

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

RAQUEL NOGUEIRA RIZZOTTO FALCÃO

**GERAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE CHEIAS EM BACIAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE
URBANIZAÇÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SP.**

São Carlos

2016

RAQUEL NOGUEIRA RIZZOTTO FALCÃO

**GERAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE CHEIAS EM BACIAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE
URBANIZAÇÃO NO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS, SP.**

Monografia apresentada ao curso de
graduação de Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F178g Falcão, Raquel Nogueira Rizzotto
Geração de hidrogramas de cheias em bacias com
diferentes níveis de urbanização no município de São
Carlos, SP / Raquel Nogueira Rizzotto Falcão;
orientador João Luiz Boccia Brandão. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2016.

1. Inundações. 2. Sistemas de informações
geográficas. 3. ABC 6. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Raquel Nogueira Rizzotto Falcao**

Data da Defesa: 24/10/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

João Luiz Boccia Brandão (Orientador(a))

11 Aprovada

Marcelo Zaiat

Aprovada

Edson Cezar Wendland

Aprovada

Victor Eduardo Lima Ranieri

Aprovada



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Dedico esse trabalho a minha família.

*“Entre o martelo e a bigorna somos um ferro em brasa que
de tanto lhe baterem se apaga”*

José Saramago

*O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta
e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois
desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. O que a
vida quer é ver a gente aprendendo a ser capaz de ficar
alegre a mais, no meio da alegria, e inda mais alegre no
meio da tristeza. A gente principia as coisas, no não saber
por que, e desde aí perde o poder de continuação porque
a vida é mutirão de todos, por todos remexida e
temperada. O mais importante e bonito do mundo é isto:
que as pessoas não estão sempre iguais, ainda não foram
terminadas, mas que elas vão sempre mudando. Afinam
ou desafinam. Verdade maior.*

Guimarães Rosa

AGRADECIMENTOS

À população do Estado de São Paulo, por custear um ensino superior de qualidade e à população de São Carlos por ter me acolhido durante todos esses anos.

Aos meus pais, por sempre superarem as distâncias geográficas e por terem sido tão presentes em todos os momentos da minha vida. Por terem me dado asas para voar me dando sempre a certeza de que eu posso sempre voltar para o ninho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Boccia Brandão, pela oportunidade que me deu de fazer Iniciação Científica e poder aprender e me encantar com a área de hidrologia. Que ele descanse em paz, reunido com as suas águas.

Aos professores da Engenharia Ambiental, em especial Wiclef, Victor, Reali e Zaiat, por acreditarem no nosso curso e por darem seu melhor dentro e fora de sala de aula. Vocês foram um exemplo de competência e integridade. Ao professor Edson por tão prontamente ter aceitado meu convite de compor a banca.

À Loide, por toda a ajuda e disponibilidade durante a realização do trabalho.

À querida família da ambiental, em especial a Amb011, por todos os momentos, todos os aprendizados, pela partilha dos sonhos e dos anseios. Obrigada por me ajudarem a crescer e amadurecer e por ter compartilhado comigo essa linda fase de nossas vidas. A convivência com vocês me fez melhor e vai continuar fazendo a toda vez que eu lembrar de vocês.

Ao meu querido Danilo, tão companheiro durante os últimos dois anos, pela paciência e suporte em todos os momentos.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

FALCÃO, R.N.R. **Geração de hidrogramas de cheias em bacias com diferentes níveis de urbanização no município de São Carlos, SP.** 2016. 69p. Monografia (TCC) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O Brasil, assim como muitos países em desenvolvimento, apresentou um rápido e desordenado processo de urbanização. Esse fenômeno deu origem a cidades sujeitas a enchentes, que ocorrem todos os anos em diversas cidades brasileiras. Além dos consequentes danos materiais ocasionados pelas enchentes, há também a questão da saúde pública, que fica comprometida devido às doenças de veiculação hídrica. A aparente abundância de água sugerida pelas inundações é incompatível com a crise de escassez hídrica que ainda castiga o Estado de São Paulo. A resposta para essa questão está na gestão adequada dos recursos hídricos, o que não tem sido feito pelo poder público nos últimos anos. Ferramentas como o software ABC6 desenvolvido pela Escola Politécnica de São Paulo e Sistemas de Informação Geográfica, aliadas a um planejamento urbano adequado, tornam possível realizar prognósticos, o que pode auxiliar o poder público na tomada de decisões de forma a evitar a ocorrência de enchentes, diminuindo assim os custos sócioeconômicos a elas associados. Neste trabalho, aplicou-se o processo de classificação supervisionada a uma imagem de satélite de alta resolução da cidade de São Carlos para três bacias hidrográficas com diferentes níveis de urbanização, para assim caracterizar o uso e ocupação referente a cada uma e determinar o número de deflúvio ou *Curve Number* (CN, pelo método do SCS), sua área e o comprimento dos talwegues. Por fim, com os dados das bacias em mãos, utilizou-se o software ABC6, desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, obtendo-se hidrogramas de cheias para eventos de chuva com diferentes tempos de retorno. Foi observada a forte relação entre o tempo de concentração das bacias e seu número de deflúvio com o potencial de produção de cheias, aspecto importante a ser considerado na gestão de recursos hídricos em pequenas bacias urbanas, assim como no planejamento do uso e ocupação do solo nessas bacias. Foi possível observar que um maior valor de CN está associado a uma maior vazão de pico bem como a um menor tempo de pico, além de corresponder também a um maior volume escoado. O tempo de concentração da bacia também está associado a resposta hidrológica, sendo que quanto menor o tempo de concentração, mais sujeitas a enchentes estão as bacias.

Palavras-chave: Inundações. Sistemas de informações geográficas. ABC6.

ABSTRACT

FALCÃO, R.N.R. **Generation of flood hydrographs in urban basins with different levels of urbanization in São Carlos, SP.** 2016. 69p. Monografia (TCC) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Brazil, as well as other developing countries, had a rapid and turbulent process of urbanization. This phenomenon gave rise to cities subject to floods, which occur every year throughout Brazilian cities. Besides the economical consequences of floods, there is also the matter of public health, which gets compromised due to waterborne diseases. The seeming water abundance suggested by floods is incompatible with the water crises that still occurs in the State of São Paulo. The answer to that dilemma lies within the deficient management of water resources that has been taking course over recent years. Tools like the ABC6 software developed by the Polytechnic School of São Paulo as well as Geographic Informational Systems combined with an adequate urban planning make it possible to make prognostics, which can aid governments when making decisions, thus avoiding the occurrence of floods, decreasing the socio-economic costs associated with them. In this work it was applied the classification process to a high resolution satellite image of the city of São Carlos for three basins with different levels of urbanization, in order to determine the *Curve Number* (CN of the SCS method), as well as hydraulic parameters such as area of drainage and river length. Finally, all these parameters were used as input on the ABC6 software and it was possible to obtain flood hydrographs for simulated rains of different return periods. It was possible to observe the strong relation of concentration times of the basins and their CN number with their potential to produce floods, which is an important aspect to consider in the management of water resources in small urban basins, as well as urban planning policies. A higher CN value is associated with a larger flow and an anticipation of the peak flow, as well as with a higher drained volume of rainfall. The concentration time is also associated with the hydrological response: the smaller the concentration time, the more vulnerable to floods is the basin.

Keywords: Floods. Geographic Informational systems. ABC6.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Relação entre área urbanizada acumulada e ocorrência de inundações e alagamentos em São Carlos - SP | 20 |
| Figura 2: Hidrogramas hipotéticos..... | 20 |
| Figura 3: Imagens com resoluções espaciais de 2,4m (A) e 0,52m (B)..... | 27 |
| Figura 4: Imagem com resolução de 4 bits representada em DN e em níveis de cinza | 27 |
| Figura 5: Diferença de resolução radiométrica em área urbana na região nordeste da cidade de São Paulo | 28 |
| Figura 6: Exemplo de mapa de uso e ocupação do solo..... | 29 |
| Figura 7: Topografia da área das bacias Gregório, Tijuco Preto e Mineirinho | 36 |
| Figura 8: Imagem fusionada da área..... | 37 |
| Figura 9: Rede de drenagem gerada para a bacia hidrográfica do córrego do Gregório, com detalhe para subbacia urbanizada estudada..... | 38 |
| Figura 10: Rede de drenagem gerada para a bacia do córrego do Mineirinho | 39 |
| Figura 11: Rede de drenagem gerada para a bacia do córrego do Tijuco-Preto | 40 |
| Figura 12: Exemplo da criação de training samples sobre área de telhado de barro | 41 |
| Figura 13: Detalhe para exemplo da criação de <i>training samples</i> sobre área de vegetação arbórea..... | 41 |
| Figura 14: Identificação dos solos que compõem a área de estudo | 42 |
| Figura 15: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego Gregório..... | 45 |
| Figura 16: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego do Mineirinho .. | 46 |
| Figura 17: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego do Tijuco-Preto | 46 |
| Figura 18: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Mineirinho | 47 |
| Figura 19: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Tijuco-Preto | 48 |
| Figura 20: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Gregório ... | 48 |
| Figura 21: Resultado da classificação supervisionada para a subbacia urbanizada do córrego do Gregório..... | 49 |
| Figura 22: Detalhe para a classificação da bacia do córrego do Mineirinho | 49 |
| Figura 23: Hidrograma gerado para a sub-bacia do córrego do Gregório para tempo de retorno igual a 10 anos | 52 |
| Figura 24: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 2 anos calculado pelo software ABC6..... | 53 |
| Figura 25: Vazões específicas máximas para as três bacias estudadas em função do tempo de retorno | 53 |
| Figura 26: Volume escoado (m ³) nas bacias do córrego do Mineirinho, do Tijuco-Preto e da sub-bacia do córrego do Gregório para os diferentes tempos de retorno..... | 55 |
| Figura 27: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 5 anos calculado pelo software ABC6..... | 75 |
| Figura 28: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 10 anos calculado pelo software ABC6..... | 75 |
| Figura 29: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 25 anos calculado pelo software ABC6..... | 76 |
| Figura 30: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 50 anos calculado pelo software ABC6..... | 76 |
| Figura 31: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 100 anos calculado pelo software ABC6..... | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características e aplicações das bandas de imagens de satélite LANDSAT..... | 26 |
| Tabela 2: Formulações de Tempo de Concentração presentes no ABC6 | 34 |
| Tabela 3: Áreas correspondentes a cada uma das classes propostas para as bacias estudadas | 50 |
| Tabela 4: Número de deflúvio para cada tipo de cobertura | 51 |
| Tabela 5: Valores de CN para áreas urbanas | 64 |
| Tabela 6: Valores de CN para áreas agrícolas..... | 65 |
| Tabela 7: Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas..... | 66 |
| Tabela 8: Matriz de confusão gerada para classificação do córrego do Tijuco-Preto..... | 72 |
| Tabela 9: Matriz de confusão gerada para classificação do córrego do Gregório..... | 72 |
| Tabela 10: Matriz de confusão gerada para a classificação do córrego do Mineirinho | 73 |

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução..... | 15 |
| 2. Objetivos..... | 17 |
| 3. Revisão Bibliográfica | 19 |
| 3.1 O processo de urbanização e seus impactos | 19 |
| 3.2 Sistemas de drenagem urbana e sua evolução | 21 |
| 3.3 Legislação vigente | 23 |
| 3.4 Sistemas de Informação Geográfica | 24 |
| 3.4.1 Resolução das imagens de satélite | 25 |
| 3.5 Classificação de imagens de satélite | 28 |
| 3.5.1 Classificação não -supervisionada | 30 |
| 3.5.2 Classificação supervisionada | 30 |
| 3.6 Sistemas de Suporte à Decisão aplicados em estudos hidrológicos..... | 30 |
| 3.6.1 Vazões máximas com base em transformação chuva-vazão | 31 |
| 3.6.2 Cálculo da precipitação excedente..... | 32 |
| 3.6.3 Cálculo do Tempo de Concentração (Tc)..... | 33 |
| 4. Materiais e Métodos | 35 |
| 4.1 Materiais Utilizados | 35 |
| 4.1.1 Imagem de satélite..... | 35 |
| 4.1.2 Software ArcGIS10..... | 35 |
| 4.1.3 Software – ABC6..... | 36 |
| 4.1.4 Dados topográficos..... | 36 |
| 4.2 Métodos | 37 |
| 4.2.1 Fusão das imagens multiespectral e pancromática..... | 37 |
| 4.2.2 Geração dos corpos d'água a partir do HydroTools | 37 |
| 4.2.3 Classificação Supervisionada | 40 |
| 4.2.4 Determinação do valor do número de deflúvio (CN) para cada bacia | 41 |
| 4.2.5 Determinação do Tempo de Concentração Tc | 43 |
| 4.2.6 Outros parâmetros hidrológicos obtidos por meio de geoprocessamento | 43 |
| 4.2.7 Determinação de parâmetros do software ABC6..... | 43 |
| 5. Resultados e Discussão | 45 |
| 5.1 Mapas temáticos de uso e ocupação | 45 |
| 5.1.1 Classificação não-supervisionada | 45 |
| 5.1.2 Classificação supervisionada | 47 |
| 5.2 Cálculo dos valores de número de deflúvio para cada bacia | 50 |
| 5.3 Cálculo do tempo de concentração Tc para cada bacia | 51 |
| 5.4 Geração de hidrogramas de cheias..... | 52 |
| 6. Considerações Finais..... | 56 |
| 7. Conclusão | 58 |
| REFERÊNCIAS..... | 59 |
| ANEXO A: VALORES DE CN PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO (USDA, 2004)..... | 63 |

| | |
|---|-----------|
| ANEXO B: CLASSIFICAÇÃO HIDROLÓGICA DO SOLO PARA AS CONDIÇÕES BRASILEIRAS (SARTORI, 2004 apud GENOVEZ et al., 2005) | 67 |
| APÊNDICE A – MATRIZES DE CONFUSÃO PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA | 71 |
| APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE VAZÃO ESPECÍFICA PARA TEMPOS DE RETORNO DE 5, 10, 25, 50 E 100 ANOS | 74 |

1. Introdução

O Brasil, assim como muitos países em desenvolvimento, apresentou uma urbanização tardia se comparada a de países ditos de "primeiro mundo", mas que se tornou praticamente generalizada principalmente a partir do terço do século XX (SANTOS, 2005). De acordo com Tucci (1995), essa urbanização acelerada, praticamente sem infraestrutura, afeta todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos: abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos e drenagem pluvial. Em especial quanto à drenagem urbana, essa é profundamente afetada pelo aumento das áreas impermeáveis, que se dá pela construção de vias pavimentadas e telhados. (DECINA, 2012). Esse panorama é responsável pelo desencadeamento de diversos eventos de enchentes e inundações, cada vez mais frequentes e que podem ser acompanhados pelas diversas mídias.

Somado ao problema das cheias está a deficiência de saneamento básicos nas áreas urbanas, o que faz com que, em épocas de chuva, a população seja submetida ao contato direto com esgotos, comprometendo assim a saúde pública. A problemática do saneamento frente à questão da drenagem urbana diz respeito também à coleta de lixo. Muitas vezes a não coleta de lixo urbano, responsabilidade das prefeituras, faz com que haja o entupimento e não correto funcionamento dos sistemas de microdrenagem, que incluem, por exemplo, os bueiros ou bocas-de-lobo. Assim, ainda que o sistema tenha sido bem dimensionado, seu funcionamento fica comprometido devido a fatores externos.

Diversas intervenções são feitas no sentido de se mitigar ou prevenir os efeitos adversos das enchentes nos centros urbanos. Essas intervenções podem ser classificadas como medidas estruturais e não-estruturais, sendo que as primeiras incluem barragens, bacias de retenção, recomposição da vegetação, controle de erosão, retenção a nível de lote; e as segundas incluem o zoneamento de áreas de inundação, sistema de alerta ligado à defesa civil e seguros. Não existe solução única, cada caso deve ser analisado segundo as suas particularidades, e a melhor solução é, com frequência, a combinação de medidas estruturais e não-estruturais (BRESSIANI et al., 2012; TUCCI, 1995).

Apesar do avanço tecnológico e do entendimento da importância de medidas não-estruturais para a eficácia do planejamento na área de drenagem urbana, no Brasil ainda é preponderante as práticas que visam o escoamento da precipitação excedente para

fora da bacia o mais rápido possível. Percebe-se assim que as soluções mais comumente utilizadas incluem obras hidráulicas nas redes de micro e macrodrenagem (MARTINS, 2012).

Vale salientar que previamente a qualquer intervenção, seja ela estrutural ou não-estrutural, é necessário ter amplo conhecimento das respostas hidrológicas da bacia

No mais, a gestão dos recursos hídricos urbanos é extremamente complexa, dado que envolve diversos agentes, incluindo população, poder público em diversas esferas e iniciativa privada. A solução desse problema perpassa pela utilização de ferramentas tecnológicas de modelagem hidrológica e previsão de cenários, que auxiliem o poder público nas tomadas de decisão.

Nesse contexto, esse trabalho buscou analisar a resposta hidrológica das bacias a partir do seu uso e ocupação, tomando como exemplo três diferentes bacias no município de São Carlos, SP, que tem diferentes níveis de urbanização. O histórico de cheias no município, em especial na bacia do córrego do Gregório, faz necessário que se desenvolvam estudos que auxiliem o poder público na tomada de decisões, visando minimizar os custos associados aos eventos de cheias.

2. Objetivos

Relacionar o uso e ocupação do solo com as respostas hidrológicas, a partir de uma análise de cheia das bacias pela geração de hidrogramas de três diferentes bacias de São Carlos, com diferentes níveis de urbanização, para determinadas precipitações.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 O processo de urbanização e seus impactos

Segundo dados obtidos pelo Censo Demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população urbana brasileira passou de 56% em 1970 a 84,4% em 2010. Ainda segundo o IBGE, hoje se tem que, no Estado de São Paulo, dos mais de 40 milhões de habitantes cerca de 96% são habitantes da zona urbana.

De acordo com o IBGE, a população do Estado de São Paulo cresceu aproximadamente 11,4% entre 2000 e 2010. O município de São Carlos, por sua vez, cresceu 15% no mesmo intervalo de tempo, contando em 2010 com uma população de 221 950 habitantes (IBGE, 2010). Além disso, a densidade demográfica de São Carlos, em 2010, encontra-se acima da média do Estado, com 195,15 hab/km² e 166,23 hab/km², respectivamente.

O rápido processo de urbanização observado no Brasil, na grande maioria das vezes sem qualquer planejamento, causou um aumento das áreas impermeabilizadas, o que repercute na capacidade de infiltração das águas no solo. Essa impermeabilização se dá pela construção de vias pavimentadas, telhados e galerias pluviais (DECINA, 2012). Esse fenômeno altera profundamente o ciclo hidrológico, intensificando o escoamento superficial, o volume escoado e o pico de cheias, posto que a água que era anteriormente retida pela vegetação suprimida, passa a atingir rapidamente os canais hídricos nos fundos dos vales.

Segundo dados fornecidos pelo International Disaster Database (EM-DAT), entre 1940 e 2010, mais de 50% das mortes causadas por desastres naturais no Brasil foram decorrentes de eventos de inundações. Os critérios do EM-DAT para considerar um evento como desastre incluem a presença de pelo menos dez mortes, declaração de situação de emergência e a necessidade de ajuda internacional. Dessa forma, pode-se afirmar que o número de desastres ocorridos no Brasil é bem mais elevado do que os contabilizados pelo banco EM-DAT.

A cidade de São Carlos segue a tendência de urbanização nacional e é frequentemente assolada por inundações, em especial na bacia do córrego do Gregório, o que pode ser acompanhado periodicamente pela mídia. Na bacia do Gregório as inundações acontecem em um curto intervalo de tempo, de cerca de 15 a 30 minutos,

atingindo cotas de 50 a 150 cm (RIGHETTO et al.¹, 2003 *apud* MENDES; MENDIONDO, 2006). Mendes e Menciondo (2006) realizaram também estudo no qual demonstram a relação entre a urbanização e o aumento na frequência de enchentes, evidenciado na Figura 1:

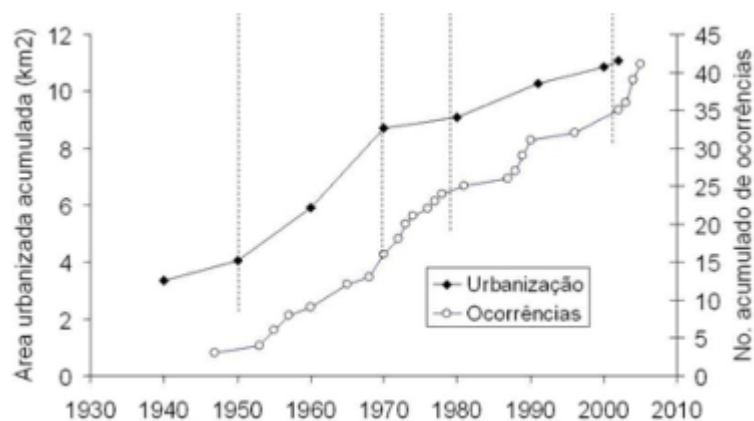


Figura 1: Relação entre área urbanizada acumulada e ocorrência de inundações e alagamentos em São Carlos - SP
Fonte: Adaptado de Mendes e Menciondo (2007)

Devido às alterações ocasionadas no ciclo hidrológico pela impermeabilização das áreas urbanas discutido anteriormente, os hidrogramas típicos de uma bacia natural e aquele resultante da urbanização são apresentados na Figura 2.

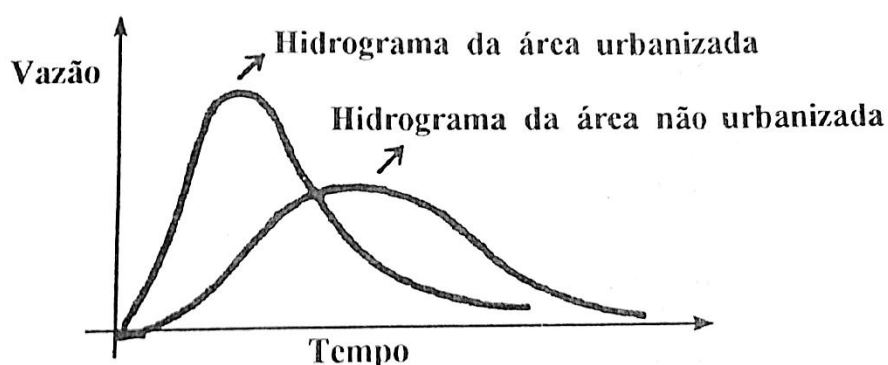


Figura 2: Hidrogramas hipotéticos
Fonte: Tucci (1995)

¹ RIGHETTO et al. (2003) – RIGHETTO, J.M.; BARROS, R.M.; MENDIONDO, E.M. Avaliação da seguridade e percepção pública sobre os riscos de enchentes em várzeas urbanizadas: o caso do micro-centro da cidade de São Carlos – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., Curitiba, 2003. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003. CD-Rom.

Além disso, vale ressaltar também a questão da qualidade da água escoada: devido à ineficácia do poder público municipal em realizar a coleta de lixo, a falta de consciência da população com relação ao descarte apropriado de resíduos, além da presença inevitável de sedimentos e substâncias como óleos, graxas e restos de pneus nas vias públicas, a chuva precipitada tende a arrastar esses elementos e comprometer ainda mais a qualidade da água dos corpos hídricos urbanos (CANHOLI, 2005). Na ocorrência de enchentes, a população fica submetida ao contato direto com a água dos corpos d'água, de qualidade frequentemente comprometida, o que causa um grave problema de saúde pública.

3.2 Sistemas de drenagem urbana e sua evolução

O processo de urbanização também gerou um intenso processo de retificação e canalização de córregos e rios que perpassam pelas cidades. Essas canalizações foram feitas tanto para a prevenção de doenças transmitidas por mosquitos, que se reproduziam nas margens de rio, em águas paradas, por um planejamento marcado por princípios higienistas, formulados por médicos (ROLNIK, 1990). Além disso, era desejável que se incorporasse as várzeas dos rios aos sistemas viários, por meio da construção das denominadas "vias de fundo de vale" (CANHOLI, 2005). A construção dessas vias atrai intensa ocupação, e logo se tem que as antigas várzeas do rio ficam quase completamente ocupadas.

A retificação e canalização de rios e córregos, somada à impermeabilização do solo e ocupação das várzeas, faz com que, em épocas de chuvas, a calha dos rios, córregos ou galerias pluviais não consigam escoar a vazão gerada na bacia a montante, o que sujeita a população às enchentes (DECINA, 2012). Além disso, há o problema relacionado ao saneamento básico nas cidades brasileiras, nas quais os córregos e rios se transformam, muitas vezes, em condutores de esgoto a céu aberto (CANHOLI, 2005). Quando as enchentes ocorrem e a água passa a ocupar a área de inundação, entrando em contato com a população lá instalada, tem-se o comprometimento da saúde pública, além das perdas e danos materiais e o impedimento do tráfego.

A microdrenagem urbana pode ser definida pelo sistema de condutos pluviais em nível de loteamento ou de rede primária das cidades (BIDONE; TUCCI, 1995). Dentre os diversos elementos que compõe o sistema de microdrenagem, podem-se citar as bocas-de-lobo, as galerias e as sarjetas, por exemplo. Esse sistema promove a diminuição do tempo de concentração da bacia, potencializada pela impermeabilização do solo. Com isso, tem-se também a necessidade de projetos de macrodrenagem, que se destinam à condução final das águas captadas pela drenagem primária, dando assim

prosseguimento ao escoamento do volume precipitado oriundo das ruas, sarjetas, valas e galerias (MARTINS, 1995). O mesmo autor aponta que, além da diminuição do tempo de concentração da bacia ocasionado, dentre outras coisas, pelos projetos de microdrenagem, outras razões para a necessidade de implantação ou ampliação das vias de macrodrenagem nos centros urbanos incluem:

- O aumento da taxa de aporte dos sedimentos, devido ao desmatamento e uso inadequado dos terrenos, e a detritos como lixo e rejeitos industriais, lançados diretamente sobre os leitos - ou ainda carregados pela chuva;
- A necessidade de ampliação da malha viária em leitos ocupados;
- Saneamento de áreas alagadiças.

As medidas de controle das inundações podem ser classificadas em estruturais e não-estruturais. O controle com medidas estruturais é feito por meio de obras hidráulicas, como barragens, diques e canalização e, podem ser intensivas ou extensivas. As intensivas podem ser de quatro tipos: de aceleração do escoamento por canalização; de retardamento do fluxo por reservatórios, bacias de retenção ou ainda pela restauração das calhas naturais; de desvio do escoamento a partir de túneis de derivação, por exemplo; e as medidas que englobem a introdução de ações individuais que visem tornar as edificações resistentes a enchentes. As extensivas, por sua vez, correspondem a pequenos armazenamentos disseminados na bacia, recomposição da vegetação e controle da erosão, ao longo da bacia de drenagem (CANHOLI, 2005). As características da urbanização residencial brasileira, caracterizada por lotes pequenos e intensamente urbanizados, tendem a ampliar ainda mais o efeito das enchentes e dificultar tais controles, em especial com relação às medidas extensivas ou distribuídas (TUCCI, 1995).

As medidas não-estruturais, por sua vez, são de caráter preventivo e podem-se citar o zoneamento de áreas de inundação; sistema de alerta ligado à defesa civil; seguros; educação ambiental voltada ao controle da poluição difusa, erosão e lixo; e previsão de inundações (CANHOLI, 2005; TUCCI, 1995). Essas medidas podem ser eficazes a custos mais baixos e com horizontes mais longos de atuação (CANHOLI, 2005).

Além dessas, temos um conjunto de medidas não convencionais em drenagem, que, segundo Canholi (2005), podem ser entendidas como estruturas, dispositivos, obras ou mesmo como conceitos diferenciados de projeto, cujo uso ainda não foi

disseminado. Dentre as medidas dessa espécie mais frequentemente adotadas estão aquelas que visam o aumento do processo de infiltração; a retenção dos escoamentos em reservatórios; e o retardamento do fluxo nas calhas dos córregos e rios.

A solução deve ser definida para cada contexto específico, observando suas particularidades. Para cada situação, as duas classes de medidas podem ser combinadas, mas, de qualquer forma, o processo de controle deve se iniciar pela prevenção, através da regulamentação do uso do solo urbano por um Plano Diretor que integre o planejamento do uso do solo com a gestão dos recursos hídricos, posto que o uso do solo influencia o ciclo hidrológico (BREASSIANI et al., 2012; TUCCI, 1995). Além disso, é válido ressaltar que o equacionamento do problema e suas possíveis soluções muitas vezes não se processam tão rapidamente quanto se faz necessário. Nesse sentido, é necessário se utilizar de metodologias de auxílio às tomadas de decisões, baseadas na intensa utilização de base de dados, modelos matemáticos e na facilidade de utilização das ferramentas (SILVEIRA, 2010).

3.3 Legislação vigente

A Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), também conhecida como Lei Nacional do Saneamento Básico, considera, como saneamento básico, o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

- a) abastecimento de água potável;
- b) esgotamento sanitário;
- c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e
- d) drenagem e manejo de águas pluviais urbanas.

Além disso, a Lei nº 10.257 (BRASIL, 2001), também conhecida como Estatuto da Cidade, formula diretrizes gerais da política urbana brasileira, estabelecendo, com o Art. 1º, "normas de ordem pública e interesse social que regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental". O Estatuto define função social da propriedade urbana, cabendo ao município o cumprimento da norma geral. Além disso, fica estabelecido, como instrumento, o Plano Diretor, obrigatório aos municípios enquadrados nas condições do Art. 41.

O Plano Diretor de São Carlos, instituído pela Lei nº 13.691 (BRASIL, 2005), aborda algumas questões relacionadas à drenagem urbana, como o tipo de uso, o aproveitamento e permeabilidade dos terrenos. Além disso, o Art. 103 define:

O projeto de drenagem constituído por poços de infiltração, bacias de retenção de águas pluviais, dispositivos de dissipação de energia, pavimentos permeáveis e demais componentes do sistema, devem ser concebidos e implantados de tal modo que a vazão de escoamento seja mantida dentro das condições originais da área antes de ser urbanizada, reduzindo-se o impacto da urbanização nos fundos de vale e nos corpos d'água (BRASIL, 2005).

Essas medidas têm como objetivo aumentar o tempo de concentração das bacias hidrográficas, como tentativa de fazer o hidrograma da área urbanizada se aproximar do hidrograma natural, como apresentado na Figura 2.

No mesmo sentido, os Artigos 98 e 99 preveem a instituição de áreas públicas, tanto destinadas ao lazer como para uso institucional. Esses artigos acrescentam ainda que essas áreas além de uso destinado à recreação podem ser utilizadas para a implantação de bacias de retenção das águas pluviais.

Assim, fica claro que a legislação brasileira, tanto a nível federal, estadual quanto municipal, observa diferentes aspectos da problemática ambiental, e que essas legislações preveem instrumentos importantes para implantação de políticas que visam minimizar os impactos das ocupações humanas no meio ambiente, em especial do que diz respeito às enchentes. No entanto, o que se percebe na prática é uma dificuldade de se aplicar as legislações nas políticas públicas, assim como uma falta de fiscalização na aplicação dessas normas.

3.4 Sistemas de Informação Geográfica

A gestão dos recursos hídricos urbanos é extremamente complexa, dado que envolve diversos agentes e é fortemente dependente de políticas públicas, que podem mudar a cada nova gestão. A utilização de ferramentas tecnológicas pode auxiliar na tomada de decisões por parte do poder público, possibilitando a prevenção de potenciais impactos por meio da construção de cenários. A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é fundamental no planejamento de recursos hídricos, justamente por esses possibilitarem diagnósticos, observação de mudanças temporais, tendências espaciais, além da criação de cenários hipotéticos.

De acordo com Câmara (1995), o termo *sistemas de informação geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. O sensoriamento remoto pode ser definido como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, satélites, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registo e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações (NOVO, 1989).

Dentre as vantagens da utilização de imagens de satélite para sensoriamento remoto, estão o formato digital das imagens, que possibilita a integração entre o sensoriamento remoto e os SIG (EHLERS, 2007); a cobertura, visto que os satélites atualmente alcançam uma cobertura praticamente global, permitindo o imageamento inclusive de regiões de difícil acesso; e o custo, que é menor se comparado a levantamento de dados em campo.

O avanço da tecnologia aeroespacial com aplicação no sensoriamento remoto permite a análise temporal de localidades, além de possibilitar o estudo de áreas remotas e de difícil acesso, sem a necessidade de ida a campo, o que se traduz em uma enorme economia de capital. A utilização dessa tecnologia é uma importante ferramenta como suporte na tomada de decisão e políticas públicas sobre o território.

3.4.1 Resolução das imagens de satélite

Novo (1989) afirma que de forma geral, as diferenças entre as imagens de satélite se dão devido aos diferentes sensores que as capturam, e cita os quatro diferentes tipos de resolução: a espectral, a espacial, a radiométrica e a temporal.

3.4.1.1 Resolução espectral

Essa resolução está relacionada com o intervalo do espectro eletromagnético capturado pela imagem. Segundo Novo (1989), resolução espectral é uma “medida da largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno”. As três cores básicas componentes das imagens de satélite, vermelho, verde e azul, correspondem, respectivamente, às bandas 3, 2, e 1 no satélite LANDSAT. O infravermelho próximo, médio e infravermelho termal são representadas, respectivamente, pelas bandas 4, 5 e 6 (MARTINS, 2012). Além disso, a banda 7 representa o infravermelho de ondas longas e a banda pancromática é representada pela banda 8, sendo formada por níveis de cinza, apenas.

Diversas bandas compõem as imagens de satélite, e cada banda apresenta características próprias e são mais apropriadas para a representação de diferentes objetos no solo. Na Tabela 1 são apresentadas as características e funcionalidades de cada uma das bandas.

Tabela 1: Características e aplicações das bandas de imagens de satélite LANDSAT

| Banda | Intervalo espectral | Características e aplicações |
|-------|--|--|
| 1 | Azul 0,450 – 0,520 μm | Útil para mapeamento de águas costeiras, diferenciação entre solo e vegetação, mapeamento de florestas e detecção de feições culturais (mancha urbana, rodovias, etc.) |
| 2 | Verde 0,520 – 0,600 μm | Grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando análise quali-quantitativa. Corresponde à reflectância da vegetação verde e sadia. Útil para identificação de feições culturais. |
| 3 | Vermelho 0,630 – 0,690 μm | Útil para discriminação entre espécies de plantas e delinear solo e feições culturais. Permite um bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação, como solo exposto, estradas e áreas urbanas. Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal, como campo, cerrado e floresta. Utilizadas para delimitar a mancha urbana e identificar áreas agrícolas. |
| 4 | Infravermelho próximo 0,760 – 0,900 μm | Permite estimar a quantidade de biomassa de vegetação presente em uma cena. É útil para identificação de culturas agrícolas, enfatizando a diferenciação solo/agricultura e água/solo. Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. |
| 5 | Infravermelho médio 1,550 – 1,750 μm | Sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar o stress hídrico da vegetação. Pode ser usada para discriminação entre nuvens, neve e gelo. |
| 6 | Infravermelho termal 10,40 – 12,50 μm | Apresenta sensibilidade nos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água. Útil para avaliações de stress em plantas, intensidade de calor, aplicações de inseticida e estudos de atividade geotermal. |
| 7 | Infravermelho médio 2,080 – 2,350 μm | Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Útil para a discriminação de tipos de rochas e estudo de solos, como também para estudar o conteúdo da umidade e da vegetação do solo. |

Fonte: INPE² (2004 *apud* MARTINS, 2012)

3.4.1.2 Resolução espacial

Essa resolução está relacionada à área equivalente do solo representada por cada *pixel* da imagem. Atualmente satélites têm capacidade de captar imagens de alta resolução, como é o caso do *WorldView*, de onde foi adquirida a imagem utilizada nesse trabalho. A Figura 2 mostra a diferença de resolução espacial de 0,52 e 2,4 m para uma mesma área:

² INPE (2004) – INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atendimento ao usuário: O satélite LANDSAT**. Divisão de geração de Imagens. 2004.



Figura 3: Imagens com resoluções espaciais de 2,4m (A) e 0,52m (B)
Fonte: Martins (2012)

3.4.1.3 Resolução radiométrica

A resolução radiométrica é referente à capacidade do sistema sensor de detectar as variações da radiância espectral recebida (NOVO, 1989). A radiância de cada *pixel* passa por uma codificação digital, obtendo um valor numérico, expresso em *bits*, denominado *Digital Number* (DN). Assim, cada pixel da imagem possui um número que representa a radiação eletromagnética que este emitiu no instante da captura da imagem pelo satélite, também expresso por um nível de cinza (MARTINS, 2012). Os níveis de cinza variam de 2 a 2048, sendo uma imagem composta por vários níveis. O valor em bits é expresso em função do número de dígitos binários necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo de cinza. Esse valor é sempre uma potência de 2, por exemplo 8 bits significam 256 níveis de cinza, dado que $2^8 = 256$ (MELO, 2002). A Figura 4 demonstra como as imagens são formadas a partir de DN e a Figura 5 demonstra a diferença de níveis de informações entre diferentes resoluções radiométricas.

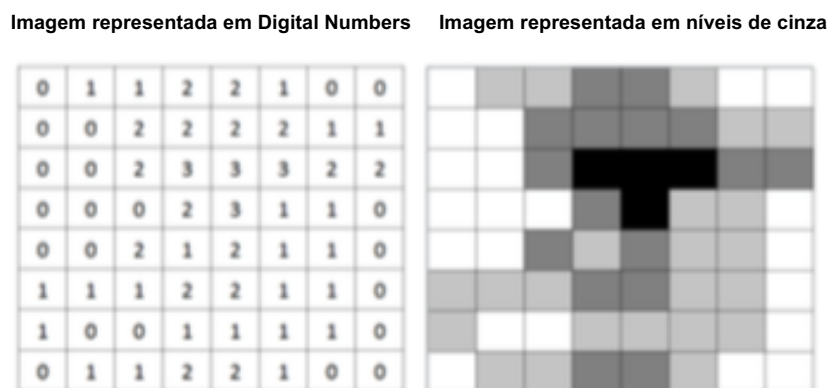


Figura 4: Imagem com resolução de 4 bits representada em DN e em níveis de cinza
Fonte: Martins (2012)

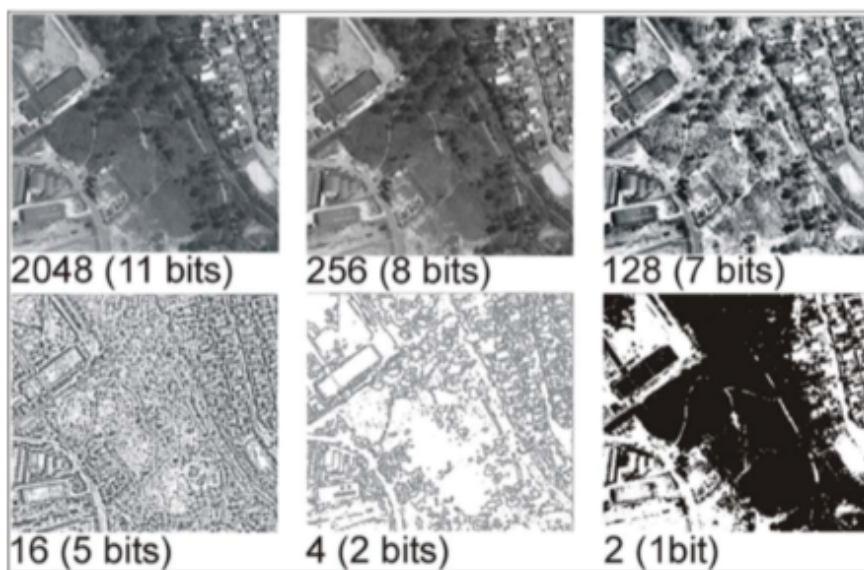


Figura 5: Diferença de resolução radiométrica em área urbana na região nordeste da cidade de São Paulo
Fonte: Melo (2002)

3.4.1.4 Resolução temporal

A resolução temporal está relacionada com a frequência com a qual a mesma área do solo consegue ser captada por um satélite. Essa frequência depende das características orbitais do satélite e ao ângulo total de abertura do sensor. Essa resolução é importante para estudos de monitoramento na superfície terrestre e de suas mudanças ao longo do tempo (NOVO³, 2008 *apud* MARTINS 2012).

3.5 Classificação de imagens de satélite

Classificação de imagens pode ser definida como o agrupamento de pixels em um número finito de classes, categorias, ou baseada nos valores dos pixels. Desta forma, se um pixel satisfaz certos critérios, o mesmo pode ser assinalado para a classe que corresponde a esses critérios (PARECE; CAMPBELL; McGEE, 2015). Essa classificação pode ser feita manualmente, através de fotointerpretação, ou de forma automática (MARTINS, 2012). Segundo Martins (2012), a classificação digital pode ser feita de forma tradicional, que inclui as classificações supervisionada e não-supervisionada; além da classificação orientada a objetos. O resultado de qualquer classificação é um mapa

³ NOVO (2008) – NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** 3ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

temático com diferentes classes da cobertura do solo. Um exemplo de classificação de imagem pode ser observado na Figura 6.

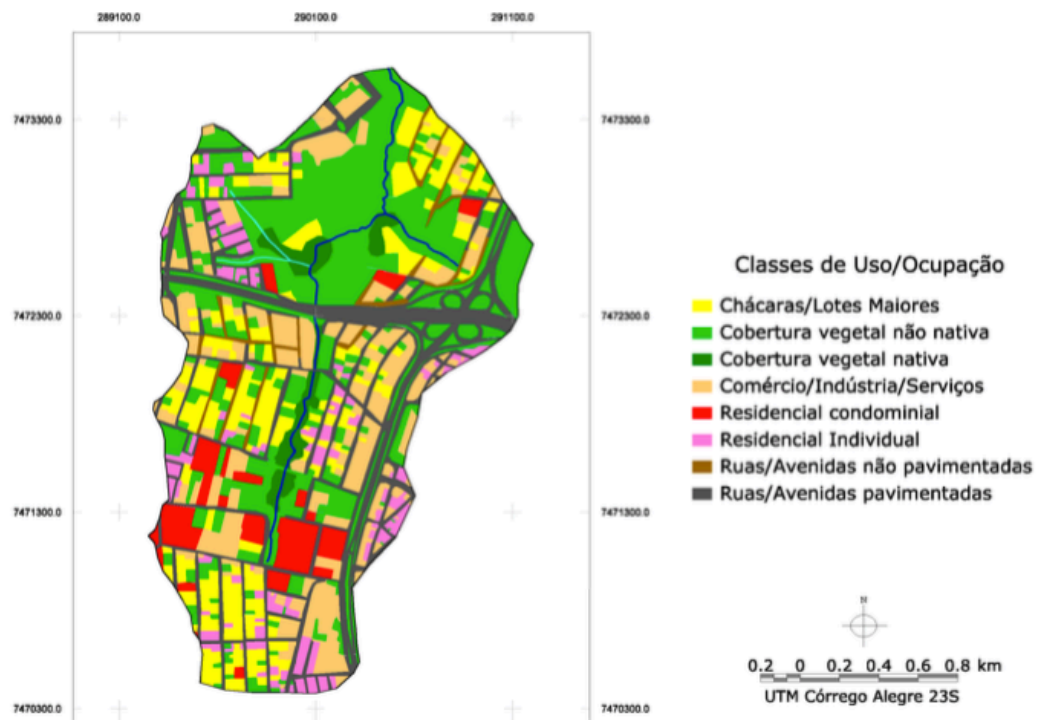


Figura 6: Exemplo de mapa de uso e ocupação do solo

Fonte: Bettine e Sebusiani (2011)

Uma análise visual da imagem da área a ser classificada permitiu a detecção de sete classes de uso, como definidas a seguir:

- Classes 1 e 2 - Uso residencial. Divididas em residências com telhado de barro e residências com telhado de metal. O uso industrial foi incluído nesta classe devido a baixa presença de indústrias na área e pelas mesmas conterem telhado de metal;
- Classe 3 - Transporte: Consiste em ruas, avenidas e estacionamentos pavimentados;
- Classe 4 - Agricultura: Plantação de cana de açúcar;
- Classe 5 e 6 – Espaços abertos: Divididas em solos com vegetação rasteira (gramínea) e solo exposto. Parte do uso agrícola foi classificada como solo exposto devido a este não conter vegetação;
- Classe 7 – Floresta: Composta por vegetação arbórea natural e espécies de Pinus.

- Classe 8 – Sombra: Regiões escuras devido às sombras de casas, prédios e árvores.

Apesar de não corresponder a uma categoria de uso do solo, a classe de sombras de faz necessária pela presença da mesma nas imagens de satélite. A presença de sombras na imagem, embora indesejável, é, todavia, importante no processo cognitivo, sendo um dos elementos básicos da fotointerpretação. De acordo com Centeno e Pachêco (2001), a sombra é um atributo da imagem que ajudar na identificação de diferentes alvos em imagens de satélite, além de fornecerem a sensação de tridimensionalidade.

3.5.1 Classificação não -supervisionada

De acordo com Martins (2012), a classificação não supervisionada é adequada para as situações nas quais o analista não possui conhecimento prévio da área estudada, o que impossibilita a definição das classes desejadas e suas respectivas amostras. Neste caso, alguns parâmetros são fornecidos pelo analista, como número máximo e mínimo de classes, por exemplo. Neste caso, o programa agrupa os *pixels* da imagem de acordo com as suas características espectrais. A definição das classes neste caso é feita após a classificação pelo *software* ter sido concluída (MATHER⁴, 2005 *apud* MARTINS, 2012). No ArcMap, ferramenta utilizada para essa classificação é a *Iso Cluster Unsupervised Classification*.

3.5.2 Classificação supervisionada

Essa classificação une o conhecimento prévio da área do foto-intérprete ao processo. Primeiramente, o foto-intérprete treina o *software* a partir da identificação de diferentes áreas da imagem, representando uma classe de cobertura, selecionando várias amostras representativas desta classe, também chamados de *training samples*. Os *training samples* servirão como fonte de informação para o *software* realizar a classificação em toda a imagem. Em seguida, os pixels são associados a uma determinada classe, tendo como base as amostras escolhidas (MARTINS, 2012).

3.6 Sistemas de Suporte à Decisão aplicados em estudos hidrológicos

Como já mencionado, devido à complexidade característica dos problemas urbanos atuais, sua solução deve considerar aspectos sociais, econômicos e ambientais; além de

⁴ MATHER (2005) – MATHER, P. M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester: John Wiley and Sons, 1999. 292 p.

depende da coparticipação e articulação dos diferentes setores da sociedade, não apenas do poder público.

Neste contexto, torna-se útil a utilização de Sistemas de Suporte à Decisão (SSDs), que são definidos como sistemas computacionais que integram uma base de dados a modelos matemáticos, por meio de uma interface gráfica (GALBETTI, 2015). Os SSDs fornecem meios para que se tome uma decisão satisfatória em tempo hábil, auxiliando assim os tomadores de decisão. Segundo Galbetti (2015), a estrutura de um SSD contempla a Base de Modelos, sendo que o modelo hidrológico é uma das ferramentas que permite melhor entender, representar e simplificar os comportamentos de uma dada bacia hidrográfica, possibilitando a simulação de sua resposta hidrológica a diferentes cenários de precipitação e condição de umidade do solo.

No Brasil, a aquisição de dados e o estudo em bacias urbanas é ainda insipiente, e isso dificulta a utilização de modelos, visto que esses últimos dependem da determinação de parâmetros. O estudo de modelos hidrológicos depende dos parâmetros que representam os processos hidrológicos, como a pedologia e as condições de umidade do solo, as condições de uso e ocupação da bacia hidrográfica, a topografia e os parâmetros do corpo d'água como comprimento do talvegue e declividade.

O uso de dados hidrológicos como a precipitação total e a precipitação efetiva, além da vazão dos cursos d'água em estudos é necessário para a determinação dos hidrogramas de cheia de uma bacia hidrográfica (GALBETTI, 2015). Pela indisponibilidade desses dados, frequentemente é necessário que se estime esses hidrogramas, a partir de modelos empíricos, como apresentados nos itens subsequentes.

3.6.1 Vazões máximas com base em transformação chuva-vazão

Um dos parâmetros de entrada nos modelos hidrológicos é a estimativa da intensidade da chuva, definida a partir da duração da chuva e do seu tempo de retorno. Os modelos chuva-vazão são muito úteis para o planejamento de uma microbacia devido a sua flexibilidade na previsão de comportamentos futuros frente a alterações de ocupação do solo bem como no caso de um país como o Brasil, pela carência de dados fluviométricos principalmente em pequenas bacias (SARTORI; LOMBARDI; GENOVEZ, 2005).

Para vazões máximas, a duração da chuva deve ser considerada igual ao seu tempo de concentração, o qual pode ser determinado por diferentes métodos,

apresentados a seguir. Para a cidade de São Carlos, os dados de precipitação vêm da equação IDF realizada por Barbassa (1991):

$$i = \frac{1519 * Tr^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}}$$

Em que:

Tr – tempo de retorno (anos)

t – duração da chuva (minutos)

i – intensidade média da precipitação (mm/h)

3.6.2 Cálculo da precipitação excedente

A precipitação excedente corresponde à parcela da precipitação total convertida em escoamento superficial direto, a maior responsável pelas vazões de cheia, principalmente em bacias pequenas e urbanizadas (PORTO, 1995). Segundo Porto (1995) existem duas abordagens principais para o cálculo da chuva excedente:

- Relações funcionais que levam e conta o total precipitado, o tipo de solo, o uso e ocupação, a condição de umidade antecedente, etc. Segundo o autor, esses métodos baseiam-se normalmente em relações empíricas de frágil fundamentação teórica, mas de uso fácil e fornecem resultados satisfatórios quando bem utilizados;
- O segundo enfoque é dado a partir da diferença entre o total precipitado e as perdas (por infiltração, interceptação, retenção em depressões, dentre outros).

O método do Soil Conservation Service (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) é o método utilizado no presente trabalho e é pertencente ao primeiro caso. A fórmula proposta pelo SCS é:

$$H_{EXC} = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P + 0.8 * S}, P > 0.2 * S$$

$$H_{EXC} = 0, P < 0.2 * S$$

Em que:

H_{EXC} – escoamento superficial direto (mm);

P – precipitação (mm) e

S – retenção potencial do solo (mm)

O valor de S é função da pedologia e do uso do solo. O valor de $0,2 \cdot S$ é uma estimativa das perdas iniciais devidas à interceptação pela vegetação e retenção em depressões. Desta forma, a precipitação excedente só se dá no caso de a precipitação total ser superior às perdas iniciais.

A utilização do método do SCS no presente trabalho se justifica pelo mesmo ser representativo para eventos de cheia e aplicável especialmente para casos nos quais não se dispõe de dados hidrológicos, realidade para a maior parte dos municípios brasileiros.

3.6.3 Cálculo do Tempo de Concentração (T_c)

Como o próprio nome indica, o tempo de concentração é um parâmetro temporal, que influencia na vazão de pico e no formato do hidrograma sintético de cheia (FANG et al., 2008; JÚNIOR; BOTELHO, 2011; SHARIFI; HOSSEINI⁵, 2011 *apud* GALBETTI, 2015).

O tempo de concentração pode ser entendido como a diferença temporal entre o fim da precipitação efetiva ao ponto de inflexão do ramo de recessão do hidrograma (GALBETTI, 2015), ou ainda como o tempo necessário para que a precipitação no ponto mais hidráulicamente remoto contribua para a vazão no exutório da bacia.

Devido a ausência de dados hidrometeorológicos e fluviométricos, em especial em pequenas bacias urbanas, é comum a utilização de fórmulas empíricas para o cálculo do tempo de concentração. Pelo caráter empírico, vale ressaltar que essas formulações são válidas para condições semelhantes às de sua determinação, e devem, portanto, ser utilizadas com discernimento. O software ABC6 possui em seu banco de dados diversas fórmulas de determinação de T_c , apresentadas na Tabela 2:

⁵ SHARIFI; HOSSEINI (2011) – SHARIFI, S.; HOSSEINI, S. M. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 137, n. November, p. 712–719, 2011.

Tabela 2: Formulações de Tempo de Concentração presentes no ABC6

| Fórmula | Equação |
|--|--|
| Bransby - Willians | $T_c = 306 * \frac{Lt}{5280} * (\frac{1}{A^{0,1} * St^{0,2}})$ |
| Dooge (1956) | $T_c = 70,8 * \frac{A^{0,41}}{St^{0,17}}$ |
| Kerby (1959) | $T_c = 7,23 * (\frac{Lt * r}{St^{0,5}})^{0,467}$ |
| Kirpich I (1940) | $T_c = 0,0196 * (\frac{Lt^3}{\Delta h})^{0,385}$ |
| Kirpich II (1940) | $T_c = 0,28 * (\frac{Lt^2}{St})^{0,385}$ |
| Onda Cinemática (1963) | $T_c = 55 * (\frac{n^{0,6} * Lt^{0,6}}{i^{0,4} * St^{0,3}})$ |
| Soil Conservation Service - SCS (1975) | $T_c = 0,43 * \frac{Lt^{0,8}}{Sb^{0,5}} * (\frac{1000}{CN} - 9)^{0,7}$ |
| Equação Padrão ABC6 | $T_c = \frac{\sqrt{A}}{2}$ |

Fonte: Adaptado de Galbetti (2015)

Nas quais:

Δh - diferença de cotas (m);

A – área da bacia (km²);

c – rugosidade de retardo;

CN – número de deflúvio do modelo do SCS;

i – intensidade da precipitação (mm/h);

Lt – comprimento do talvegue (m);

n – rugosidade de Manning;

Sb – declividade equivalente da bacia (m/km) e

St – declividade equivalente do talvegue (m/km).

4. Materiais e Métodos

Neste item serão descritos os procedimentos metodológicos e os materiais utilizados para a realização da pesquisa.

Descreve-se a área de estudo, além de apresentar a metodologia utilizada para a classificação da imagem de satélite e análise do uso e ocupação do solo das bacias, com a utilização do software de geoprocessamento (ArcGis 10.1). Além disso, descreve-se a ferramenta ArcHydro presente no ArcGis, que possibilitou a determinação da hidrografia.

Descreve-se o software ABC6 utilizado para a geração de hidrogramas de escoamento superficial direto, utilizando-se de modelos consagrados em literatura. Além disso, utilizou-se o software Microsoft Excel 2010 para a manipulação e organização dos dados. Os softwares ArcGis 10.1 e Microsoft Excel 2010 encontram-se disponíveis na instituição.

4.1 Materiais Utilizados

4.1.1 Imagem de satélite

A imagem de satélite utilizada neste trabalho para a etapa de classificação do uso e ocupação do solo é produto do sistema sensor óptico multiespectral WorldView02, da companhia Digital Globe, registrada em 11 de julho de 2011. Para a realização desse estudo foram adquiridas cinco bandas espectrais: a pancromática, com resolução espacial de 0,52m e quatro bandas multiespectrais: azul, verde, vermelho e infravermelho, com resolução espacial de 2,4m (APRÍGIO⁶, 2012 *apud* MESSAGE, 2014).

A imagem contempla toda a área urbana do município de São Carlos e parte da porção rural, sendo estudadas especificamente as bacias do Córrego Gregório, Mineirinho e Tijuco-Preto, apresentadas na Figura 7.

4.1.2 Software ArcGIS10

Para realização dos trabalhos em ambiente SIG foi utilizado o software de licença privada ArcGIS 10, disponível na instituição onde foi realizado o trabalho e apropriado para realizar as tarefas necessárias, inclusive as classificações semiautomáticas supervisionada e não-supervisionada.

⁶ APRÍGIO (2012) – **Avaliação de modelos de simulação de cargas difusas em bacias hidrográficas**. 2012. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

4.1.3 Software – ABC6

O ABC6 é um software brasileiro, gratuito e de fácil utilização, desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental (LabSid) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Esse software permite a simulação da transformação chuva-vazão, utilizando-se de formulação matemática fundamentada em modelos de determinação de precipitação efetiva e de geração de hidrogramas de escoamento superficial direto consagrado na literatura. O uso do software ABC6 permite o estudo de bacias múltiplas (ou ainda, complexas) através da criação de cenários que auxiliam significativamente a tomada de decisões a partir da obtenção de hidrogramas de cheia. O sistema Arc Hydro apresenta uma série de ferramentas que opera dentro do ArcGIS e possibilita suporte na análise geoespacial e temporal de dados. Com essa ferramenta foi possível definir e analisar geometrias de drenagens.

4.1.4 Dados topográficos

A partir dos dados da topografia da área, obtidos no Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC) da Universidade de São Paulo, e dos divisores das bacias Gregório, Mineirinho e Tijuco Preto a serem trabalhadas, extraiu-se a topografia de cada uma das bacias em arquivos .shp distintos (Figura 7).

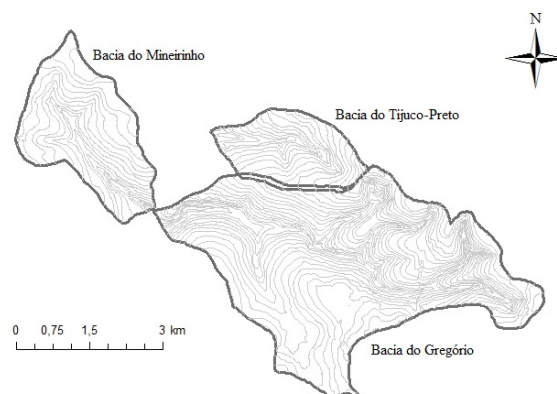


Figura 7: Topografia da área das bacias Gregório, Tijuco Preto e Mineirinho

Fonte: Adaptado de CDCC (200-)

A informação de topografia permite a geração do Modelo Digital de Terreno (MDT). Existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas para a geração de um MDT. Dentre elas pode-se citar a *Topo to Raster*, o interpolador *IDW* e o *Spline*. Cada uma dessas ferramentas possui peculiaridades no seu processamento e no resultado gerado.

Optou-se por utilizar a ferramenta *Topo to Raster* devido ao fato da mesma converter os dados vetoriais em modelos de elevação hidrologicamente consistentes (ANJOS et al., 2011), o que é importante na utilização da extensão *Hydro Tools* realizada posteriormente, para a aquisição da drenagem de cada uma das bacias.

4.2 Métodos

4.2.1 Fusão das imagens multiespectral e pancromática

A fusão das imagens pancromática, com resolução espacial de 0,52m e quatro bandas multiespectrais: azul, verde, vermelho e infravermelho, com resolução espacial de 2,4m, permite a obtenção de imagem colorida com resolução de 0,52m, ideal para a utilização da mesma para classificação de uso e ocupação do solo. A imagem resultante da fusão pode ser observada na Figura 8.

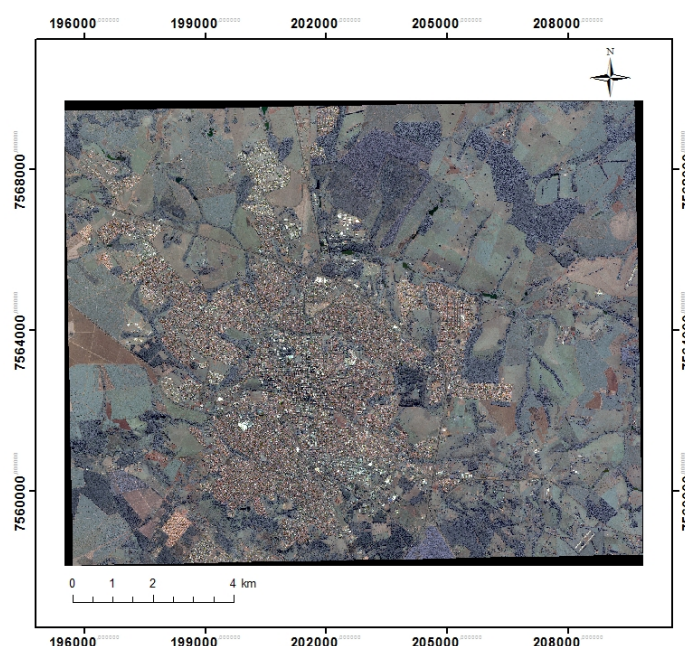


Figura 8: Imagem fusionada da área

4.2.2 Geração dos corpos d'água a partir do HydroTools

A partir do MDT gerado, consegue-se, por meio do Hydro Tools, gerar as drenagens para as três bacias. Isso será importante em uma etapa posterior do trabalho, ao se gerar os hidrogramas de cheias das bacias pelo *software* ABC6. As drenagens geradas estão apresentadas nas Figuras 9 a 11.

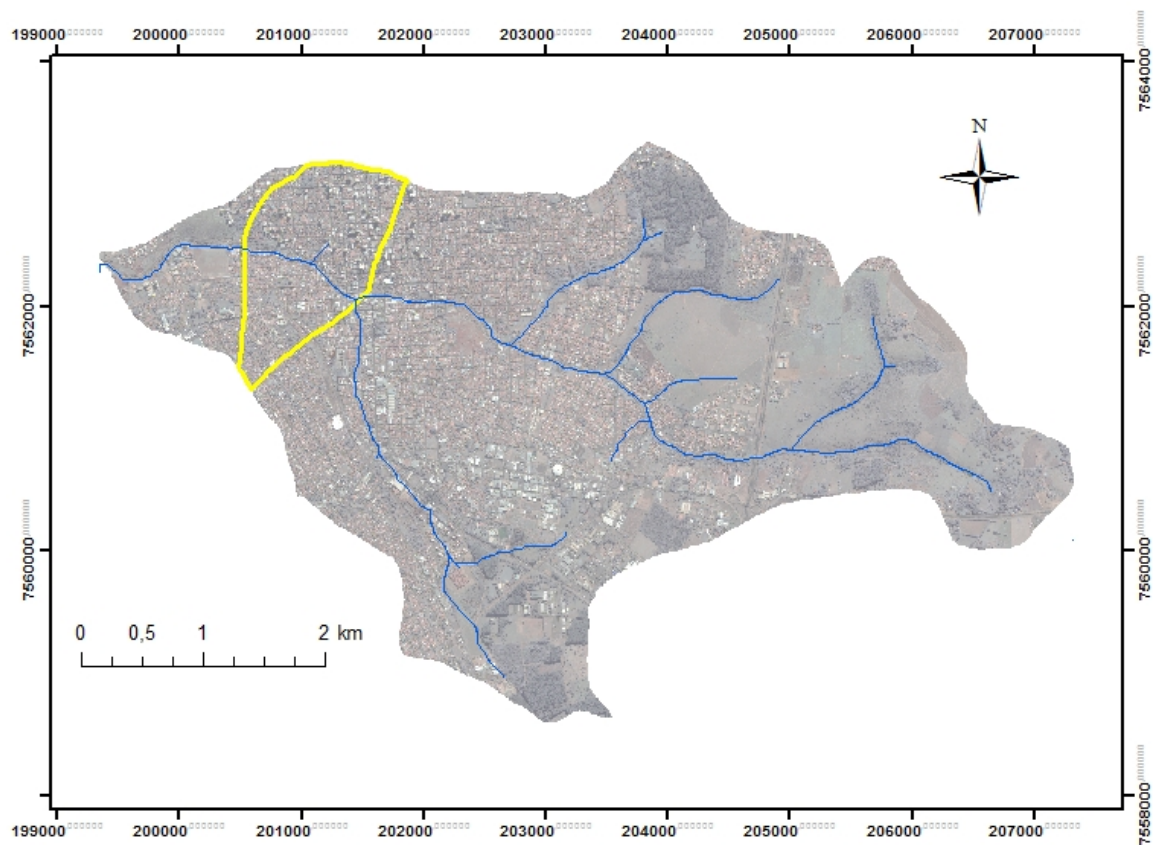


Figura 9: Rede de drenagem gerada para a bacia hidrográfica do córrego do Gregório, com detalhe para subbacia urbanizada estudada

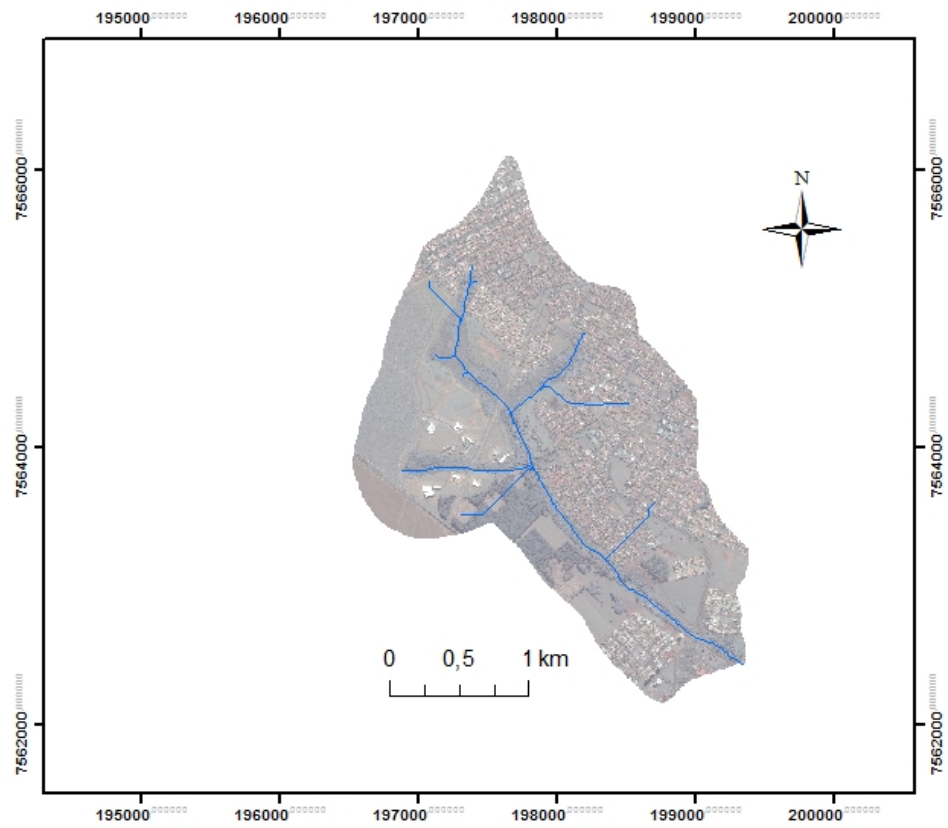


Figura 10: Rede de drenagem gerada para a bacia do córrego do Mineirinho

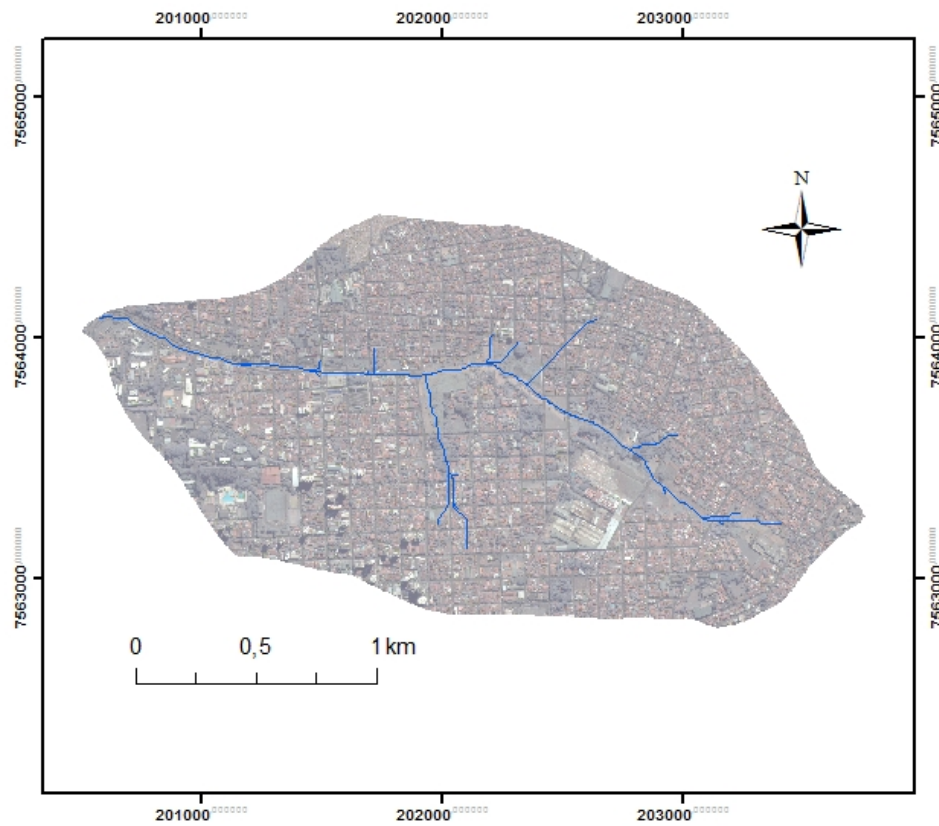


Figura 11: Rede de drenagem gerada para a bacia do córrego do Tijuco-Preto

4.2.3 Classificação Supervisionada

Para a classificação supervisionada, criou-se 30 *training samples* para cada uma das 8 classes citadas no item 3.5. Os *training samples* são criados desenhando-se polígonos sobre a área, com um zoom que permita a seleção de um polígono tão homogêneo quanto possível (Figura 12 e 13).



Figura 12: Exemplo da criação de training samples sobre área de telhado de barro



Figura 13: Detalhe para exemplo da criação de *training samples* sobre área de vegetação arbórea

Além disso, é importante que se tome os polígonos do *training samples* no centro da área amostrada, de forma a evitar transições, por exemplo, entre telhados e sombras adjacentes.

4.2.4 Determinação do valor do número de deflúvio (CN) para cada bacia

O número de deflúvio (CN) está diretamente relacionado com a parcela da chuva total que se transforma em chuva efetiva, ou ainda a parcela da chuva que é convertida em escoamento superficial.

Diversos trabalhos já foram realizados no sentido de se calcular hidrogramas de cheias em bacias urbanizadas, em especial pelo método SCS e hidrograma triangular do

SCS. A United States Department of Agriculture (USDA), em 2014, publicou recomendações para valores de CN a serem adotados em áreas de diversos usos, como apresentado em Anexo. Além disso, Martins (2012), em dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, apresentou estudo que culminou na determinação, dentre outros parâmetros hidrológicos, no número de deflúvio para a bacia do córrego do Gregório.

A determinação do CN depende também do grupo hidrológico do solo da bacia. A metodologia SCS do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) divide os solos dos Estados Unidos em quatro grandes grupos (A, B, C, D) de acordo com a sua capacidade de infiltração e produção de escoamento direto, com a diminuição da taxa de infiltração de um solo para outro, sendo o A o de maior taxa de infiltração e o D o de menor taxa.

Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005) realizaram adaptação da classificação dos solos brasileiros à classificação proposta pelo SCS, a partir da nova nomenclatura no Sistema Brasileiro de Classificação dos solos, com base na pedologia observada no Estado de São Paulo. As Tabelas referentes a essa classificação estão em Anexo.

O mapa pedológico presente no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Município de São Carlos (PMSC, 2011), permite a visualização da pedologia predominante das três bacias estudadas no presente trabalho (Figura 14).

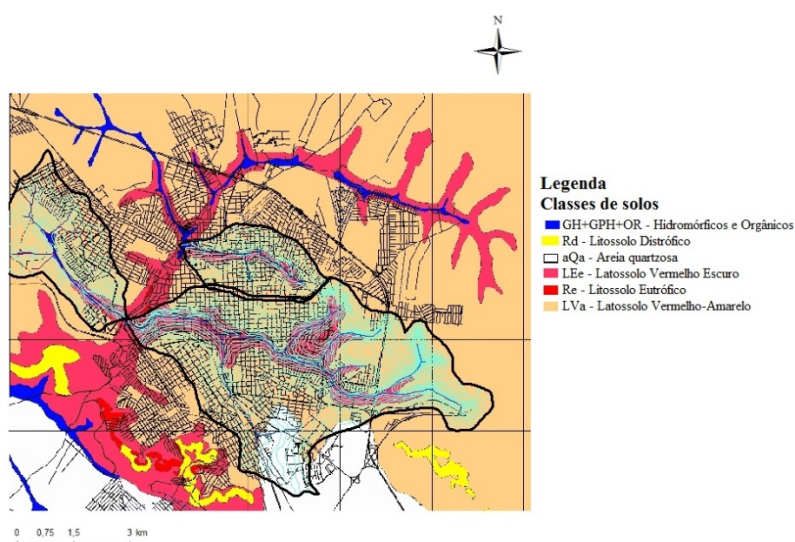


Figura 14: Identificação dos solos que compõem a área de estudo

Fonte: Adaptado de PMSC (2011)

Os solos que compõem a área de estudo são, então, predominantemente os latossolos vermelho amarelo e o latossolo vermelho escuro, que, de acordo com mapa pedológico realizado pela EMBRAPA, possuem textura média (MARTINS, 2012). Desta forma os solos das bacias em estudo enquadram-se pelo método SCS no grupo hidrológico B, segundo a classificação de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

4.2.5 Determinação do Tempo de Concentração T_c

Em dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Galbetti (2015) apresentou estudo no qual foi verificada a aderência de diversos tempos de concentração calculados por diferentes modelos aos dados observados para eventos de chuva na bacia do córrego do Mineirinho, na cidade de São Carlos. Com esse estudo o autor demonstra que, para essa bacia, o modelo que melhor aderiu aos eventos observados foi a Fórmula de Kirpich, sendo considerada adequada para estimar o tempo de concentração nas sub-bacias do córrego do Mineirinho.

Por ausência de bibliografia para as outras bacias estudadas, considerou-se a mesma Fórmula de Kirpich para o cálculo dos tempos de concentração para a sub-bacia do córrego do Gregório e para a bacia do Tijuco-Preto.

4.2.6 Outros parâmetros hidrológicos obtidos por meio de geoprocessamento

Além dos parâmetros relacionados ao uso e ocupação do solo, o uso da ferramenta do ArcGIS possibilitou também a obtenção dos parâmetros da área das bacias, comprimento dos talwegues e declividades dos canais das seguintes formas:

- O comprimento dos talwegues foi dado diretamente a partir do atributo *length* na tabela de atributos dos arquivos *shape* gerados pela ferramenta *HydroTools* que gerou a hidrografia a partir da topografia em m;
- A declividade média dos canais foi obtida a partir da divisão da diferença de cotas entre a nascente e o exutório observadas pela topografia e o comprimento dos talwegues em m/km;
- A área das bacias foi dada pelo atributo *area* da tabela de atributos dos polígonos que representavam a delimitação das bacias em km².

4.2.7 Determinação de parâmetros do software ABC6

O software ABC6 possui em seu banco de dados as equações de chuva-vazão para diversas regiões do Brasil, inclusive a equação de Barbassa (1991) para a região de São Carlos. Apesar de ter sido feita há mais de duas décadas, ela continua sendo utilizada para essa região.

Outro parâmetro de entrada do software é o “Intervalo”, que possibilita a escolha do intervalo de tempo para a discretização dos resultados. No presente trabalho, foi escolhido o intervalo de tempo de três minutos, o que tornou possível a identificação mais precisa do tempo de pico, por exemplo. Insere-se ainda como dado de entrada o período de retorno associado à tormenta de projeto.

O ABC6 possui ainda um módulo no qual é possível escolher o modelo utilizado para o cálculo da chuva excedente e o modelo de traçado de hidrograma de escoamento superficial direto. No presente trabalho, utilizou-se o modelo SCS para o cálculo da chuva excedente com o hidrograma triangular do SCS.

Além disso, inserem-se no módulo “Dados” informações relativas às características fisiográficas da bacia, como a relação IDF (tendo sido escolhida na biblioteca do *software* a equação desenvolvida por Barbassa (1991), a duração da tormenta de projeto, comprimento de talvegue, área da bacia e valor de CN.

5. Resultados e Discussão

5.1 Mapas temáticos de uso e ocupação

5.1.1 Classificação não-supervisionada

A ferramenta de *Iso Cluster Classification* permitiu a obtenção dos mapas de ocupação apresentados nas Figuras 15 a 17.

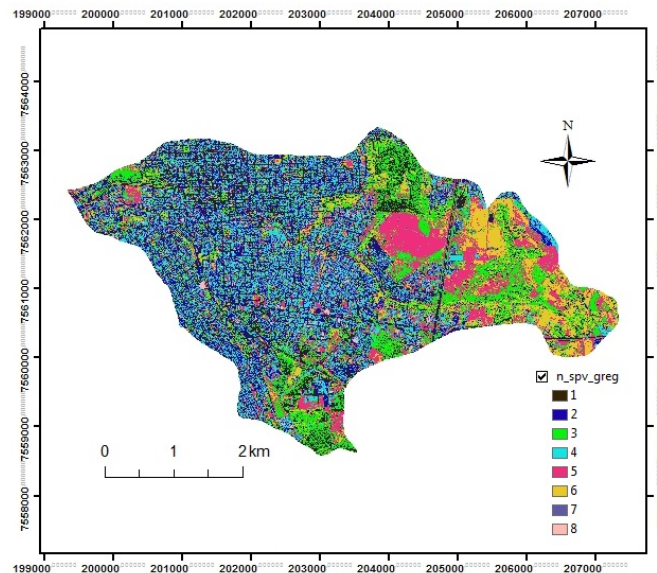


Figura 15: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego Gregório

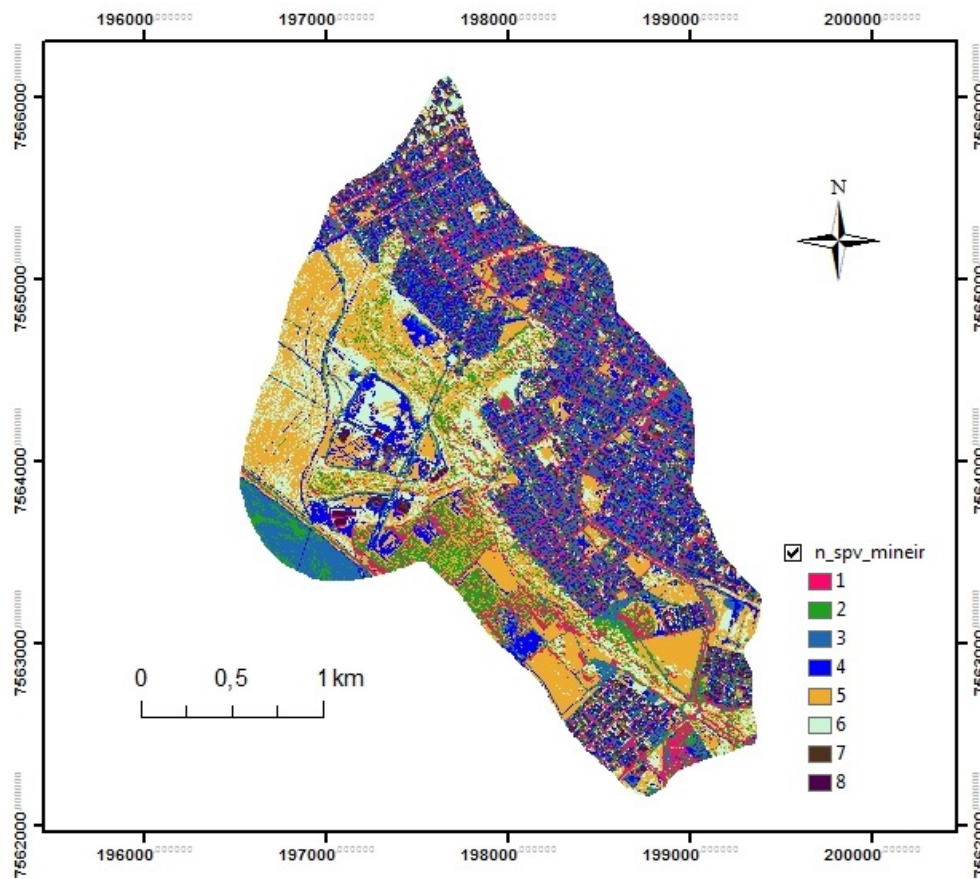


Figura 16: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego do Mineirinho

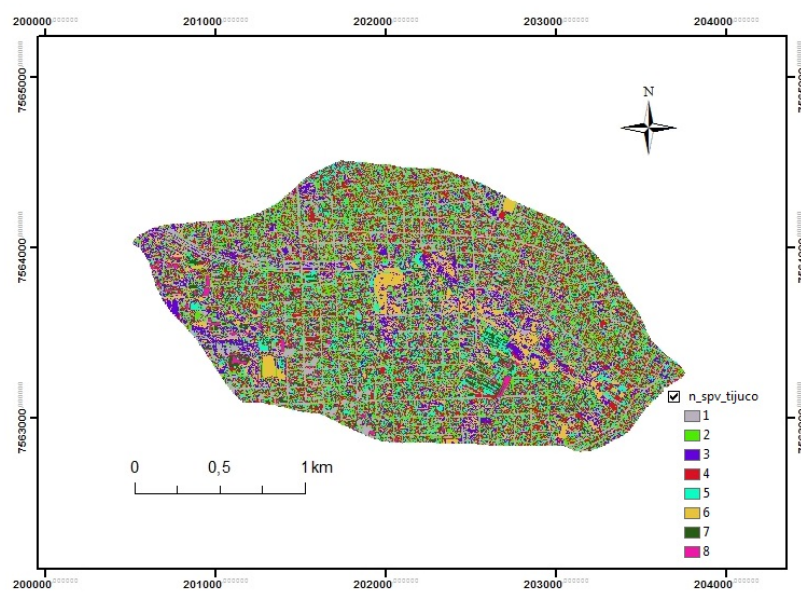


Figura 17: Resultado de Unsupervised Classification para a bacia do córrego do Tijuco-Preto

Como já citado anteriormente, a classificação não-supervisionada não gera classes de uso e ocupação. Ela gera categorias baseadas na resposta espectral dos pixels, cabendo ao usuário definir o que significam essas categorias.

É possível perceber ao se comparar a imagem de satélite com a gerada pela classificação não-supervisionada que as sombras geradas por prédios/árvores foram classificadas da mesma forma que as vias. Isso é compreensível, visto que os dois estão na mesma faixa espectral. Isso também demonstra a necessidade da criação da classe “sombra”, visto que essa não é uma classe de uso de solo, mas que aparece como consequência da geração de imagens de satélite. A alocação das regiões de sombra e de pavimento em uma mesma classe evidencia a necessidade de se realizar a classificação supervisionada.

5.1.2 Classificação supervisionada

Os mapas temáticos de uso e ocupação do solo para as bacias do córrego do Mineirinho, do Tijuco-Preto e para uma sub-bacia altamente urbanizada do córrego do Gregório gerados a partir da classificação supervisionada são apresentados nas Figuras 18 a 21.



Figura 18: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Mineirinho

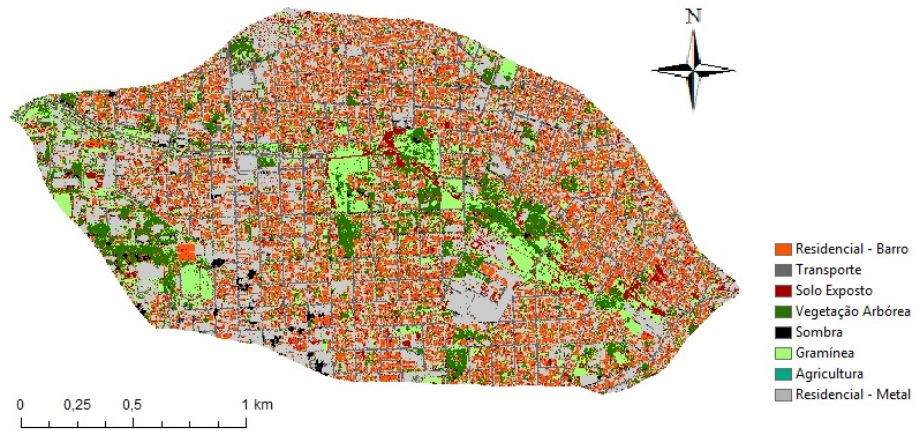


Figura 19: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Tijuco-Preto

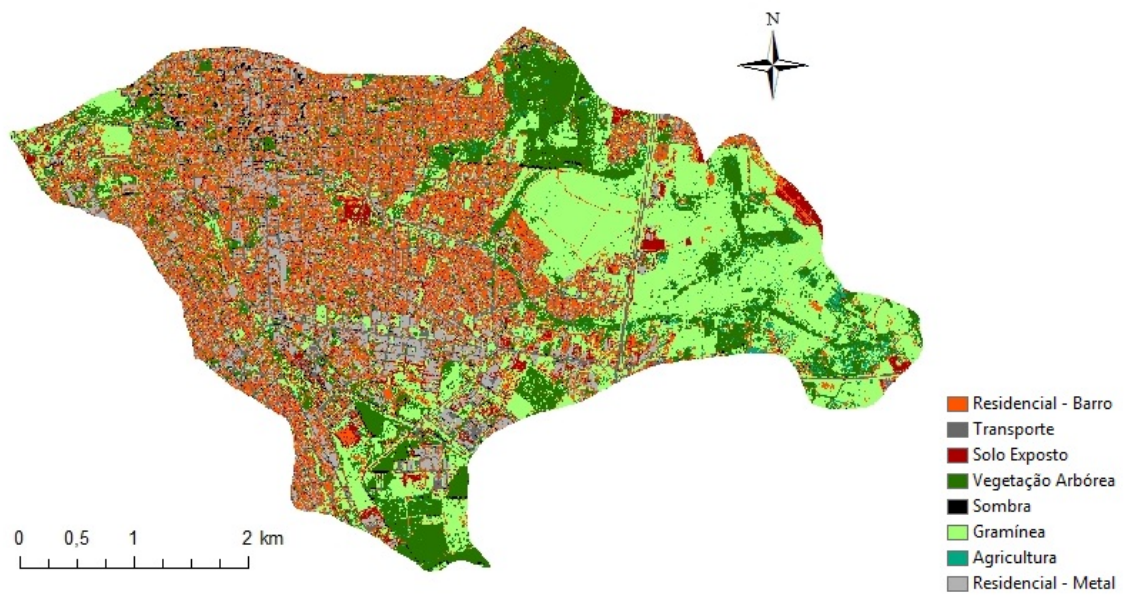


Figura 20: Resultado da classificação supervisionada para a bacia do córrego do Gregório



Figura 21: Resultado da classificação supervisionada para a subbacia urbanizada do córrego do Gregório

A classificação da bacia do córrego do Mineirinho permite observar que houve confusão entre a agricultura de espécies arbórea (pinus) e a vegetação arbórea, o que é razoável visto que as mesmas apresentam respostas espectrais semelhantes. Isso pode ser observado na região sudoeste da bacia (Figura 21).

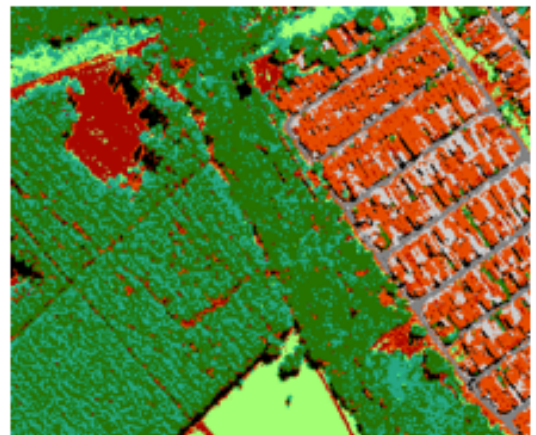


Figura 22: Detalhe para a classificação da bacia do córrego do Mineirinho

Analisando visualmente as Figuras 18 a 21 pode-se observar que a ferramenta conseguiu, por meio dos *training samples* fornecidos, fazer a distinção entre as sombras de edifícios/árvores e as vias pavimentadas. É natural que o *software* confunda classes que tenham respostas espectrais próximas, e quanto maior cuidado se tiver nas escolhas dos *training samples*, mais o usuário evita que isso ocorra. O grau com o que o *software* classifica erroneamente pode ser analisado pelas matrizes de confusão. Essas matrizes indicam a quantidade de pixels atribuída a uma dada classe pelos *training samples* que foram classificadas pelo *software* como uma classe diferente, ou ainda, que foram “confundidos” com outra classe. Assim, as matrizes de confusão, ou ainda, matrizes de erros, permitem a análise da precisão da classificação da imagem. As matrizes de confusão geradas para a classificação supervisionada estão apresentadas no Apêndice A e permitem verificar que a classificação foi feita com níveis de acerto satisfatórios, com ressalva para as classes de Gramínea e Agricultura, nas quais houve percentuais de erro mais elevados.

As áreas total e percentual encontradas para cada classe nas três bacias estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Áreas correspondentes a cada uma das classes propostas para as bacias estudadas

| | TIJUCO | | GREGÓRIO | | MINEIRINHO | | SUB BACIA GREGÓRIO | |
|---------------------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|
| Tipo de uso | Area (m ²) | Area (%) | Area (m ²) | Area (%) | Area (m ²) | Area (%) | Area (m ²) | Area (%) |
| Vegetação Arbórea | 416549 | 11,4 | 3213371 | 17,0 | 908317 | 15,5 | 144615 | 9,5 |
| Gramínea | 469298 | 12,8 | 5264478 | 27,9 | 1077108 | 18,4 | 118342 | 7,8 |
| Solo Exposto | 351746 | 9,6 | 895585 | 4,7 | 585958 | 10,0 | 456470 | 30,0 |
| Agricultura | | | 640534 | 3,4 | 824090 | 14,1 | | |
| Sombra | 62139 | 1,7 | 258449 | 1,4 | 224260 | 3,8 | 80303 | 5,3 |
| Residencial - Barro | 771204 | 21,0 | 4558557 | 24,1 | 1198353 | 20,5 | 338470 | 22,2 |
| Residencial - Metal | 1234889 | 33,7 | 2116309 | 11,2 | 661929 | 11,3 | 230411 | 15,1 |
| Transporte | 359395 | 9,8 | 1939987 | 10,3 | 371580 | 6,4 | 154319 | 10,1 |
| | | | | | | 100 | | |
| Total | 3665218 | | 18887271 | | 5851595 | | 1522929 | |

5.2 Cálculo dos valores de número de deflúvio para cada bacia

A partir desses valores percentuais de cada uso, podem-se determinar os valores do número de deflúvio (CN) do método SCS de cada bacia, que serão base para o

cálculo do escoamento direto e hidrogramas de cheia. Os valores utilizados na dissertação de Martins (2012) e os publicados pelo USDA serviram como base para o cálculo dos valores de CN neste trabalho (Tabela 4).

Tabela 4: Número de deflúvio para cada tipo de cobertura

| Tipo de uso | CN |
|---------------------|-----------|
| Vegetação Arbórea | 55 |
| Gramínea | 65 |
| Solo Exposto | 82 |
| Agricultura | 78 |
| Sombra | - |
| Residencial - Barro | 98 |
| Residencial - Metal | 98 |
| Transporte | 98 |

Fonte: Adaptado de Martins (2012) e USDA (2004)

Não foi atribuído valor de CN para a classe *Sombra* da imagem classificada, sendo a área dessa classe desconsiderada ao se calcular o número de deflúvio médio para cada uma das bacias, ou seja, a área da bacia utilizada para o cálculo como sendo $A = A_{\text{total}} - A_{\text{sombras}}$. Desta forma, atribui-se ao cálculo um erro proporcional à área de sombras, de forma que quanto maior a área de sombras das imagens, maior o erro associado. Esse método busca, entretanto, minimizar esse erro, visto que desconsiderar a área referente às sombras é o mesmo que atribuir a esta um número de deflúvio igual ao CN médio da bacia (MARTINS, 2012).

Os valores médios de CN para cada bacia são calculados a partir da média ponderada dos valores de CN para cada classe de uso. Com isso, os valores médios de CN encontrados para as bacias dos córregos do Mineirinho, Tijuco-Preto e sub-bacia do Gregório foram 80, 87 e 91 respectivamente.

5.3 Cálculo do tempo de concentração T_c para cada bacia

A partir dos dados físicos de comprimento dos talvegues, e diferença de cotas entre os pontos mais à montante e mais à jusante das bacias foi possível calcular os seus respectivos tempos de concentração, que foram de 26,3 minutos para a subbacia do Gregório; 58,1 minutos para a bacia do Mineirinho e 40,8 minutos para a bacia do Tijuco-Preto.

5.4 Geração de hidrogramas de cheias

Enfim, foi possível gerar os hidrogramas de cheias para cada uma das três bacias, utilizando os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Um exemplo de hidrograma gerado no software ABC6 é apresentado na Figura 22.

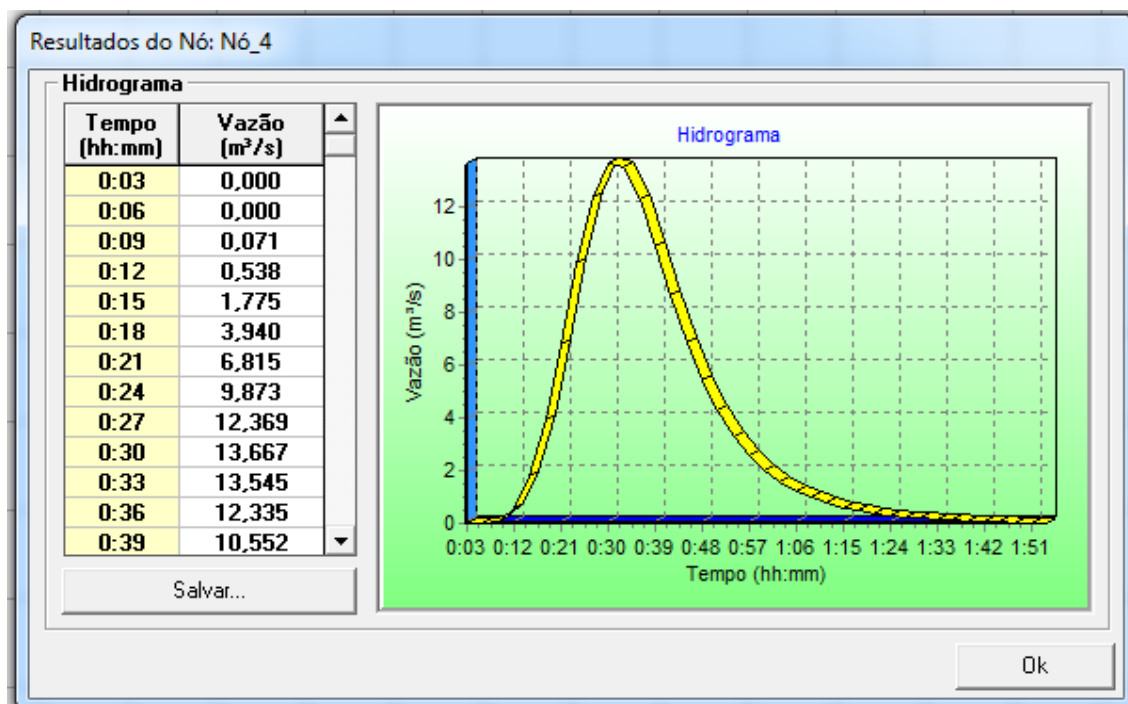


Figura 23: Hidrograma gerado para a sub-bacia do córrego do Gregório para tempo de retorno igual a 10 anos

A partir dos hidrogramas gerados no ABC6 para todos os tempos de retorno para cada uma das três bacias manipulou-se os dados no Excel para gerar resultados comparativos. A comparação entre os hidrogramas de diferentes bacias é feita a partir do cálculo da vazão específica, resultado da divisão da vazão pela área de drenagem da respectiva bacia, em $\text{m}^3/\text{s km}^2$. Dessa forma, isola-se o efeito da área da bacia e torna-se possível comparar os hidrogramas de bacias com diferentes áreas de drenagem. O hidrograma de vazão específica em função do tempo para o tempo de retorno de 2 anos está apresentado na Figura 23.

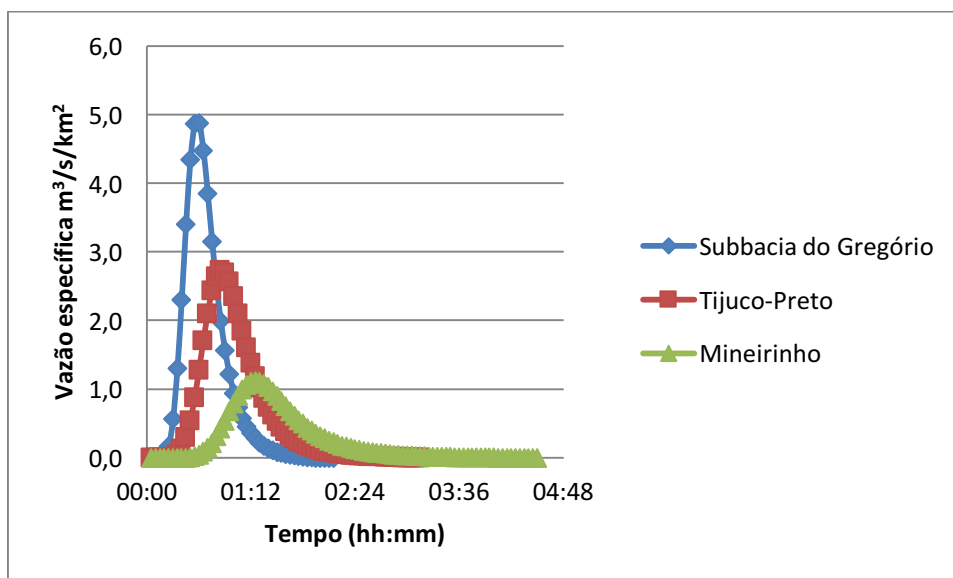


Figura 24: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 2 anos calculado pelo software ABC6

Os hidrogramas para os tempos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos são apresentados no Apêndice B. Tomando as vazões específicas máximas de cada uma das bacias para os tempos de retorno analisados, têm-se as vazões específicas máximas para as três bacias estudadas em função do tempo de retorno (Figura 24).

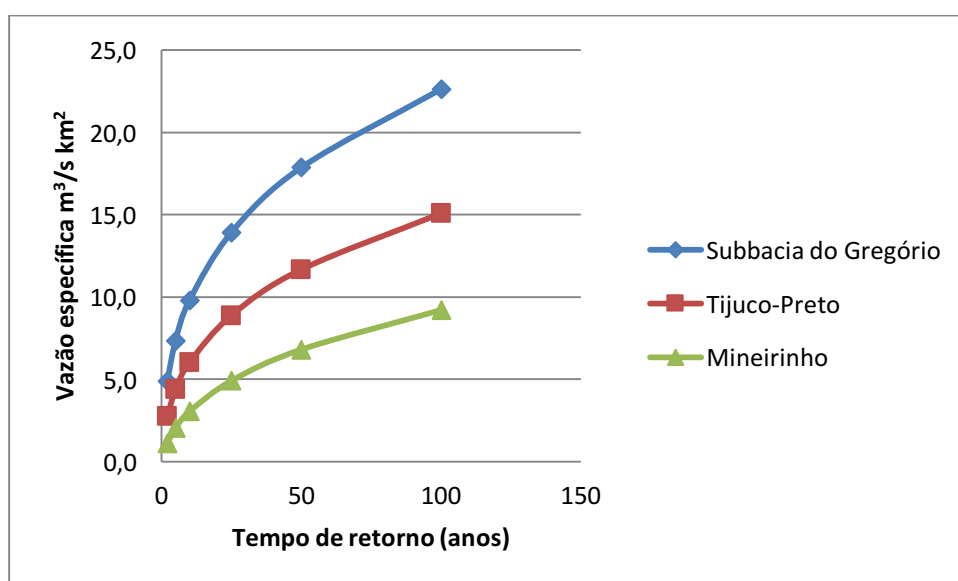


Figura 25: Vazões específicas máximas para as três bacias estudadas em função do tempo de retorno

Analisando-se os hidrogramas de vazão específica (Figura 23 e Apêndice) e a Figura 24, nota-se que o hidrograma referente à bacia do Gregório, em azul, para todos os tempos de retorno, possui uma maior vazão máxima específica, além de um tempo de pico menor, se assemelhando mais ao hidrograma hipotético referente às áreas urbanizadas exemplificado na Figura 2. O hidrograma referente à bacia do córrego do Mineirinho é mais “suave”, mais próximo do hidrograma hipotético referente a áreas não urbanizadas, também exemplificado na Figura 2, com menor vazão máxima e maior tempo de pico. O hidrograma do córrego do Tijuco-Preto é um caso intermediário entre os dois, para todos os tempos de retorno.

O que se percebe também, com auxílio do gráfico na Figura 23, é que existe uma relação decrescente entre a vazão de pico e o tempo de concentração, sendo que quanto maior for o tempo de concentração, menor é a vazão de pico; visto que a bacia do córrego do Mineirinho apresenta o maior tempo de concentração e o hidrograma mais suavizado. Além disso, observa-se também que com o aumento do tempo de concentração, o pico do hidrograma desloca-se para a direita, o que significa um retardamento no tempo de pico.

A Figuras 25 mostra os volumes escoados em cada uma das três bacias. O volume escoado foi obtido através do hidrogramas gerados, sendo que o volume escoado corresponde à integral das curvas das vazões, calculada a partir da área sobre a curva pelo método dos trapézios.

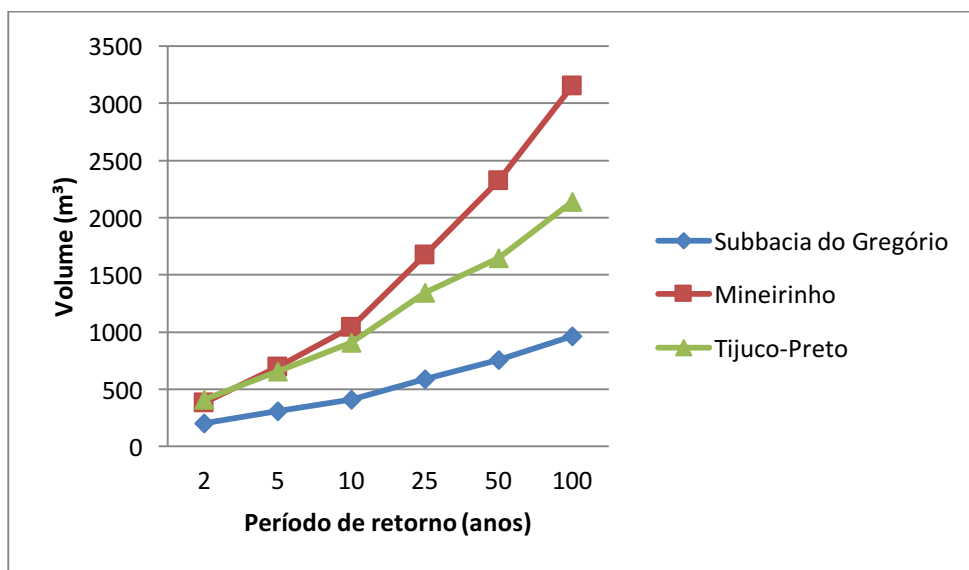


Figura 26: Volume escoado (m^3) nas bacias do córrego do Mineirinho, do Tijuco-Preto e da sub-bacia do córrego do Gregório para os diferentes tempos de retorno

Existe uma relação diretamente proporcional entre os volumes escoados na bacia e a área de drenagem, uma vez que a altura da chuva excedente é constante para cada tempo de retorno, e o volume escoado pode ser dado pela multiplicação da altura da chuva excedente e a área de drenagem da bacia.

O nível de impermeabilização da bacia também mostrou forte relação aos dados encontrados. Como mostrado no item 5.3, usos que impliquem na impermeabilização do solo causam um aumento no valor do CN da bacia, o que por sua vez significa que uma maior parcela da precipitação total será convertida em escoamento superficial direto. Isso tem direta relação tanto com as vazões específicas quanto com o volume total escoado nos diferentes eventos de precipitação.

Além disso, a análise da Figura 25 permite perceber que a variação dos volumes escoados para as diferentes bacias diferem em função do período de retorno, sendo que quanto menor o período de retorno maior a variação do valor da vazão. A derivada da curva do volume escoado em função do tempo de retorno, para as três bacias, é maior para os menores tempos de retorno e decresce à medida que o último aumenta.

6. Considerações Finais

A primeira parte da pesquisa possibilitou o desenvolvimento de habilidades na área de geoprocessamento, desde a geração de MDTs por diferentes métodos, além do entendimento do que seja um MDT hidrologicamente consistente, gerado pelo *Topo to Raster*, que permite o correto funcionamento das ferramentas presentes no pacote Arc Hydro. Possibilitou, ainda, o entendimento de geração de dados hidrológicos, a partir da utilização do pacote Arc Hydro bem como pela manipulação dos dados por ele gerados.

Foi possível ainda o entendimento dos diferentes métodos de classificação presentes no ArcGIS, como a classificação supervisionada e a não-supervisionada. As duas foram executadas para título de comparação. Pode-se observar que a classificação não-supervisionada se mostrou menos sensível a áreas com respostas espectrais semelhantes, como foi o caso de sombras e vias pavimentadas. Com isso pode-se decidir pela classificação semiautomática supervisionada como a mais adequada para a realização da classificação de uso e ocupação do solo da área estudada. O efeito da “confusão” entre as vias pavimentadas e as áreas de sombra demonstrou também a importância da criação da classe “Sombra”, que não representa um uso efetivo do solo, mas que é um efeito das imagens de satélite. Apesar do efeito indesejável para a classificação, sua área é pequena se comparada à área total, além de que as sombras têm papel importante para a classificação de imagens por possibilitarem a noção de tridimensionalidade do espaço.

Percebeu-se ainda a necessidade da validação da classificação feita, através da criação de polígonos de validação e a geração de matrizes de confusão. As matrizes de confusão indicam o índice de acerto da classificação para os polígonos de validação, índice este considerado equivalente ao acerto da classificação para a totalidade da bacia. Os índices de acerto encontrados, como pode ser visto no Apêndice A, permite a conclusão de que a classificação foi feita de forma satisfatória, com ressalva para algumas classes de resposta espectral próximas, nas quais houve índices de confusão mais elevados.

Uma boa classificação permite uma boa determinação dos valores de número de deflúvio para as bacias, determinados a partir das tabelas fornecidas pelo USDA em Anexo 1 bem como em dissertação de Martins (2012). Os valores de CN são obtidos através de média ponderada para os diferentes tipos de uso. Seria necessário, entretanto, validar a classificação verificando na literatura a partir de quais índices de acerto se considera que a classificação foi bem sucedida.

A transformação chuva-vazão é possível através de equações que relacionem a intensidade da chuva, sua duração e frequência, ou ainda, as relações IDF, sendo que essa relação foi desenvolvida em tese por Barbassa (1991) para a região de São Carlos. Os eventos de chuva simulados pelo ABC6 consideram a chuva homogênea em toda a área da bacia.

Calculou-se o tempo de concentração das bacias, considerando-se que a duração das chuvas seja igual a esse valor. Galbetti (2015) calculou a aderência de diversas fórmulas para o cálculo de T_c e observou que a fórmula de Kirpich foi a de melhor aderência a eventos de chuva observados na cidade de São Carlos. Por esse motivo, essa foi a fórmula utilizada para o cálculo do T_c nas três bacias estudadas.

Por fim, pôde-se comparar os hidrogramas de vazão específica para as três bacias para chuvas de diferentes tempos de retorno, além dos gráficos de volume escoado, e pode-se verificar a influência do T_c e do valor de CN nos resultados. Percebeu-se a relação entre o tempo de concentração e a vazão e tempo de pico, bem como a relação que o tempo de concentração e o número de deflúvio têm com o potencial de produção de cheias. Quanto maior o tempo de concentração, mais amortecido se torna o hidrograma e, portanto, menor a vazão de cheia; enquanto que quanto menor o tempo de concentração, maior a vazão de pico associada. O número de deflúvio tem relação com a parcela da chuva precipitada que é convertida em volume escoado, sendo que quanto maior o CN, maior será a vazão de pico. Desta forma, a bacia do córrego do Gregório tem os dois parâmetros (CN e tempo de concentração) influenciando de forma a aumentar sua vazão de pico.

7. Conclusão

A resposta hidrológica da bacia está fortemente relacionada ao efeito do uso e ocupação da mesma, o qual determina o valor de CN, que está associado com o total precipitado que será convertido em escoamento superficial direto. Uma maior urbanização está associada a um maior nível de impermeabilização da superfície, o que resulta em um maior valor de CN.

A subbacia do Gregório, a mais urbanizada das três analisadas, apresentou uma maior vazão de pico e um menor tempo de pico, para todos os tempos de retorno. A bacia do Mineirinho, por sua vez, apresentou uma menor vazão de pico e um maior tempo de pico, para todos os tempos de retorno. A bacia do Tijuco-Preto, que apresentou um valor de CN intermediário, apresentou também uma resposta hidrológica intermediária.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, L. H. C., BARBOSA, A. M., CARVALHO, W., CHAGAS, C. S., PINHEIRO, H. S. K., **Determinação de pontos amostrais através de atributos do terreno para mapeamento digital dos solos da bacia hidrográfica do Rio Guapi-Macacu, RJ.** In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, 2011.
- APRÍGIO, P.O. **Avaliação de modelos de simulação de cargas difusas em bacias hidrográficas.** 2012. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre drenagem pluvial na cidade de São Carlos, SP.** 1991. 328f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 1991.
- BETTINE, S. C.; SEBUSIANI, H. R. V. Metodologia de análise do uso e ocupação do solo em micro bacia urbana. **Revista Brasileira de Gestão de Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, p. 256-285, jan-abri/2011.
- BIDONE, F.R.A.; TUCCI, C.E.M. Microdrenagem. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Org). **Drenagem urbana.** Porto Alegre: ABRH; Ed.UFRGS, 1995.
- BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts.182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 11 jul. 2001. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm>. Acesso em: 20 de janeiro de 2016.
- BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 8 jan. 2007. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 20 de janeiro de 2016.
- BRESSIANI, D.A. et al. Análise hidrológica de duas sub-bacias urbanas- São Carlos-SP. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2012.
- CÂMARA, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos. São José dos Campos. Tese de doutorado em computação aplicada – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1995. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto/> Acesso em 20 de julho de 2016.
- CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CENTENO, J.A.; PACHÊCO, A.P. Classificação de sombra em imagens orbitais e aéreas utilizando uma matriz de co-ocorrência modificada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.17, 2011. Disponível em:<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/bcg/article/view/21159/13961>>. Acesso em: 7 dez. 2015.

DECINA, T.G.T. **Análise de medidas de controle de inundação a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos - SP.** 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

EHLERS, M. Sensoriamento remoto para usuários de SIG – Sistemas sensores e métodos: entre as exigências do usuário e a realidade. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. (Org). **Sensoriamento remoto e SIG avançados.** São Paulo: Oficina de textos, 2007.

EM-DAT THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE. **Country Profile on natural disasters.** Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 27 jun. 2016.

FANG, X.; THOMPSON, et al. **Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 134, n. April, p. 202–211, 2008.

GALBETTI, M.V. **Comparação dos modelos hidrológicos presentes no SSD ABC6 aplicados a uma bacia urbana.** 2015. 133p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atendimento ao usuário: O satélite LANDSAT.** Divisão de geração de Imagens. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2000.** São Paulo: IBGE, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010.** São Paulo: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Introdução ao processamento digital de imagens.** Rio de Janeiro, 2001. (Manuais técnicos em geociências, 9). Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ManuaisdeGeociencias/Introducao%20ao%20Processamento%20Digital%20de%20imagens.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2015.

JÚNIOR, J. E. F. F.; BOTELHO, R. G. M. **Análise comparativa do tempo de concentração: Um estudo de caso na bacia do Rio Cônego, Município de Nova Friburgo, RJ.** In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais... Maceió: 2011.

MARTINS, L.G.B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana.** 2012. 115p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MARTINS, J.R. Obras de macrodrenagem. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Org). **Drenagem urbana.** Porto Alegre: ABRH; Ed.UFRGS, 1995.

MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.** Chichester: John Wiley, 1999.

MELO, D.H.C.T.B. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. 2002. 146p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Especiais, São José dos Campos, 2002.

MENDES, H.C.; MENDIONDO, E.M. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da bacia do Gregório, São Carlos – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.1, p.17-27, 2007.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

PARECE, T.; CAMPBELL, J.B.; McGEE, J. **Remote sensing analysis in an ArcMap environment**. Blacksburg: VirginiaView, 2015.

PORTO, R.L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Org). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH; Ed.UFRGS, 1995.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. Secretaria Municipal de Obras. SHS Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. **Plano diretor de drenagem urbana ambientalmente sustentável**. São Carlos, 2010. (Relatório Síntese, 1).

RIGHETO, J.M.; BARROS, R.M.; MENDIONDO, E.M. Avaliação da seguridade e percepção pública sobre os riscos de enchentes em várzeas urbanizadas: o caso do micro-centro da cidade de São Carlos – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., Curitiba, 2003. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003. CD-Rom.

ROLNIK, R. Morar, atuar e viver. **Teoria e Debate**, v.9, p.98-119, 1990.

SANTOS, M. **A Urbanização brasileira**. 5.ed. São Paulo: Edusp, 2005.

SÃO CARLOS (Cidade). **Lei nº 13.691, de 25 de novembro de 2005**. Institui o plano diretor do município de São Carlos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/pdf/Lei_13691_05_Plano_Diretor.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2016.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. Campinas, 2004. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A.M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.4, p.5-18, 2005.

SILVEIRA, G.M. **Análise da sensibilidade de hidrogramas de projeto aos parâmetros de sua definição indireta**. 2010. 244p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TUCCI, C.E.M. Inundações urbanas. In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. (Org). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH; Ed.UFRGS, 1995.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Natural Resources Conservation Services. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. **National Engineering Handbook**. Washington: NRCS, 2004. Cap.10.

VASCONCELOS, C.H.; NOVO, E.M.L.M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens - fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazonica**, v.34, n.3, p.487-493, 2004. Disponível em:<<http://www.scielo.br/pdf/aa/v34n3/v34n3a14.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

**ANEXO A: VALORES DE CN PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO SOLO (USDA,
2004)**

Tabela 5: Valores de CN para áreas urbanas

| Cover description | percent impervious area ¹ | group | | | |
|--|--|-------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Fully developed urban areas (vegetation established) | | | | | |
| Open space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) | | | | | |
| Poor condition (grass cover < 50%) | | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Fair condition (grass cover 50% to 75%) | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Good condition (grass cover > 75%) | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Impervious areas: | | | | | |
| Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way). | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Streets and roads: | | | | | |
| Paved; curbs and storm sewers (excluding right-of-way) | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Paved; open ditches (including right-of-way) | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| Gravel (including right-of-way) | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Dirt (including right-of-way) | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Western desert urban areas: | | | | | |
| Natural desert landscaping (pervious areas only) | | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Artificial desert landscaping (impervious weed barrier, desert shrub with 1- to 2-inch sand or gravel mulch and basin borders) | | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Urban districts: | | | | | |
| Commercial and business | 85 | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Industrial | 72 | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Residential districts by average lot size: | | | | | |
| 1/8 acre or less (town houses) | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 1/4 acre | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 1/3 acre | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 1/2 acre | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 1 acre | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 2 acres | 12 | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Developing urban areas | | | | | |
| Newly graded areas (pervious areas only no vegetation) | | 77 | 86 | 91 | 94 |

¹ The average percent impervious area shown was used to develop the composite CN's. Other assumptions are as follows: impervious areas are directly connected to the drainage system, impervious areas have a CN of 98, and pervious areas are considered equivalent to open space in good hydrologic condition.

Tabela 6: Valores de CN para áreas agrícolas

| Cover type | Cover description | | CN for hydrologic soil group | | | |
|--|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|----|----|----|
| | Treatment ² | Hydrologic condition ³ | A | B | C | D |
| Fallow | Bare soil | - | 77 | 86 | 91 | 94 |
| | Crop residue cover (CR) | Poor | 76 | 85 | 90 | 93 |
| | | Good | 74 | 83 | 88 | 90 |
| Row Crops | Straight rows (SR) | Poor | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | | Good | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | SR + CR | Poor | 71 | 80 | 87 | 90 |
| | | Good | 64 | 75 | 82 | 85 |
| | Contoured (C) | Poor | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | | Good | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | C + CR | Poor | 69 | 78 | 83 | 87 |
| | | Good | 64 | 74 | 81 | 85 |
| | Countered & Terraced (C & T) | Poor | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | | Good | 62 | 71 | 78 | 81 |
| | C & T + CR | Poor | 65 | 73 | 79 | 81 |
| | | Good | 61 | 70 | 77 | 80 |
| Small Grain | SR | Poor | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | | Good | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | SR + CR | Poor | 64 | 75 | 83 | 86 |
| | | Good | 60 | 72 | 80 | 84 |
| | C | Poor | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | | Good | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | C + CR | Poor | 62 | 73 | 81 | 84 |
| | | Good | 60 | 72 | 80 | 83 |
| | C & T | Poor | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | | Good | 59 | 70 | 78 | 81 |
| | C & T + CR | Poor | 60 | 71 | 78 | 81 |
| | | Good | 58 | 69 | 77 | 80 |
| Close-seeded or broadcast legumes or rotation meadow | SR | Poor | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | | Good | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | C | Poor | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | | Good | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | C & T | Poor | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | | Good | 51 | 67 | 76 | 80 |

² Crop residues apply only if residue is on at least 5% of the surface throughout the year.

³ Hydrologic condition is based on combination factors that affect infiltration and runoff, including (a) density and canopy of vegetative areas, (b) amount of round cover, (c) amount of grass or close-seeded legumes, (d) percent of residue cover on the land surface (good $\geq 20\%$) and (e) degree of surface roughness.

Poor: Factors impair infiltration and tend to increase runoff. Good: Factors encourage average and better than average infiltration and tend to decrease runoff.

Tabela 7: Valores de CN para outros tipos de áreas agrícolas

| Cover description | | CN for hydrologic soil group | | | |
|--|----------------------|------------------------------|----|----|----|
| Cover type | Hydrologic condition | A | B | C | D |
| Pasture, grassland, or range continuous forage for grazing. ⁴ | Poor | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Fair | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Good | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Meadow - continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay. | - | 30 ⁵ | 58 | 71 | 78 |
| Brush - brush-weed-grass mixture with brush the major element. ⁶ | Poor | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | Fair | 35 | 56 | 70 | 77 |
| | Good | 30 | 48 | 65 | 73 |
| Woods - grass combination (orchard or tree farm). ⁷ | Poor | 57 | 73 | 82 | 86 |
| | Fair | 43 | 65 | 76 | 82 |
| | Good | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Woods. ⁸ | Poor | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Fair | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Good | 30 | 55 | 70 | 77 |
| Farmsteads - buildings, lanes, driveways, and surrounding lots. | - | 59 | 74 | 82 | 86 |

⁴ Poor: < 50% ground cover or heavily grazed with no mulch. Fair: 50 to 75% ground cover and not heavily grazed. Good: > 75% ground cover and lightly or only occasionally grazed.

⁵ Actual curve number is less than 30; use CN equal 30 for runoff computations

⁶ Poor: < 50% ground cover. Fair: 50 to 75% ground cover. Good: > 75% ground cover.

⁷ CN's shown were computed for areas with 50% woods and 50% grass (pasture) cover. Other combinations of conditions may be compute from the CN's for woods and pasture.

⁸ Poor: Forest litter, small trees, and brush are destroyed by heavily grazing or regular burning. Fair: Woods are grazed but not burned, and some forest litter covers the soil. Good: Woods are protected from grazing, and litter and brush adequately cover the soil.

**ANEXO B: CLASSIFICAÇÃO HIDROLÓGICA DO SOLO PARA AS CONDIÇÕES
BRASILEIRAS (SARTORI, 2004 apud GENOVEZ et al., 2005)**

Grupo Hidrológico A

- ✓ Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm);
- ✓ Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão;
- ✓ Solos porosos com baixo gradiente textural ($< 1,20$);
- ✓ Solos de textura média;
- ✓ Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil;
- ✓ Solos bem drenados ou excessivamente drenados;
- ✓ Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
- ✓ A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.

Grupo Hidrológico B

- ✓ Solos profundos (100 a 200 cm);
- ✓ Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão;
- ✓ Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;
- ✓ Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso;
- ✓ Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil;
- ✓ Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
- ✓ A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMA-RELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.

Grupo Hidrológico C

- ✓ Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm);
- ✓ Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;
- ✓ São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;
- ✓ Solos associados a argila de atividade baixa (Tb);
- ✓ A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo o:

ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBIS-SOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.

Grupo Hidrológico D

- ✓ Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão;
- ✓ Solos rasos (prof. < 50 cm);
- ✓ Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1;
- ✓ Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta);
- ✓ Solos orgânicos.

Enquadra-se neste grupo o:

NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

APÊNDICE A – MATRIZES DE CONFUSÃO PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

Tabela 8: Matriz de confusão gerada para classificação do córrego do Tijuco-Preto

| | Veg. Arbórea | Gramínea | Sombra | Res. Barro | Solo Exposto | Res. Metal | Transporte |
|--------------|--------------|----------|--------|------------|--------------|------------|------------|
| Veg. Arbórea | 1841 | 145 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gramínea | 216 | 2853 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Sombra | 0 | 0 | 931 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Res. Barro | 0 | 0 | 1 | 1721 | 115 | 0 | 4 |
| Solo Exposto | 0 | 0 | 0 | 248 | 1122 | 0 | 0 |
| Res. Metal | 0 | 0 | 40 | 42 | 0 | 2421 | 13 |
| Transporte | 0 | 0 | 68 | 0 | 0 | 0 | 2720 |
| Acerto (%) | 90,0 | 95,0 | 90,0 | 86,0 | 91,0 | 100,0 | 99,0 |
| Erro (%) | 10,0 | 5,0 | 10,0 | 14,0 | 9,0 | 0 | 1,0 |

Tabela 9: Matriz de confusão gerada para classificação do córrego do Gregório

| | Res. Barro | Transporte | Solo Exposto | Veg. Arbórea | Sombra | Gramínea | Agricultura | Res. Metal |
|--------------|------------|------------|--------------|--------------|--------|----------|-------------|------------|
| Res. Barro | 4723 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| Transporte | 6 | 1082 | 5 | 202 | 58 | 0 | 0 | 15 |
| Solo Exposto | 312 | 0 | 2333 | 0 | 0 | 86 | 0 | 16 |
| Veg. Arbórea | 0 | 2 | 0 | 3417 | 0 | 0 | 0 | 244 |
| Sombra | 506 | 0 | 0 | 0 | 1756 | 93 | 63 | 0 |
| Gramínea | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1826 | 27 | 0 |
| Agricultura | 31 | 0 | 0 | 0 | 55 | 57 | 194 | 0 |
| Res. Metal | 49 | 0 | 14 | 0 | 0 | 41 | 0 | 4528 |
| Acerto (%) | 84,0 | 100 | 99,0 | 94,0 | 94,0 | 87,0 | 68,0 | 94,0 |
| Erro | 16,0 | 0 | 1,0 | 6,0 | 6,0 | 13,0 | 32,0 | 6,0 |

Tabela 10: Matriz de confusão gerada para a classificação do córrego do Mineirinho

| | Veg. Arbórea | Sombra | Res. Metal | Res. Barro | Transporte | Solo Exposto | Agricultura | Gramínea |
|--------------|--------------|--------|------------|------------|------------|--------------|-------------|----------|
| Veg. Arbórea | 1148 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 128 | 164 |
| Sombra | 0 | 802 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Res. Metal | 0 | 0 | 1863 | 0 | 98 | 0 | 0 | 0 |
| Res. Barro | 0 | 35 | 0 | 809 | 1 | 223 | 0 | 0 |
| Transporte | 0 | 0 | 0 | 0 | 1166 | 0 | 0 | 0 |
| Solo Exposto | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 1161 | 0 | 0 |
| Agricultura | 202 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 442 | 73 |
| Gramínea | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 53 | 1041 |
| Acertos (%) | 84,0 | 94,0 | 100 | 100 | 92,0 | 84,0 | 71,0 | 81,0 |
| Erros | 16,0 | 6,0 | 0 | 0 | 8,0 | 16,0 | 29,0 | 19,0 |

**APÊNDICE B – HIDROGRAMAS DE VAZÃO ESPECÍFICA PARA TEMPOS DE RETORNO
DE 5, 10, 25, 50 E 100 ANOS**

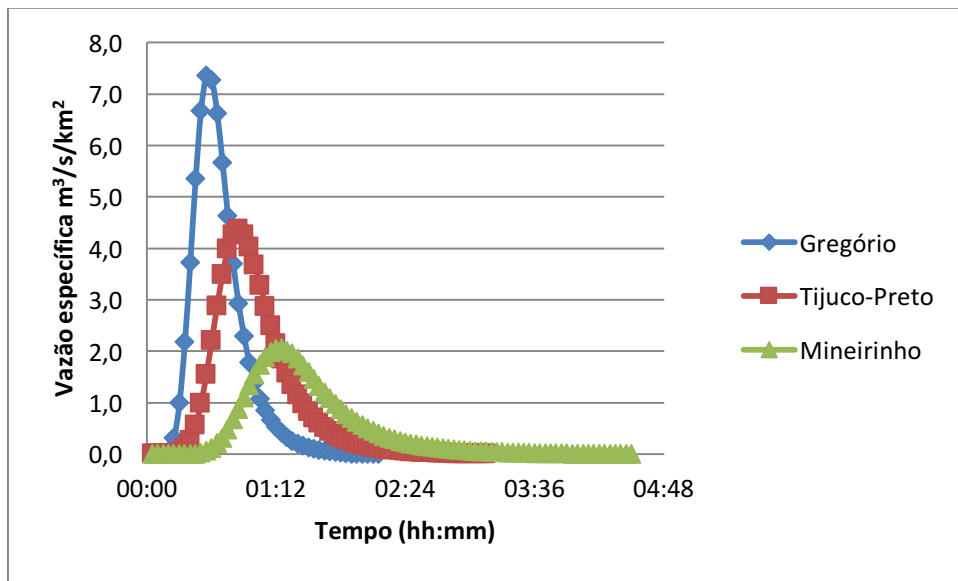


Figura 27: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 5 anos calculado pelo software ABC6

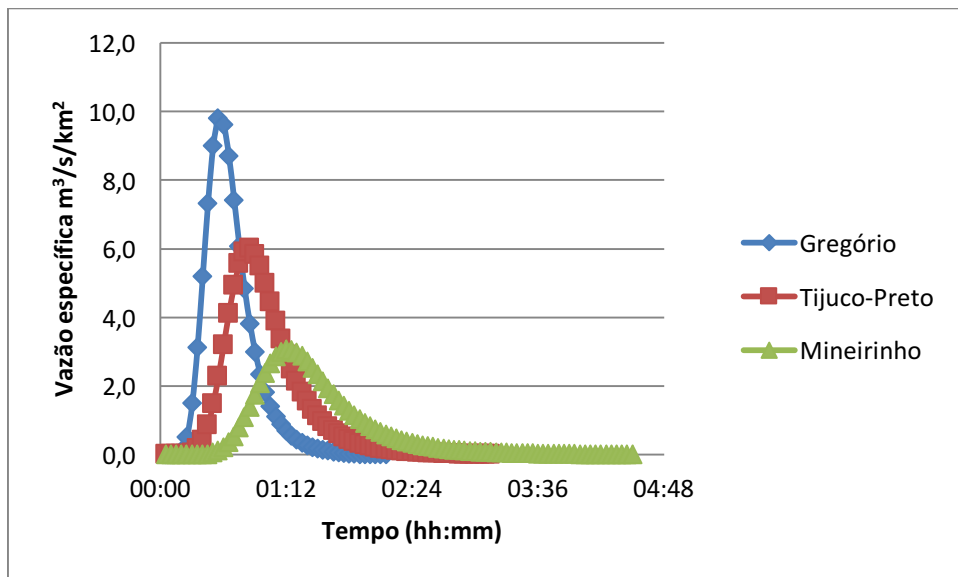


Figura 28: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 10 anos calculado pelo software ABC6

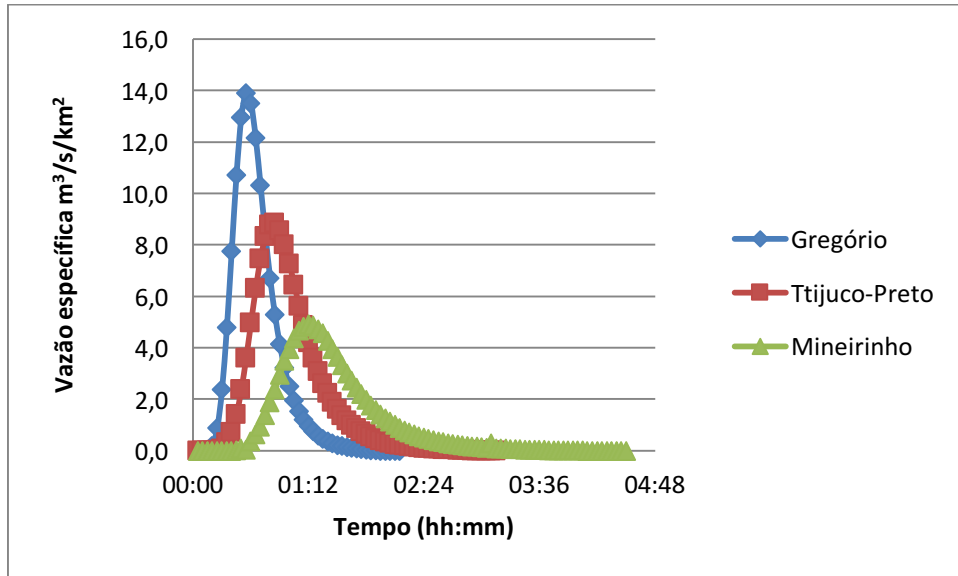


Figura 29: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 25 anos calculado pelo software ABC6

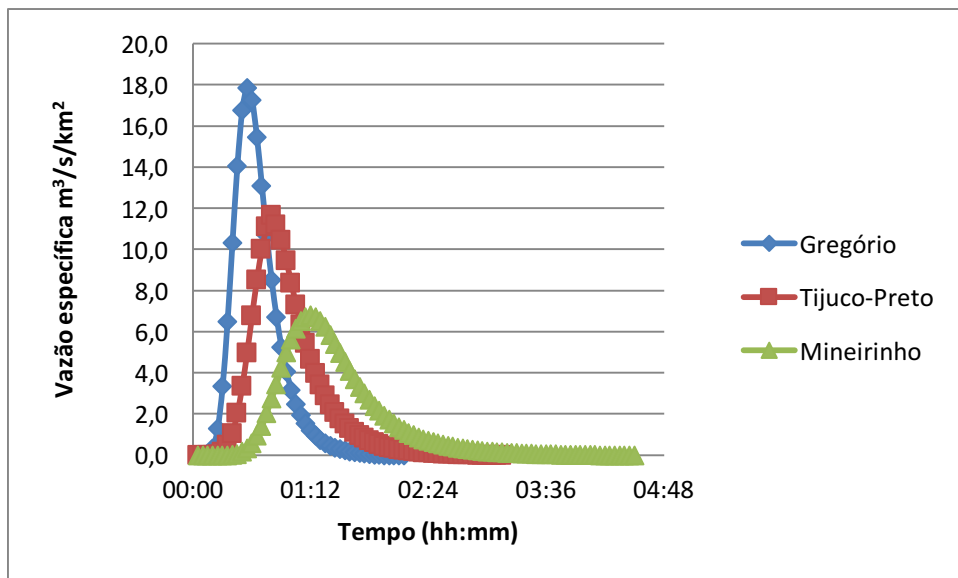


Figura 30: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 50 anos calculado pelo software ABC6

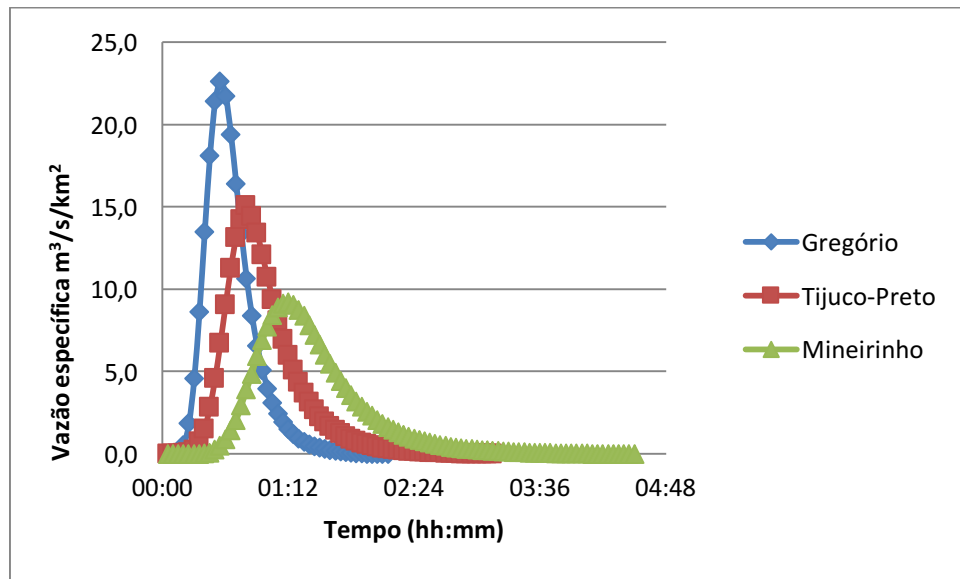


Figura 31: Vazão específica x Tempo para período de retorno de 100 anos calculado pelo software ABC6