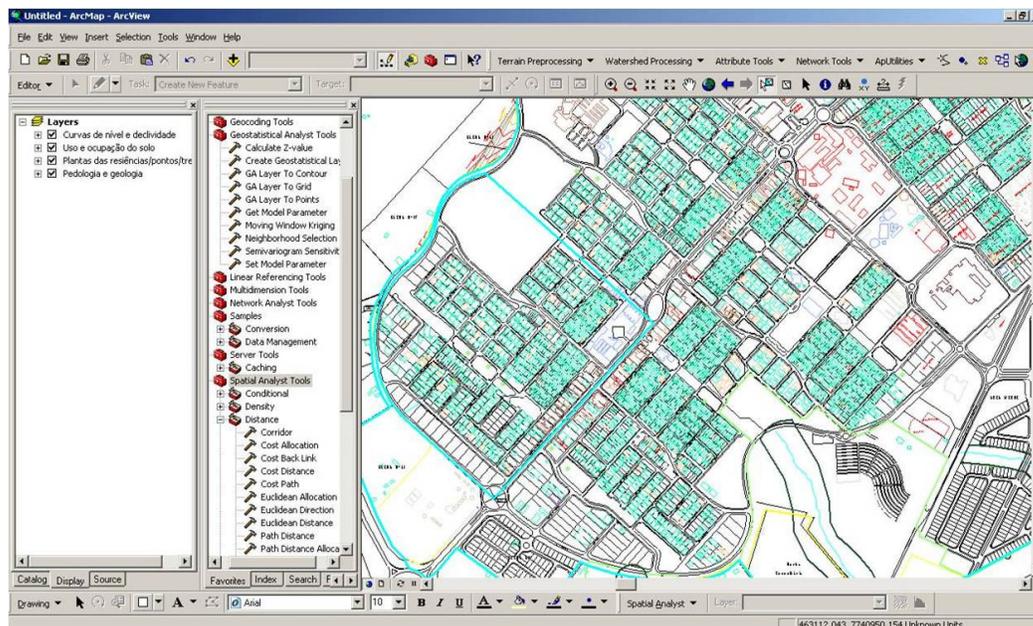


Figura 6 – Tabela resultante da área selecionada

Todas estas informações no formato de tabela foram copiadas e inseridas em uma planilha do *Microsoft Excel 2003* já estruturada para receber os dados e proceder aos cálculos para os 79 trechos. O arcabouço da estrutura matemática foi construído com base em 3 planilhas, sendo a primeira uma planilha de entrada onde apenas os valores globais foram inseridos. Os valores globais tais como precipitação média anual sobre a sub-bacia, comprimento, declividade, áreas de cada tipo de ocupação e a rugosidade do talvegue mais extenso, ver Figura 7.

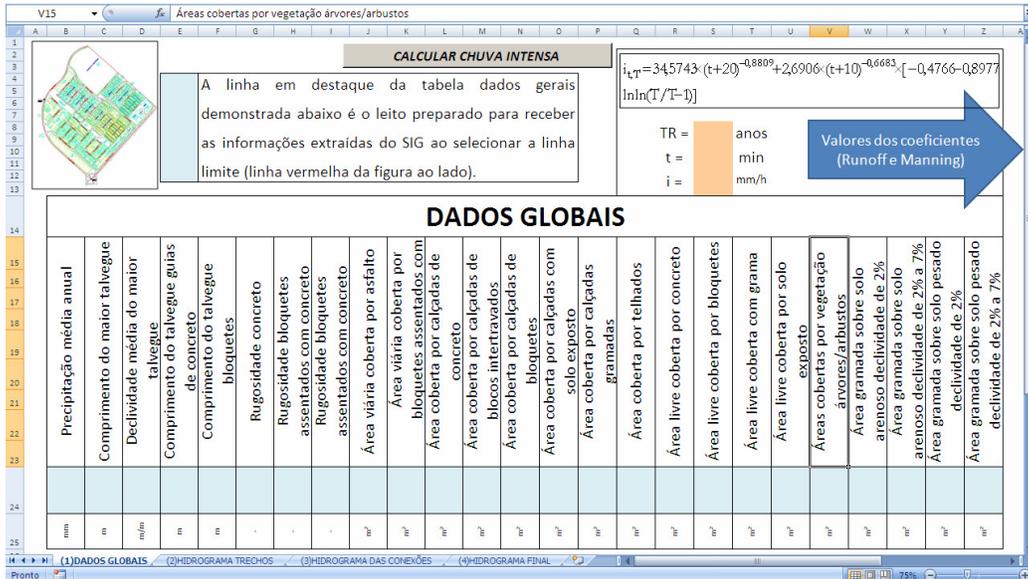


Figura 7 – Planilha dos dados globais

Essa primeira planilha denominada dados globais foi essencial para o cálculo do tempo de concentração da sub-bacia e da chuva intensa de projeto, nela existe também a tabela com os valores do coeficiente de escoamento superficial (tal como apresentado na Tabela 2 deste trabalho) e também a fórmula de chuvas intensas programada, sendo acionada pelo botão denominado “calcular chuva intensa”. A segunda planilha, Figura 8, trabalhou com os dados de cada trecho.



Figura 8 – Planilha para análise dos trechos separadamente

Um sistema de drenagem não é projetado apenas com as vazões de um único trecho e sim com a sucessão aditiva de hidrogramas, ou seja, o hidrograma do trecho 1 encerra onde começa o do trecho 2, sendo que o do trecho 2 corresponde ao somatório dos trechos anteriores. Com vistas a esta contínua somatória de efeitos no tempo e no espaço foram configurados controles *activex* que permitiram a obtenção do hidrograma final no ponto de jusante da sub-bacia em estudos.

A opção pelos controles *activex* possibilitou escolher diversos *layouts* entre os trechos a, ou seja, o trecho 1 pode conectar-se a jusante ao trecho 2 ou ao trecho 3, conectando-se ao 2 ele manterá constante o seu sentido, mas ao conectar-se ao 3 o escoamento muda o sentido fazendo com que a montante do trecho 2 a vazão seja nula, pois a contribuição de montante foi direcionada para outro trecho e assim situações de avaliação da carga hídrica puderam ser feitas. Por fim a planilha 3, esta que é o hidrograma no ponto de lançamento final da sub-bacia urbana, sendo o conhecimento destas vazões importante para o dimensionamento das estruturas de dissipação de energia em virtude de já ocorrerem neste ponto processos erosivos, conforme a Figura 9 retrata.



Figura 9 – Pontos de erosão da sub-bacia em estudo

A determinação do hidrograma final depende da declaração prévia de todos os trechos que estarão ligados, pois a macro acionada pelo botão denominado por “Hidrograma final” no topo da planilha estudo global resulta em erro quando os trechos não estão devidamente conectados, pois a falta de conectividade implica em uma condição abortiva nas sucessivas análises condicionantes presentes no fluxograma da macro.

2.4 – Métodos para determinação dos hidrogramas

Como já exposto, o método para o cálculo das vazões nas simulações foi uma junção entre o método de Horton para a quantificação da infiltração nas áreas permeáveis ao longo do tempo de chuva e o método do balanço de massas ou racional para o cálculo da vazão gerada pelas áreas impermeabilizadas.

Segundo Kuichling (1889) *apud* Canholi (2005) a relação entre a vazão de precipitação e a vazão efetiva é igual à área impermeabilizada da bacia quanto toda esta área está contribuindo, desta forma tem-se a Equação 1.

$$Q_p = (C_{10} \cdot i \cdot AD) / 3,60 \quad (1)$$

Em que:

Q_p – é a vazão de pico do escoamento superficial (m^3/s);

i – a precipitação de projeto (mm/h);

AD – Área de drenagem (Km^2);

C_{10} – Coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de *runoff* para período de retorno (TR) de 10 anos, conforme Tabela 2 (adimensional).

A Tabela 2 fornece os valores do coeficiente de escoamento superficial com base em Sabol *et al* (2003), Tomaz (2002) e ABCP (2004). Os valores utilizados neste trabalho serão determinados conforme a Tabela 2 e segundo as características do solo e do uso e ocupação a qual a sub-bacia está e esteve sujeita ao longo dos anos.

Tabela 2 – Coeficiente de escoamento superficial para TR = 10 anos (Fonte: Sabol *et al*, 2003; Tomaz, 2002; e ABCP, 2004)

USO	OCUPAÇÃO	C_{10}
Sistema viário	Solo exposto (compactado)	0,66
	Solo exposto	0,30
	Piçarra	0,25
	Bloquetes	0,78
	Bloquetes assentados com concreto	0,90
	Asfalto	0,90
	Concreto	0,95
Área comercial	Centro da cidade	0,95
	Vizinhanças	0,70
Área residencial	Habitação uni-familiares	0,50
	Habitação multi-familiares isoladas	0,60
	Habitação multi-familiares geminadas	0,75
	Residencial suburbana	0,70
	Apartamentos	0,70
Industrial	Indústrias leves	0,80
	Indústrias pesadas	0,90
	Parques e cemitérios	0,25
	Pátios não pavimentados	0,35
	Solo não cultivado	0,30
Lotes	Área ocupada por telhados	0,90
	Área livre ocupada por concreto	0,85
	Área livre ocupada por bloquetes	0,78
	Área livre ocupada por piçarra	0,25
	Área livre ocupada por solo exposto	0,30
Áreas verdes e praças	Gramado, solo arenoso declividade de 2%	0,10
	Gramado, solo arenoso declividade de 2% a 7%	0,15
	Gramado, solo arenoso declividade superior a 7%	0,20
	Gramado, solo pesado declividade de 2%	0,17
	Gramado, solo pesado declividade de 2% a 7%	0,22
	Gramado, solo pesado declividade superior a 7%	0,35
	Árvores/Arbustos	0,25
	Pavimento intertravado	0,60

Sendo as áreas permeáveis os espaços urbanos não dotados de superfícies artificiais que visem impermeabilizar o solo, pode-se concluir, como conhecimento da Tabela 2 que as áreas permeáveis possuem C_{10} variando entre 0 e 0,35, sendo os valores superiores a 0,35 referentes às áreas com ocupações diferentes das naturais, tal como solo, grama e árvores ou arbustos além de outros.

Quando se isola a fração Q/i da Equação 1 obtém-se o que Kuichling (1889) chamou de valor racional, terminologia propulsora da denominação da Fórmula Racional (Canholi, 2005), a qual segundo FCTH (1998) *apud* Tomaz (2002) pode ser aplicada com resultados bastante satisfatórios a bacias de pequeno porte, ou seja: menores do que 3 Km² e com tempo de concentração (t_c) de até 20 minutos.

O método racional possui as seguintes hipóteses de acordo com Wilken (1978), Tucci (2001) e Tomaz (2002):

- Toda a bacia contribui com o escoamento superficial, ou seja, o tempo de duração da chuva (t_{dc}) é maior ou igual ao tempo de concentração da bacia (t_c);
- A chuva é uniformemente distribuída sobre a área de drenagem (AD), daí notam-se os melhores resultados para bacias de pequeno porte;
- Todas as perdas, sendo elas causadas pelo relevo e pela evapotranspiração são incorporadas ao coeficiente de escoamento superficial.

O coeficiente de *runoff* é a relação entre a vazão de precipitação e a vazão que escoam superficialmente. Segundo Wilken (1978) o coeficiente C ideal é o resultado de um maior número de fenômenos considerados em sua determinação, pois, como afirmou Tomaz (2002), tal coeficiente depende da porosidade, cobertura superficial, grau de compactação, declividade, depressões onde a água pode ser acumulada e condições de saturação do solo.

Segundo Francis (1980) e Righetto (1998) a infiltração decresce com o tempo da chuva (t_{dc}), como demonstrado pela Equação 2, conhecida como Equação de Horton a qual fornece uma relação exponencial entre a infiltração e o tempo de chuva (t_{dc}).

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (2)$$

Em que:

$f(t)$ – é a infiltração em função do tempo (mm/h);

f_c – a infiltração final ou constante (mm/h);

f_o – a infiltração inicial (mm/h);

k – a constante de decaimento da infiltração (h^{-1});

t – o tempo (h).

Os parâmetros f_c , f_o e k devem ser obtidos em campo, conforme exposto por Tomaz (2002), mas como já discutido anteriormente, não há dados sobre ensaios destes parâmetros na área de

estudos, entretanto as informações utilizadas no SIG permitem que se possa lançar mão das recomendações feitas por Tucci, Porto e Barros (1995), demonstradas pela Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de parâmetros da fórmula de Horton
(Fonte: Tucci, Porto e Barros, 1995)

Parâmetros da fórmula de Horton	Classificação hidrológica do solo segundo o <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
f_o	250	200	130	80
f_c	25	13	7	3
k	2	2	2	2

Com base na Equação 2 pode-se concluir que quanto maior o tempo de retorno (TR) do evento de chuva, maior será o coeficiente de escoamento superficial, conforme corroborou Canholi (2005): “... o coeficiente C deve ser modificado, conforme a recorrência adotada para a chuva de projeto, em função das diferentes perdas relativas, por causa da abstração inicial em cada caso”. Tomaz (2002) indicou que para utilizar coeficientes de *runoff* para eventos de precipitação com TR superior a 10 anos, deve-se utilizar a Equação 3. A Tabela 2 fornece valores do coeficiente de escoamento superficial.

$$C_{TR} = C_{10} \cdot 0,8 \cdot TR^{0,1} \quad (3)$$

Em que:

C_{TR} - Coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente de *runoff* para um período de retorno TR (adimensional);

TR – Tempo de retorno da precipitação de projeto (anos).

Em vista do comportamento exponencial da infiltração optou-se pelo uso da fórmula de Horton para as áreas permeáveis e, portanto sujeitas à infiltração, assim sendo utilizado o coeficiente de escoamento superficial apenas para as áreas impermeáveis. Por fim, para obtermos a vazão que efetivamente escoou superficialmente ainda temos que quantificar qual a lâmina de água equivalente ao processo de evapotranspiração, desta forma a Equação (1) também pode ser representada pela Equação (4).

$$Q_p = Q_{(C=1,00)} - Q_{PERDAS} \quad (4)$$

Em que:

$Q_{(C=1,00)}$ – Vazão gerada pela área de drenagem se ela fosse toda impermeável (m³/s);

Q_{PERDAS} – Vazão perdida por evapotranspiração, infiltração e devido ao armazenamento em depressões (m³/s).

A vazão de perdas tratou apenas da variável infiltração, pois dados de armazenamento nas depressões da bacia são inexistentes e de difícil obtenção sendo admitido, portanto que todo volume de água retido em depressões irá resultar em um incremento à infiltração. Quanto à vazão que

representaria a evapotranspiração na composição da vazão de perdas, ela foi considerada nula, pois segundo Righetto (1998) durante o evento de chuva a evapotranspiração reduz a um nível de pouca significância para o cálculo de vazões máximas.

Sendo assim foram utilizadas as Equações 5 e 6 para a determinação dos hidrogramas, sendo a primeira relativa às áreas impermeáveis e a segunda às permeáveis.

A Equação 7 fornece a vazão passível de evapotranspiração.

$$Q_{Ip} = [(\sum AD_i \cdot C_{TRi}) \cdot i] / 3,60 \quad (5)$$

Em que:

Q_{Ip} – é a vazão de pico do escoamento superficialmente relativo às áreas impermeáveis (m^3/s);
 AD_i – Área de drenagem constituída pelas i superfícies impermeáveis (Km^2);
 C_{TRi} – Coeficiente de escoamento superficial para uma determinada superfície impermeável i para período de retorno (TR) (adimensional);
 i – a precipitação de projeto (mm/h).

$$Q_{Pp, virtual} = (\sum AD_p \cdot i) / 3,60 \quad (6)$$

Em que:

$Q_{Pp, virtual}$ – é a vazão de pico do escoamento superficialmente relativo às áreas permeáveis, chamada de virtual pois ainda não considera os efeitos da infiltração (m^3/s);

A Equação 6 forneceu o valor da vazão de pico como se a área permeável da bacia fosse totalmente impermeabilizada, ou seja, a vazão que neste trabalho foi chamada vazão virtual. A vazão real das áreas permeáveis é obtida por meio do somatório entre as ordenadas do hidrograma triangular, cujo pico foi obtido pela Equação 6, com a curva de infiltração gerada pela fórmula de Horton, sendo ela expressa em m^3/s .

A Equação 5, assim como a Equação 6, forneceu apenas a vazão de pico para as áreas impermeáveis, entretanto, neste caso obtêm-se diretamente da equação a vazão real, pois se lançou mão do coeficiente de escoamento superficial.

Os hidrogramas triangulares gerados neste trabalho possuem base igual à soma entre o tempo de duração da chuva (t_{dc}) e o tempo de concentração da sub-bacia (t_c). A Equação 7 simboliza o exposto:

$$Q_{(t)} = [(Q_{I(t)} + Q_{P, virtual(t)}) - (\sum AD_p \cdot f_{(t)}) / 3,60] \quad (7)$$

Em que

$Q(t)$ – vazão no tempo t (m^3/s);
 $Q_{I(t)}$ – vazão relativa às áreas impermeáveis no tempo t (m^3/s);
 $Q_{P, virtual}$ – vazão virtual relativa às áreas permeáveis no tempo t (m^3/s);
 AD_p – Área de drenagem constituída pelas p superfícies permeáveis (Km^2);

O tempo de concentração de cada trecho da sub-bacia foi determinado por meio da fórmula da onda cinemática representada pela Equação 8, pois este método leva em consideração as características da superfície de escoamento em função da rugosidade de Manning, valores que serão obtidos segundo Porto (2006), Tabela 4.

$$t_c = 447 \cdot (n \cdot L)^{0,6} \cdot S^{0,3} \cdot i^{-0,4} \quad (8)$$

Em que:

t_c – tempo de concentração da bacia (min);

n – rugosidade de Manning;

L – comprimento do talvegue (km);

S – declividade do talvegue (m/km);

i – intensidade da precipitação (mm/h)

A intensidade da chuva de projeto foi obtida por meio da, Equação 9, equação de chuvas intensas para a cidade de Andradina – SP, cidade localizada a 77km da área de estudos.

$$i = 34,5743 \cdot (t_{dc} + 20) - 0,8809 + 2,6906 \cdot (t_{dc} + 10) - 0,6683 \cdot [-0,4766 - 0,8977 \ln \ln (TR / TR - 1)] \quad (9)$$

Em que:

$i_{t,T}$ – intensidade da chuva, correspondente à duração t_{dc} e tempo de retorno T (mm/h);

t_{dc} – duração da chuva (min);

T – período de retorno (anos).

Para o cálculo da intensidade da precipitação de projeto, admitiu-se 10 min como sendo o tempo de concentração da sub-bacia, valor obtido por Santim e Oliveira (2007) por meio da aplicação do California Culverts Practice. O tempo de recorrência utilizado foi de 10 anos, resultado em uma intensidade de projeto de 137,34 mm/h.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning
(Fonte: Porto, 2006)

Natureza das Paredes	Condições			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014*	0,016	0,018
Alvenaria de pedra argamassa	0,017	0,020	0,025	0,030
Alvenaria de pedra seca	0,025	0,033	0,033	0,035
Alvenaria de pedra aparelhada	0,013	0,014	0,015	0,017
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,017	0,020	0,023	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,025	0,030	0,033*	0,035
Canais abertos em rocha, irregulares, ou de paredes de pedra irregulares e mal arrumadas	0,035	0,040	0,045	---
Canais leito pedregoso e vegetação aos taludes	0,025	0,030	0,035*	0,040
Canais com fundo de terra e taludes empedrados	0,028	0,030	0,033	0,035

*Valores aconselhados para projetos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio de Setzer e Porto (1979) o tipo de solo da sub-bacia foi determinado, sendo ele do tipo ABq (Arenito Bauru) e composto por 30% do grupo hidrológico A, 55% do grupo B, 10% do grupo C e 5% do grupo D. Embasado nestas quantidades pode-se chegar aos valores dos parâmetros da fórmula de Horton, sendo de 202 para o coeficiente f_0 , 15,5 para o f_f e 2 para o k . O tempo de concentração e para toda a sub-bacia foi de 14,36 min. Desta forma obteve-se como resultado o hidrograma apresentado pela Figura 10, sendo ele referente ao somatório de todos os trechos.

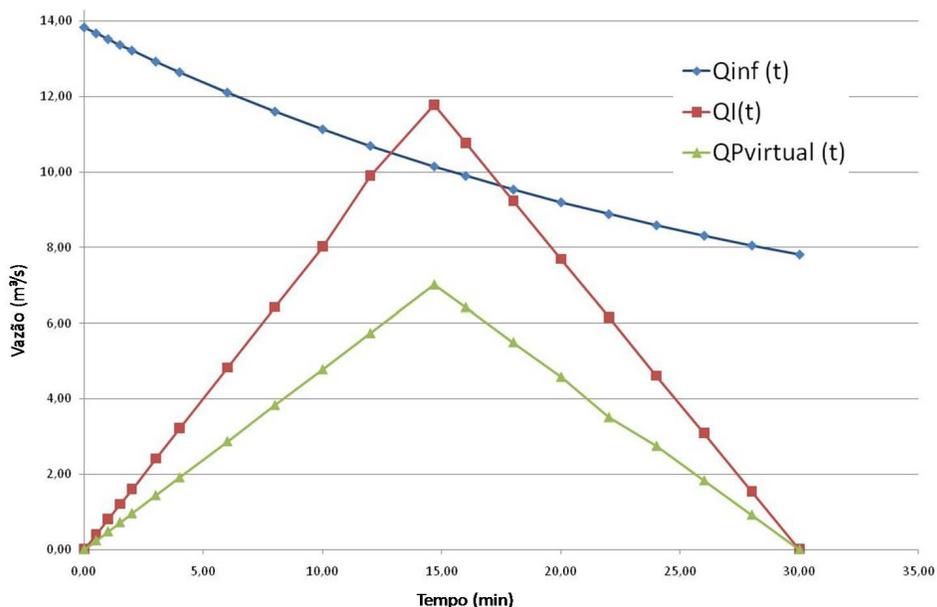


Figura 10 – Hidrograma e curva de infiltração para a sub-bacia piloto

O resultado da soma entre as vazões geradas pelas áreas permeáveis e impermeáveis subtraídas da vazão relativa à taxa de infiltração multiplicada pelas áreas permeáveis é um resultado de interpretação limitada, pois esta proposição implica em aceitar a premissa de que todas as áreas impermeabilizadas drenam para áreas permeáveis e assim a vazão das áreas impermeáveis é amortecida.

Entretanto, nem todas as áreas permeáveis recebem o escoamento das impermeáveis e assim para não perder informações demonstra-se na Figura 10 a vazão gerada pelas áreas impermeáveis ($Q_{I(t)}$), a vazão que pode infiltrar (Q_{INF}) e a vazão que poderia ser gerada pelas áreas permeáveis se o coeficiente de escoamento superficial fosse igual a 1,00, sendo esta última vazão tratada ao longo deste trabalho como sendo a vazão virtual ($Q_{P,virtual(t)}$).

Observa-se que se forem subtraídas as ordenadas ($Q_{P,virtual(t)}$) de (Q_{INF}) o valor será negativo, ou seja, o solo ainda não estará saturado. Partindo do fundamento abordado no parágrafo anterior

pode-se enunciar um ponto a ser melhorado no estudo: introduzir nas áreas permeáveis coeficientes de conectividade, estes que serão atribuídos aos *shapes* que representarem as áreas permeáveis.

Esses coeficientes de conectividade irão indicar se uma área permeável drena para uma impermeável ou para o sistema de drenagem ou ainda se recebe a contribuição de áreas impermeáveis. Por meio deste coeficiente será possível expressar no tempo o comportamento das áreas permeáveis no hidrograma o que até então neste estudo é um ponto de incerteza.

Mencionadas as limitações notadas ao final do estudo e pontuados os avanços previstos a serem realizados no futuro do modelo, volta-se às simulações com o intuito de se avaliar a flexibilidade do método. Desta forma, a carta de uso e ocupação de solo com as características atuais da sub-bacia foi substituída por uma na qual a cidade de Ilha Solteira – SP ainda não existia, ou seja, condição de pré-urbanização apresentada até meados de 1967. A Figura 12 ilustra o resultado da simulação para a condição de pré-urbanização.

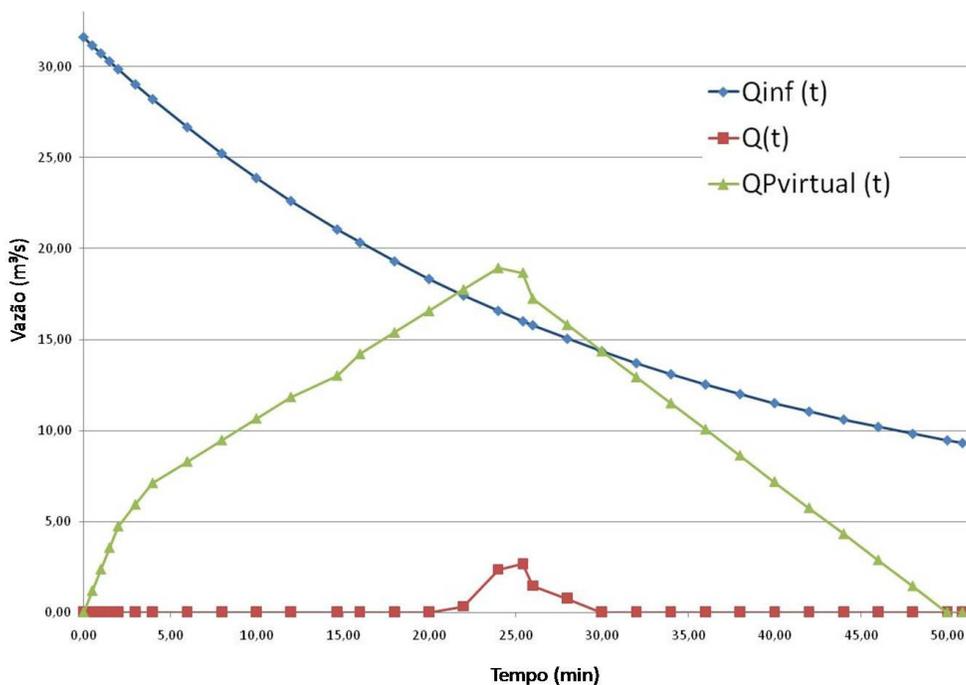


Figura 10 – Hidrograma e curva de infiltração para a sub-bacia piloto

O hidrograma em vermelho ($Q(t)$) representa a subtração entre as ordenadas do hidrograma verde ($Q_{P,virtual}(t)$) da curva da vazão que pode infiltrar (Q_{INF}).

Por meio de uma análise comparativa entre os resultados pôde-se notar um retardo de 10,76 min no tempo de pico da sub-bacia piloto, pois o tempo de concentração passaria a ser de 25,44 min. Além disto, ainda irá ocorrer uma redução na vazão de pico de 9,11 m³/s, sendo importante

ressaltar que a vazão de pico da Figura 10 não avalia o efeito da conectividade entre áreas permeáveis e impermeáveis.

Ao se utilizar a vazão de pico do hidrograma da Figura 10, a área total de drenagem da sub-bacia, sem a distinção entre área impermeável e área permeável, e a intensidade da chuva de projeto de 137,34 mm/h na Equação 1, obtém-se como coeficiente de *runoff* médio o valor de 0,89 no instante em que toda a bacia contribuiu.

Os resultados demonstram apenas uma parcela das possibilidades para simulações, sendo possível analisar efeitos localizados, tal como a implantação do controle do escoamento superficial na fonte por meio da determinação do tempo de retardo desejado e assim obter a área sujeita a infiltração a ser implantada nos lotes.

Entretanto, torna-se imprescindível destacar que estes resultados não contemplam os efeitos das chuvas antecedentes, o que, como já visto em diversas publicações: Weng (2001) e mesmo a luz de breves ponderações sobre a curva de infiltração expressa pela fórmula de Horton; pode resultar em incrementos consideráveis nas vazões.

Por fim, esses hidrogramas gerados constituem a primeira fase do dimensionamento das redes de drenagem urbana e seus equipamentos de controle, tais como reservatórios de detenção e mesmo trincheiras de infiltração, além das estruturas de dissipação de energia, tão necessárias quanto o próprio sistema de drenagem.

4. CONCLUSÕES

O estudo como apresentado neste trabalho tem por finalidade compor um sistema de controle que represente a cidade real dentro de ferramentas computacionais, ou seja, gerar uma cidade virtual que possa sofrer as mais diversas ações antrópicas e assim prevenir problemas que possam ser causados no meio urbano real, além da avaliação prévia dos efeitos de soluções adotadas.

Este trabalho não é a panacéia para os problemas de drenagem urbana, nem tinha por objetivo o ser, mas sim ser a sugestão de uma possibilidade de se utilizar as informações e os dados resultantes dos planos diretores para múltiplas finalidades fazendo uso de ferramentas computacionais como o *Microsoft Excel*, *AutoCAD* e o *ArcMap* ou *Spring*.

Por fim pode-se ressaltar que existem inúmeras possibilidades que vão além das potencialidades apresentadas neste trabalho para se tratar o legado técnico deixado pelos planos diretores municipais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de mestrado do pós-graduando Thiago Garcia da Silva Santim, ao corpo técnico da prefeitura Municipal de Ilha Solteira – SP pela liberação dos

dados e mapas e ao IPT por acolher o aluno citado no Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental (Labgeo), sob a orientação da Dr.^a Malva A. Mancuso, quando a mesma ainda não estava ligada ao LENECA.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP, 2002. Associação Brasileira de Cimento Portland. Introdução aos pavimentos intertravados. In: _____. *Curso básico de pavimentos intertravados*. São Paulo. p.1 – 27.
- CANHOLI, Aluísio Pardo, 2005. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 302p.
- DAEE, 1999. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Equações de chuvas intensas do estado de São Paulo*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. 125p.
- DEE, 2006. Museu Virtual da Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira FEIS/UNESP. Acessado em 09/2007.
- FIGUEIREDO, Ricardo Brandão, 1994. *Engenharia Social: soluções para áreas de risco*. São Paulo: Makron Books. 251p.
- IPT, 2000. *Relatório nº 40.675: Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do plano de bacia hidrográfica do rio São José dos Dourados – Relatório final*. V. 1, 2 e 3. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.
- MANGE, E. R., KATO, A., 1963. *Planejamento de Ilha Solteira: núcleo urbano*. v.1 e 2. São Paulo, 105p.
- MOTA, Suêtonio, 2003. *Introdução à engenharia ambiental*. 3 ed. Rio de Janeiro: ABES. 416p.
- PORTO, R. M., 2006. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – Universidade de São Paulo – USP, 519p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ILHA SOLTEIRA, 2007. *Plano diretor – diagnóstico*. Ilha Solteira: Técnus – Prestação de Serviço em Engenharia e Urbanismo, 294p.
- RIGHETTO, A. M., 1998. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC – Universidade de São Paulo – USP, 819p.
- RODRIGUEZ Fabrice et al., 2003. *Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks*. Journal of Hydrology 283, 146-168.
- SANTIM, T. G. da S.; OLIVEIRA, J. N., 2007. *Análise preliminar das modificações temporais do uso e ocupação do solo e sua interferência na drenagem urbana: o exemplo de Ilha Solteira*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. São Paulo/SP. Anais Eletrônicos. São Paulo: ABRH, 19p.
- SANTOS, R. F. dos et al., 2007. *Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?* Ministério do Meio Ambiente – MMA, Brasília. pp. 13-38; 59-74.

- SETZER, José; PORTO, Rubem La Laina. 1979. *Tentativa de avaliação de escoamento superficial de acordo com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do estado de São Paulo*. B. Téc. DAEE, mai/ago, pp. 82 – 135.
- TOMAZ, Plínio, 2002. *Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais*. São Paulo: Navegar Editora, 475p.
- TUCCI, C.E.M., GENZ, F., 1995. Controle do impacto da urbanização. In: TUCCI, C.E.M., *Drenagem urbana*. 1ª edição. Porto Alegre – RS: Editora da Universidade/UFRGS. Capítulo 4, p.277 – 347.
- TUCCI, Carlos E. M., MARQUES, David M. L. da M., 2000. *Avaliação e controle da drenagem urbana*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS. 558p.
- TUCCI, Carlos E. M. et al., 2001. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. 4 vol. 943p.
- VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur, 1975. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 245p.
- WILKEN, P.S., 1978. *Engenharia de drenagem superficial*. 1 ed. São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 478p.
- WENG, Qihao. (2001). *Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS*. Environmental Management Vol. 28, nº6, pp. 737-748.