

## MEDIDAS DE CONTROLE DO ESCOAMENTO URBANO ATRAVÉS DE CENÁRIOS DE PLANEJAMENTO PARA A BACIA DO ALTO TIJUCO PRETO, SÃO CARLOS-SP

*Alfredo Akira. Ohnuma Júnior*  
*Eduardo Mario Mendiondo*

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo  
Av. Trabalhador Sãocarlense, nº400. Centro. CEP 13566-590. São Carlos/SP

**RESUMO:** Este trabalho visa analisar diretrizes de controle de enchentes a partir de diferentes cenários de ocupação para simulações hidrológicas em diferentes períodos de retorno. Aplica-se uma metodologia de abordagem simplificada para a geração destes cenários de planejamento com propostas de recuperação ambiental de bacias urbanas afetadas pela ocupação desordenada. A bacia selecionada é a do Alto Tijuco Preto, situada na cidade de São Carlos/SP. São avaliadas medidas de controle do escoamento urbano a partir de classificação histórica de uso e ocupação do solo mediante 5 tipos: zona florestal, zona de baldios, zona residencial com 65% de área impermeável, zona industrial, pavimentações e arruamentos, conforme Ohnuma Jr. (2005). Simulam-se hidrológicamente cenários de ocupação sem Plano Diretor (SPD) e com Plano Diretor (CPD). Como indicadores de projeto, apresentam-se os mesmos cenários simulados, porém para diferentes períodos de retorno a partir de Barbassa (1991). Os resultados demonstram deficiência no sistema atual da macro-drenagem, sendo que a longo prazo, a região pode sofrer problemas sérios de inundações com o aumento da impermeabilização e ocupação de áreas ribeirinhas. Recomenda-se a partir das conclusões do trabalho: discutir novas metodologias de simulações hidrológicas, abordar novos critérios de classificação de uso e ocupação do solo urbano, dimensionar as seções para projeto na macrodrenagem e ampliar o horizonte de discussões visando à redução das incertezas hidrológicas em bacias sem dados conforme o Programa PUB apresentado por Sivapalan et al (2003).

**Palavras-chave:** controle do escoamento urbano, cenários de planejamento, recuperação ambiental de bacias hidrográficas, Micro-Bacia do Alto Tijuco Preto.

### INTRODUÇÃO

O aumento da impermeabilização do solo decorrente da crescente ocupação urbana tende a favorecer a ocorrência das inundações urbanas. O caminho percorrido pelas águas da chuva em áreas urbanas não-planejadas gera uma série de conflitos e problemas ambientais, desde aqueles relacionados à poluição de rios, córregos e mananciais, como outros mais graves relacionados à saúde pública. Este incremento de novas áreas impermeáveis agrava os problemas de ordem estrutural do sistema de drenagem.

Quando bem distribuídas e implementadas em conjunto com outras medidas de caráter não-estrutural, a aplicação de medidas de controle do escoamento urbano na micro e macro-drenagem permite reduzir os passivos ambientais na bacia. Os sistemas estruturais alternativos e de grande validade para o combate às cheias são estudados e analisados pelos pesquisadores hidrológicos e ambientais há algum tempo. Dentre eles

encontra-se o sistema de aproveitamento de águas pluviais, onde por meio de uma simples captação das águas da chuva provenientes do telhado, pode-se aproveitar para o abastecimento humano, de forma potável ou não. Aplicar o reflorestamento em áreas livres ou a recomposição de mata ciliar com extratos arbóreos próximos de 3 metros de altura, conforme FIPAI/PMSC (2003,) além de proteger áreas de mananciais e facilitar a interceptação das partículas de água, favorece o espaço para áreas de descanso e lazer. O encontro de alternativas para a redução do volume de escoamento superficial nas margens dos córregos e mananciais, associado a políticas públicas de conscientização e educação ambiental, auxilia tanto no crescimento sustentável das cidades, bem como na valorização do espaço urbano.

Este trabalho visa avaliar as diretrizes de controle do escoamento urbano da bacia do Alto Tijuco Preto, São Carlos-SP, a partir de cenários sem Plano Diretor e com Plano Diretor. Objetiva discutir também indicadores de projeto conforme estudo para diferentes períodos de retorno a partir dos cenários de ocupação propostos.

## METODOLOGIA

A partir da seleção da bacia de intervenção, é realizado o diagnóstico ambiental e o levantamento de áreas degradadas mediante visitas e classificação de uso do solo em diferentes situações temporais. A caracterização da área determina zonas de intervenção que permitem inserir medidas de controle e de recuperação ambiental para a bacia em questão. A transferência do armazenamento é estimada pelo índice que verifica a condição de permeabilidade do solo a partir da curva número ou *CN*.

### Definição da bacia

A seleção da bacia do Alto Tijuco Preto (ATP), São Carlos/SP, é definida pelo elevado déficit ambiental anual da ordem de 1 milhão de dólares, segundo FIPAI / PMSC (2003), incluindo a contaminação do Aquífero-Guarani. PMSC (2004) indica que as nascentes desta bacia estão comprometidas com lançamentos de esgoto in natura e a drenagem do sistema está insuficiente para atender a demanda necessária.

Esse quadro de passivo ambiental, associado ao cumprimento legal de um Termo de Ajustamento de Conduta – TAC - imperiado pelo Ministério Público do município demonstra a necessidade de se propor diretrizes de intervenção na bacia capazes de mitigar os efeitos do crescimento urbano indesejado. A execução do projeto técnico Protijuco (FIPAI/PMSC, 2003) intitulado “*Projeto de Recuperação das Várzeas do Alto Tijuco Preto visando o Plano Diretor na sua bacia hidrográfica*” propõe análise de cenários de recuperação ambiental em diferentes esferas: educação ambiental, drenagem urbana, florestal, biológica, paisagismo, urbanística e aspectos legais.

Parte integrante de uma das principais bacias do Estado de São Paulo, correspondente a bacia afluente do Rio Jacaré-Guaçú, que por sua vez pertence à bacia do Rio Tietê, a bacia do Tijuco Preto possui área totalmente inserida no contexto urbano. A bacia do ATP possui área de 231 hectares ou 60% do total da área da bacia, que é calculado aproximadamente em 390 hectares. O comprimento do talvegue principal é de 1.600 metros, incluso desvios por faixas de aterro e corte ocasionados por ocupação em APP.

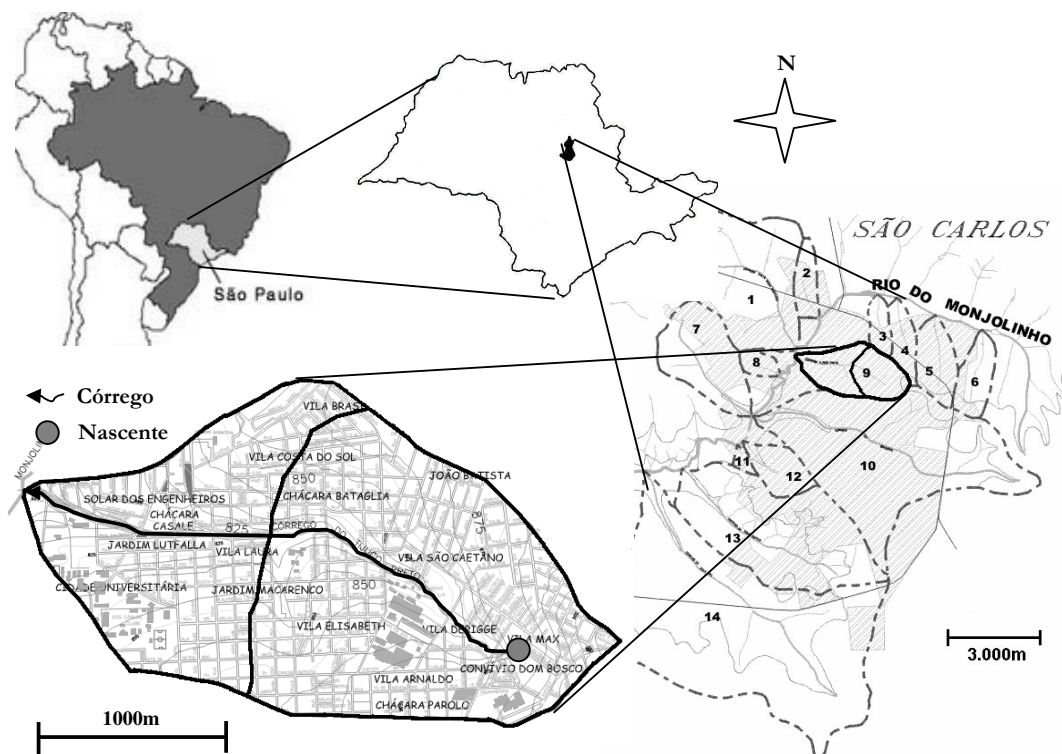


Figura 1 – Localização da bacia do Alto Tijuco Preto, São Carlos/SP.

Conforme dados do projeto Protijuco (FIPAI/PMSC, 2003), a bacia do ATP contém uma população estimada no ano corrente em torno de 12.587 habitantes, entre homens, mulheres, crianças e idosos(as) divididos em 4.859 residências. Adaptados de dados do PNUD (2003), Mendiando et al (2004) obtém uma renda anual para os moradores da bacia superior a 20 milhões de dólares. Característica que classifica a bacia como sendo de alto poder aquisitivo, uma vez que a renda per capita ultrapassa a faixa de 5 salários mínimos.

### Uso e ocupação do solo urbano

Ohnuma Jr. (2005), a partir de classificação histórica retrospectiva de até 40 anos, discute o processo de ocupação na bacia com resultados que indicam um acréscimo de áreas impermeáveis de 33,1% no ano de 1962 para 75,4% no ano de 1998. O aumento destas áreas ocorre por conta do processo de desenvolvimento urbano acelerado que, associado ao crescimento populacional, facilitou a ocupação de áreas residenciais, comerciais e industriais.

A tabela a seguir apresenta historicamente os valores de ocupação e uso do solo para os anos de 1962, 1972 e 1998 a partir de áreas residenciais, industriais, arruamentos, baldios e florestas. No decorrer do avanço urbano para as áreas periféricas, novas áreas são desmatadas e o uso de vazios urbanos para a ocupação de áreas residenciais e comerciais tende a especulação imobiliária.

Tabela 1 – Evolução histórica de uso e ocupação do solo urbano para a bacia do ATP, São Carlos/SP.

Uso / Cenário	1962	1972	1998
<b>Zona residencial</b>	17,7%	28,7%	50,8%
<b>Zona florestal</b>	9,9%	5,6%	6,9%
<b>Baldio em boas condições</b>	57,0%	48,1%	17,7%
<b>Zona industrial</b>	4,8%	5,5%	6,6%
<b>Arruamento</b>	10,6%	12,1%	18,0%

A zona de ocupação das áreas urbanas se estende na direção dos bairros periféricos que se encontram ambientalmente fragilizados devido à falta de critérios de planejamento que possam controlar a ocupação em áreas de risco. Evidentemente, APP's (áreas de proteção permanente) sofrem o esmagamento provocado por construções irregulares ambientalmente.

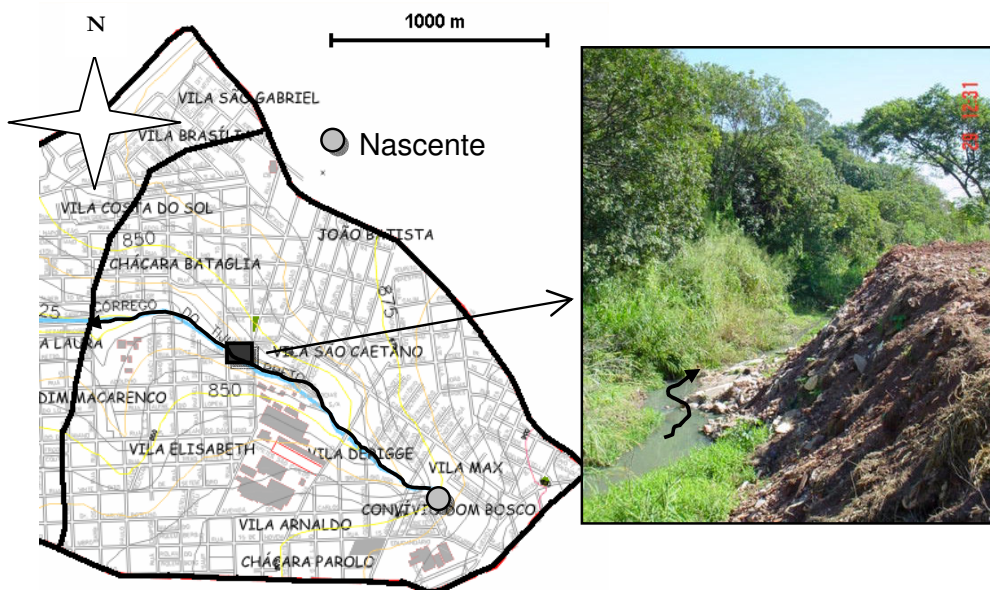


Figura 2 – Volume de aterro e afunilamento de passagem do rio devido ocupação em APP (Ohnuma Jr., 2005).

Ohnuma Jr. (2005) reforça que a inexistência de um sistema de planejamento adequado e eficiente para o controle do uso do solo através de um Plano Diretor favorece a presença de ocupações irregulares, como a localizada junto ao bairro Chácara Bataglia, onde uma fábrica de pré-moldado está instalada no local com despejo de resíduos sólidos de construção e esmagamento do talvegue.

### Medidas de controle do escoamento urbano para cenários de intervenção

As medidas propostas para o controle do escoamento urbano referem-se às obras intervenientes de engenharia capazes de reduzir o risco das enchentes. Elas modificam as relações entre precipitação e vazão, bem como aumentam a capacidade de descarga dos rios e corte de meandros. Possuem também capacidade para retardar e/ou desviar o escoamento.



Embora consideradas medidas de caráter estrutural, elas se apresentam associadas às outras medidas preventivas, a fim de assegurar economicamente os diversos riscos a população.

Na macro-drenagem propõe-se reativar o reservatório de retenção da R. Miguel Giometti, abertura de canal e aplicação de engenharia naturalística nos trechos em aterro, incremento de área para arborização nas ruas e vias marginais, reflorestamento de espécies nativas nas áreas de proteção ambiental e execução de reservatórios de filtragem.

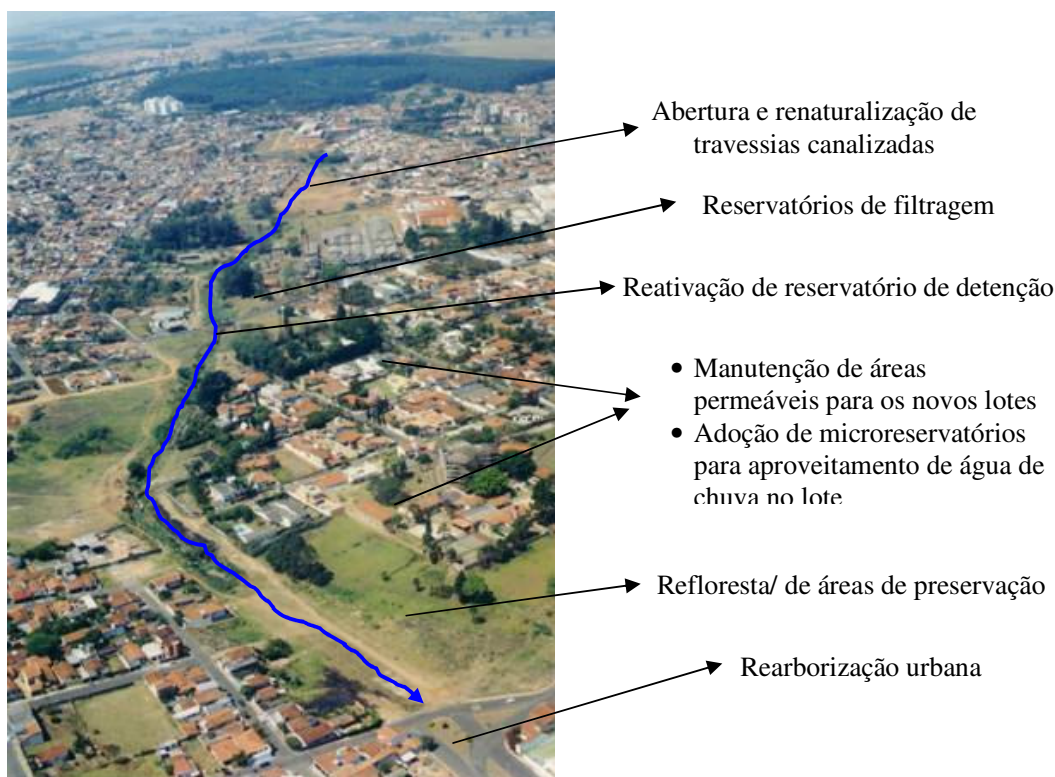


Figura 4 – Vista perspectiva da bacia do ATP e intervenção sugerida.

O controle da cobertura vegetal através da manutenção de áreas permeáveis interfere no processo chuva-vazão, pois segundo Tucci (2001), este processo é capaz de reduzir as vazões máximas devido o amortecimento do escoamento.

A adoção de áreas de reflorestamento, apesar de envolver um custo relativamente elevado, é definida como uma das principais ações para a recomposição de parte das áreas de fundo de vale, contribuindo para o controle da erosão do solo. Estimam-se aproximadamente 41 mil m<sup>2</sup> de área potencial para ser reflorestada, principalmente nas áreas públicas. A produção de matas ciliares, além de conter o escoamento das águas da chuva, torna-se como elemento de contribuição para entrar no mercado de créditos de carbono, sistema que é previsto no Protocolo de Kyoto, conforme Amorim (2004). A Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo, por exemplo, pretende utilizar as matas ciliares do Estado como medida de inserção dos créditos de carbono em um projeto avaliado em 7 milhões de dólares.

A proposta de aplicar microreservatórios embutidos no lote urbano discute o uso para abastecimento humano através do aproveitamento de águas pluviais. Possui capacidade

de armazenamento de acordo com a área do telhado, podendo variar entre 1 a 5m<sup>3</sup> de volume. As simulações hidrológicas para o planejamento urbanístico deste trabalho foram feitas utilizando microreservatórios com capacidade para armazenamento de 1m<sup>3</sup>. Ao longo da bacia aproveitaram-se às áreas de fundo de vale para a aplicação de reservatórios de filtragem, manutenção, limpeza e distribuição controlada das águas da chuva. Ao todo foram distribuídos 18 desses reservatórios com dimensões de 3x3x3m e situados sob as ruas transversais que se encontram junto ao canal. O dimensionamento das unidades dos reservatórios refere-se ao estudo de projeto vide FIPAI/PMSC (2003). O reservatório para contenção de cheia possui área em planta estimada em 1.500 m<sup>2</sup> com capacidade para armazenar aproximadamente 1.300 m<sup>3</sup> de volume com cota de 2 metros de altura aproximadamente nas partes mais altas. Uma das principais justificativas para sua aplicação está na disponibilidade da área e localização, além de contribuir para a preservação de áreas livres públicas no local.

### **Composição de cenários de planejamento: CPD e SPD**

Döll et al (2000) relaciona a análise integrada de sistemas e a geração de cenários como ferramenta para o planejamento regional sustentável. A combinação de conhecimentos a respeito das situações atuais potencializa a capacidade de transferência de resultados de forma transparente e compreensível.

A estrutura deste trabalho elabora cenários ambientais em duas situações distintas de ocupação ou “degradação urbana”, a primeira através da implantação do Plano Diretor (CPD) e a segunda como cenário de tendência sem Plano Diretor (SPD).

A extensão temporal utiliza cenários retrospectivos de 40 e 30 anos (1962 e 1972 respectivamente) e cenários prospectivos de 10 anos (2015). O cenário prospectivo representa cenários futuros espaçados de 5 anos (2010 e 2015). Estes cenários classificam-se em: cenários de intervenção (CPD) e de tendência (SPD). Os cenários de tendência SPD definem ocupações desordenadas e sem controle, enquanto que os cenários de intervenção CPD incluem o Plano Diretor através de critérios técnicos de recuperação ambiental da bacia. Os cenários CPD são os descritos anteriormente com diretrizes atuantes no córrego e na bacia.

A seguir apresentam-se as considerações para os cenários SPD:

- a) fechamento e canalização por condutos fechados ao longo do córrego não canalizado com proposta de prolongamento da marginal entre as ruas Monteiro Lobato e Rui Barbosa;
- b) ocupação por parte dos novos lotes pré-matriculados sem a adoção do coeficiente de permeabilidade, isto é, utilização de revestimentos não-permeáveis em todos os novos lotes;
- c) ampliação de novas áreas residenciais em áreas de baldios e florestas;
- d) redução de 50% das áreas permeáveis de florestas em relação ao cenário atual do ano 2005;
- e) acréscimo ou extensão de áreas impermeáveis em arruamentos de vias marginais e
- f) ocupação total das áreas de preservação permanente por construções residenciais ou vias marginais.

### **Simulação hidrológica a partir do modelo IPHS-1**

O modelo adotado para a realização das simulações hidrológicas ao longo da bacia do ATP foi o IPHS-1. Trata-se de um modelo computacional de fácil manipulação, compatível com o sistema operacional WINDOWS (interface) e com acesso às

informações ou programadores para as rotinas fontes, que podem ser, eventualmente, adaptados conforme o sistema de modulação e requerimento específicos (IPH-UFRGS/ALM/FEA/IMF, 2003).

O sistema possui opções hidrológicas do tipo: escoamento em rios, propagação em reservatórios, transformação chuva-vazão na bacia e derivação de hidrogramas.

Para a entrada de dados no módulo bacia a precipitação seqüencial foi a fornecida pelo usuário. A separação do escoamento teve como método as relações funcionais da curva-número do SCS e escoamento superficial através do hidrograma unitário triangular do SCS.

O escoamento em rios teve como propagação o modelo Muskingum-Cunge Linear e Muskingum-Cunge não-linear para casos de condutos fechados, situados nas seções de travessias ou para cenários de tendência de canalização por condutos.

A aplicação do reservatório situado junto à rua Miguel Giometti visando o cenário CPD utiliza o método de Puls. O algoritmo do modelo oferece: as características das estruturas de saída de água (vertedouros e orifícios) ou diretamente a vazão de saída, as operações de comportas e by-pass que permite a simulação de reservatórios do tipo off-line.

A mudança de determinadas estruturas para se compor os cenários de tendência foi ampliada para além dos aspectos inerentes ao método de propagação do escoamento na bacia do tipo SCS. Como o modelo IPHS-1 é um sistema computacional modulado que permite ao usuário escolher determinadas combinações de algoritmos, as simulações hidrológicas realizadas possibilitam diferentes combinações na propagação do escoamento no rio em vista dos diferentes cenários ambientais.

No cenário SPD, o processo de tomada por parte das ocupações ao longo das áreas de fundo de vale, prevê que os trechos existentes do arroio se transformem em canalização por condutos fechados com seção circular para áreas de aterro. Evidentemente, as condições hidráulicas foram afetadas e a rugosidade do trecho que antes tinha efeito natural, agora passou a trabalhar como sendo de concreto armado. Apenas o trecho que interliga a nascente até as proximidades da rua Monteiro Lobato é que se manteve em suas condições naturais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados indicam que as condições atuais do sistema de macro-drenagem analisado (montante: seção Totó Leite para jusante: seção Rui Barbosa) possui trechos insuficientes para receber o escoamento e atender as necessidades de drenagem a longo prazo. Chuvas de projeto com período de retorno de 50 anos extrapolaram a capacidade limite do canal em até 8 (oito) vezes, devido o processo acelerado de urbanização de jusante para montante com áreas de aterro e fechamento de canalização por condutos fechados.

Nas simulações realizadas são definidos exutórios mediante aplicação de bacias embutidas (Mendiondo & Tucci, 1997). A figura 5 apresenta os hidrogramas a partir das seções das ruas: (1) Totó Leite, (2) Miguel Giometti, (3) Rodrigues Cajado e (4) Rui Barbosa, conforme os cenários SPD e CPD e chuvas projetadas para Tr de 3, 20 e 50 anos.

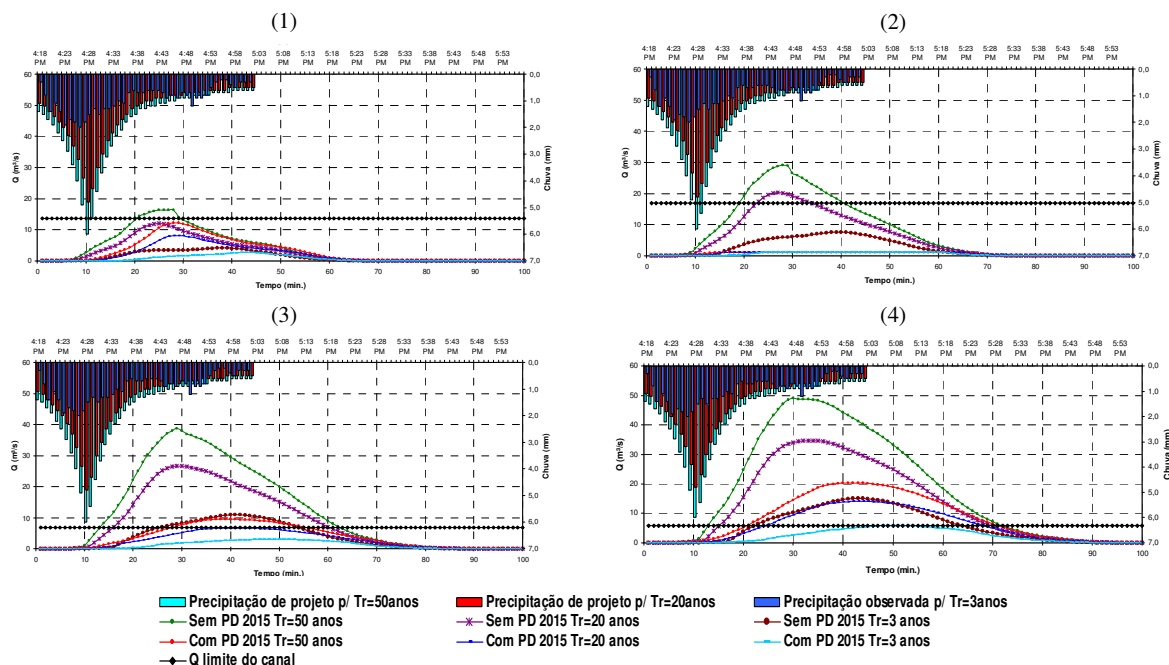


Figura 5 – Hietogramas observado e de projeto para simulações em diferentes cenários. SPD: Sem Plano Diretor, CPD: Com Plano Diretor.

Para todas as seções (1), (2) e (3) as medidas de controle do escoamento propostas nos cenários intervenientes ou CPD foram capazes de suportar a vazão limite no canal, exceto para a “última” seção de jusante situada junto à rua Rui Barbosa (4).  $Tr$ 's de 20 e 50 anos excedem o limite de escoamento. O cenário CPD com  $Tr$  de 50 anos necessita uma capacidade de escoamento de  $20,36 m^3/s$ , enquanto que a capacidade de suporte do canal decaiu de  $13,61 m^3/s$  na seção da rua Totó Leite (1) para  $5,91 m^3/s$  na rua Rui Barbosa (4) devido o estrangulamento da seção do canal neste trecho ocasionado por aterro e erosões, que também tendem a desviar os trechos naturais.

Os hietogramas de projeto simulados adotam a chuva de São Carlos/SP, conforme Barbassa (1991). O estudo da bacia do ATP integra parte das bacias urbanas sem dados com o intuito de fortalecer e incentivar o valor das previsões hidrológicas através do programa PUB (Sivapalan et al, 2004).

## CONCLUSÃO

Em vista do crescimento urbano de forma acelerada e dos seus impactos gerados, verifica-se o incremento de áreas impermeáveis e descaso ambiental. A metodologia de classificação de uso e ocupação do solo em conjunto com a proposta de medidas de controle do escoamento urbano apresenta resultados de projeto para cenários de recuperação ambiental. A adoção de medidas de controle, quando bem planejadas, é capaz de reduzir as vazões máximas em até 4 (quatro) vezes, porém não atende a capacidade de escoamento no canal para trechos onde não há intervenções estruturais diretas.

O estudo para precipitações de projeto indica possíveis “interferências” no sistema pluvial com potencial de ocorrência de inundações, uma vez que .



## RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados e conclusões apresentadas, recomenda-se: (a) abordar novas metodologias para elaboração de cenários de planejamento; (b) realizar novas simulações a partir de novos modelos hidrológicos; (c) dimensionar as seções para projeto de canais e verificar a capacidade limite dos trechos e (d) ampliar o horizonte de discussões para facilitar o entendimento hidrológico visando à redução das incertezas para o programa de Previsão de Bacias Sem Dados – PUB (SIVAPALAN et al, 2004).

**Agradecimentos:** ao convênio FINEP-CT-HIDRO/EESC-USP/DAEE-SP nº 01.02.0096.00 “Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos” e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) pelo auxílio à pesquisa e desenvolvimento dos trabalhos. CNPq 301491/2003-8 (PQ): “Sistema de alerta antecipado de Cheia como Estratégia da Bacia Escola para Gerenciamento Ambiental Integrado da Águas Urbanas”. CNPq 142535/2004-4 (CT-Hidro, Doutorado): “*Desenvolvimento e análise de dispositivos de controle da poluição através de micromedição e reúso de águas pluviais associado à conservação da água em lote domiciliar*”.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, C. (2004). Mata ciliar pode virar nova moeda em mercado de crédito de carbono. Folha de São Paulo, São Paulo, 31 ago. Folha Ciência, p. A 14.
- BARBASSA, A. P. (1991). Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos/SP. 327 p. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP. 1991.
- DÖLL, P. et al (2000). Desenvolvimento de Cenários como uma Ferramenta para o Planejamento Regional. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Alemanha. Material para o Workshop SRH-WAVES para cenários conjuntos em Ceará. 7p.
- FIPAI / PMSC (2003). Fundação para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial / Prefeitura Municipal de São Carlos. Protijucu - Projeto de Recuperação Ambiental das Várzeas do alto Tijucu Preto visando o Plano Diretor na sua Bacia Hidrográfica. Contrato Administrativo N° 019/2003.
- IPH-UFRGS/ALM/FEA/IMF (2003). Manual de Fundamentos. IPHS-1 para Windows, Versão 2.11, IPH-UFRGS, Porto Alegre, RS.
- MENDIONDO, E. M. et al (2004). Metodologia Simplificada de Cenários de Planejamento para Recuperação Ambiental de Bacias Urbanas. In: XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro/SP. Outubro, 2004. 10p.
- MENDIONDO, E. M., TUCCI C. E. M. (1997). Escalas Hidrológicas. III: Hipótese integradora de processos na bacia vertente. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, Porto Alegre, V. 2, n.1, jan-jun/1997, p. 57-122.
- OHNUMA JR., A. A. (2005). Cenários de reúso de água pluvial e controle da drenagem visando a recuperação ambiental da micro-bacia do Alto Tijucu Preto, São Carlos/SP. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, fev. 2005. 190p.
- PMSC – Prefeitura Municipal de São Carlos (2004). Plano Diretor de São Carlos I: Diagnóstico da Cidade, Proc. 2146 /03, Proj. Lei 215, Câmara Municipal de São Carlos.

- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2003). Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil. V.1.0.0. ESM Consultoria. CD-rom.
- SIVAPALAN, M.; FRANKS, S.; KARAMBIRI, H.; LAKSH, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J.; MENDIONDO, E. M.; OKI, T.; POMEROY, J.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK (2003). International Association of Hydrological Sciences - Predictions in Ungauged Basins (IAHS/PUB). Década da IAHS sobre Previsões em Bacias Sem Dados (PUB): 2003-2012, Plano Científico e de Implementação do PUB, Penúltimo Plano para Discussão (versão 4). Versão em português, nov. 2003.
- TUCCI, C. E. M. (2001). Hidrologia: Ciência e Aplicação. UFRGS. 2ª ed. Porto Alegre. ABRH. 943p
- \_\_\_\_\_. (2001). IPHS-1 para Windows- Manual de Fundamentos. Cópia Preliminar versão Beta 1.51. UFRGS – IPH / ALM – FEA – IMF - UFPel. 48p.