

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Maurício Vinícios Oliveira de Souza

Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes
em São José dos Campos

Trabalho de Graduação
2013

Curso de Engenharia
Civil-Aeronáutica

Maurício Vinícios Oliveira de Souza

**Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes em
São José dos Campos**

Orientadora
Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk (ITA)

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Souza, Maurício Vinícios Oliveira
Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes em São José dos Campos / Maurício
Vinícios Oliveira de Souza.
São José dos Campos, 2013.
75f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013. Orientadora: Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk

1. Macrodrenagem. 2. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 3. Modelagem hidrológica IPHS1. I.
II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. III. Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes
em São José dos Campos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, Maurício Vinícios Oliveira. **Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes em São José dos Campos**. 2013. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maurício Vinícios Oliveira de Souza

TÍTULO DO TRABALHO: Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes em São José dos Campos.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2013

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Maurício Vinícios O. de Souza

Maurício Vinícios Oliveira de Souza
Rua da Abolição, 87 – Vila Sanches
12.245-500 – São José dos Campos, SP

MODELAGEM HIDROLÓGICA DE UMA REGIÃO AFETADA POR ENCHENTES EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

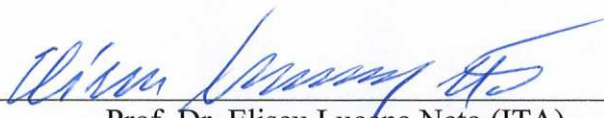
Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Maurício Vinícios Oliveira de Souza
Autor



Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk (ITA)
Orientadora



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto (ITA)
Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 14 de Novembro de 2013

*Dedico este trabalho aos meus pais,
pelo amor incondicional.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pela educação que tive, pelos valores morais e culturais que me foram ensinados, pelos exemplos de honestidade, dedicação, força de vontade e respeito, que sempre tive dentro de casa.

Agradeço aos outros membros da família, aos meus queridos irmãos (de sangue ou simplesmente de coração), aos meus avós, inclusive os ausentes, aos tios, aos primos e também àqueles que não são da família por um simples detalhe genético, mas que ao longo dos meus 25 anos passaram a fazer parte.

Agradeço à professora Nadiane por sua dedicação e sua solicitude, estando sempre disposta a me ajudar no que fosse necessário para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao professor Paulo Ivo (PI) por sua dedicação e por seu interesse em ajudar sempre que necessário.

Agradeço aos técnicos da Divisão de Engenharia Civil do ITA por todo o suporte oferecido durante as visitas de campo e atividades de laboratório.

Agradeço ao corpo docente do ITA por todo o aprendizado que obtive ao longo dos seis anos que passei na escola.

Agradeço com carinho aos demais professores que tiveram a paciência de me ensinar as coisas da vida, desde o ABC até os mnemônicos fortemente utilizados nos tempos de vestibular.

Agradeço aos queridos amigos de Recife, pelo companheirismo e pelos prazerosos momentos passados juntos, que sempre aliviavam um pouco do estresse do ITA.

Agradeço aos amigos que conheci em São José, ainda no tempo de cursinho, que foram substanciais para atingir meu primeiro grande desafio: o famigerado vestibular do ITA.

Agradeço aos amigos do ITA (ou seriam irmãos?), com quem dividi muitas alegrias e poucas tristezas, amigos que certamente ficarão para a vida toda.

A todos vocês o meu MUITO OBRIGADO!

*“Emancipate yourselves from mental slavery
None but ourselves can free our minds...”
(Bob Marley)*

Resumo

A ocorrência de enchentes é um sério problema para a sociedade e para o governo, uma vez que causam danos custosos aos cofres públicos e põem em risco a saúde e os bens da população. Áreas urbanizadas costumam ser alvo mais frequente da atuação das enchentes, haja vista o processo de impermeabilização que as construções costumam exercer sobre o solo. Em São José dos Campos-SP, o Córrego Senhorinha, localizado em uma região densamente urbanizada, tem apresentado frequentemente eventos desastrosos, como o que ocorreu em março de 2013, trazendo prejuízos diretos a mais de 100 mil pessoas. O presente Trabalho de Graduação (TG) quantificou vazões de escoamento máximas ocasionadas devido a uma determinada chuva de projeto. Para isso, utilizaram-se ferramentas de Geoprocessamento e Hidrologia, além de ser subsidiado por visitas de campo, atividades de laboratório e entrevistas com moradores da região atingida. A chuva de projeto tenta simular a chuva do dia 23 de março de 2013 e foi obtida pela Equação Intensidade – Duração – Frequência (IDF) de São José dos Campos. O geoprocessamento foi feito em ambiente ArcGIS e a modelagem Precipitação-Vazão foi realizada por meio do software IPHS1, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Perceberam-se dois problemas principais: o extravasamento do córrego e a caracterização de escoamento torrencial, em trechos distintos da bacia. Por fim, teceram-se comentários acerca das causas comuns das enchentes e de maneiras a fim de mitigá-las.

Palavras-Chave: Macrodrenagem, SIG, Modelagem hidrológica IPHS1, Enchentes

Abstract

The occurrence of flood is a serious problem for the society and for the government, since it causes expensive damages to the public coffers and put in risk the healthy and the properties of the population. Urbanized areas are usually target of flood events because of the effects caused by the soil impermeabilization. In Sao Jose dos Campos, Senhorinha stream, wich is located within a very urbanized region, has often presented disastrous events, like the one occurred in march 2013, responsible for economic damages to over 100 thousand people. This work quantifies maximum runoff flow generated by the project rainfall. For this purpose, there were used Geoprocessing and Hydrology tools, apart from field visits, laboratory activities and interview with people who live in the affected region. The project rainfall tries to simulate the 23th March 2013 and it was obtained from Sao Jose dos Campos IDF (Intensity – Duration – Frequency) equation. Geoprocessing was made using ArcGIS and the rainfall-runoff modelling was done using the software IPHS1, developed by Hydraulic Research Institute from Rio Grande do Sul Federal University. Two main issues were identified: overflow and the characterization of torrential flow, in different parts of watershed. Finally, some comments were made about the causes for floods and some of the possible ways to reduce them.

Keywords: Macrodrainage, GIS, Hidrological modelling IPHS1, Flood

Lista de figuras

Figura 1 – Ciclo Hidrológico (Fonte: USGS)	19
Figura 2 – Esquema simplificado de bacia hidrográfica (Fonte: CSERC, modificado)	20
Figura 3 – Representação vetorial e matricial de um mapa temático (CAMARA; MONTEIRO, 2005)	27
Figura 4 – Representação do arquivo geoTIFF obtido do Topodata – Quadricula 23s465 utilizada para a área de estudo (INPE, 2011)	29
Figura 5 – Vista do perfil de um <i>sink</i> e sua correção (ESRI)	30
Figura 6 – Vista do perfil de um <i>peak</i> e sua correção (ESRI)	30
Figura 7 – Fluxograma das operações de geoprocessamento feitas no ArcGIS	31
Figura 8 – Imagem digital (DEM), com ênfase para a região recortada	38
Figura 9 – Recorte do DEM, com valores inteiros (<i>integer</i>)	38
Figura 10 – Determinação das falhas tipo <i>Sink</i> do DEM	39
Figura 11 – Recorte do DEM, após correção das falhas	39
Figura 12 – Matriz <i>Direction Code</i> – Representação das 8 direções (D8) de modelagem de fluxo proposta por Jenson e Domingue (1988). (ESRI)	40
Figura 13 – Direção do fluxo	40
Figura 14 – Matriz de fluxo acumulado	41
Figura 15 – Mapa gerado com os trechos e suas respectivas áreas de contribuição	42
Figura 16 – Hietograma de projeto ($Tr = 25$ anos)	47
Figura 17 – Ocupação da bacia – Google Earth (adaptado)	48
Figura 18 – Trecho 1 (foto do autor)	57
Figura 19 – Trecho 1 (imagem do AutoCAD)	57
Figura 20 – Trecho 2 (foto do autor)	58
Figura 21 – Trecho 2 (imagem do AutoCAD)	58
Figura 22 – Trecho 3 (foto do autor)	59
Figura 23 – Trecho 3 (imagem do AutoCAD)	59
Figura 24 – Trecho 4 (foto do autor)	60
Figura 25 – Trecho 4 (imagem do AutoCAD)	60
Figura 26 – Trecho 5 (foto do autor)	61
Figura 27 – Trecho 5 (imagem do AutoCAD)	61
Figura 28 – Trecho 6 (foto do autor)	62
Figura 29 – Trecho 6 (imagem do AutoCAD)	62
Figura 30 – Trecho 7 (foto do autor)	63
Figura 31 – Trecho 7 (imagem do AutoCAD)	63

Figura 32 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 0	64
Figura 33 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 1	64
Figura 34 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 2	65
Figura 35 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 3	65
Figura 36 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 4	66
Figura 37 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 5	66
Figura 38 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 6	67
Figura 39 – Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 7	67
Figura 40 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 0	68
Figura 41 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 1	68
Figura 42 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 2	69
Figura 43 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 3	69
Figura 44 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 4	70
Figura 45 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 5	70
Figura 46 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 6	71
Figura 47 – Precipitação efetiva + hidrograma de saída – Sub-bacia 7	71
Figura 48 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 1	72
Figura 49 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 2	72
Figura 50 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 3	73
Figura 51 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 4	73
Figura 52 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 5	74
Figura 53 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 6	74
Figura 54 – Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 7	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de entrada referentes aos trechos d'água	43
Tabela 2 – Áreas de contribuição obtidas pelo ArcGIS	44
Tabela 3 – Valores de intensidade (em mm/h) de chuva de projeto	45
Tabela 4 – Tempos de concentração para as sub-bacias calculadas por diversos métodos	46
Tabela 5 – Ocupação de cada sub-bacia, em %	47
Tabela 6 – Cálculo resumido de CN para cada área de contribuição	49
Tabela 7 – Cálculos e verificação da lâmina máxima	51
Tabela 8 – Classificação do escoamento em cada trecho	51

Sumário

Lista de figuras	9
Lista de tabelas	11
Sumário	12
1 Introdução	14
1.1 Panorama	14
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
2 Revisão da literatura	17
2.1 Hidrologia	17
2.1.1 Campos de aplicação da hidrologia	17
2.1.2 Ciclo hidrológico	17
2.1.3 Bacia hidrográfica	18
2.1.4 Modelagem hidrológica	18
2.1.4.1 IPHS1	19
2.1.5 Hidráulica de canais	23
2.1.6 Projetos de canais	23
2.1.7 Legislação vigente	24
2.2 Geoprocessamento	25
2.2.1 Sistema de Informações Geográficas – SIG	25
2.2.2 Modelo Numérico de Terreno – MNT	27
2.2.3 Obtenção dos dados	28
2.2.4 Geoprocessamento em ArcGIS	28
2.2.4.1 Modelo Digital de Elevação – DEM	28
2.2.4.2 Correção do DEM	29
2.2.4.3 Delimitação da bacia hidrográfica	30
2.2.4.4 Aplicações das ferramentas: <i>Hydrologic Analysis</i>	31
3 Área de estudo	33
3.1 São José dos Campos	33
3.2 Rio Paraíba do Sul	34
3.3 Rio Vidoca	35
3.4 Córrego Senhorinha	35

4	Resultados e discussões	37
4.1	SIG	37
4.1.1	Recorte da imagem digital	37
4.1.2	Correção das falhas	37
4.1.3	Direções de fluxo	37
4.1.4	Fluxo acumulado	39
4.1.5	Exutórios das sub-bacias (<i>Pour points</i>)	40
4.1.6	Delimitação das sub-bacias	41
4.2	Modelagem IPHS1	43
4.2.1	Obtenção dos parâmetros	43
4.2.1.1	Discretização dos trechos	43
4.2.1.2	Áreas de contribuição	43
4.2.1.3	Chuva de projeto	44
4.2.1.4	Determinação da precipitação excedente	46
4.2.2	Resultados da modelagem	48
4.2.2.1	Hidráulica de canais	49
5	Conclusões	52
5.1	Diagnóstico	52
5.2	Comentários	52
5.3	Dificuldades encontradas	53
5.4	Sugestões de continuação do trabalho	53
5.5	Aspectos qualitativos	54
5.6	Considerações finais	54
	Referências	56
A	Apêndices	57
A.1	Trechos homogêneos	57
A.2	Hietogramas de projeto	64
A.3	Precipitação efetiva e hidrograma das sub-bacias	68
A.4	Hidrogramas de entrada e saída dos trechos	72

1 Introdução

1.1 Panorama

Quando o leito de um rio, córrego ou qualquer outro curso, natural ou não, recebe uma quantidade de água, proveniente da chuva, maior que sua capacidade, em termos de vazão, ele transborda, o que ocasiona o fenômeno conhecido por enchente.

No Brasil, é comum nos primeiros meses do ano, época das chuvas de verão, algumas grandes cidades sofrerem com a ocorrência de enchentes, que em geral causam muito prejuízo à saúde e ao patrimônio da população.

O estudo de tais fenômenos, principalmente com a busca por sua quantificação, tem se mostrado como uma ferramenta importante de planejamento urbano e auxílio nas tomadas de decisão.

Uma das causas das enchentes é a urbanização acelerada e descontrolada, que tende a impermeabilizar regiões por onde a água da chuva deveria infiltrar-se, o que é uma das etapas do ciclo hidrológico responsável por regular a vazão de rios e córregos, além de reduzir o tempo de escoamento. A falta de planejamento urbano, comum nas cidades brasileiras, é um agravante para esse tipo de problema.

Outro problema causador de enchente é a obstrução de canais, que pode ser percebida por meio do lançamento de esgoto e lixo indevidamente, bem como por processos erosivos, influenciando na capacidade de suporte do curso d'água.

Precipitações de grande intensidade e curta duração são outro fator colaborador para a alta frequência de enchentes, o que pode ser observado nos primeiros meses do ano, na região sudeste. Pode-se citar como exemplo as enchentes e os deslizamentos de terra que atingiram algumas cidades serranas do Estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, deixando 916 mortos, o que foi considerado o maior desastre climático da história do país.

Outros tipos de negligências, como as construções indevidas nas várzeas dos rios e córregos, são os fatores que transformam um evento raro, como uma precipitação com longo período de retorno, em um desastre.

1.2 Justificativa

A cidade de São José dos Campos apresentou elevado processo de industrialização após a instalação do Centro Técnico de Aeronáutica (CTA), hoje Departamento de Ciência

e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) e do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), em 1950, além da inauguração da Rodovia Presidente Dutra, em 1951. Isso permitiu acesso mais rápido para o Rio de Janeiro e São Paulo, os maiores centros industrializados do país, que já apresentavam alguns sinais de saturação. Esses fatores foram preponderantes para a atração de indústrias de grande porte nas décadas de 1960 e 1970 para a região. (URBANO, 2012)

O processo de industrialização fez com que São José experimentasse intenso crescimento demográfico, que acelerou a urbanização e causou problemas, como a ocupação irregular de áreas urbanas e rurais. (URBANO, 2012)

Localizado em uma região densamente urbanizada da cidade, o Córrego Senhorinha tem apresentado ao longo das últimas décadas, diversas enchentes ao longo do seu percurso. (VENDRAME; SCOFIELD, 2000)

Na busca pelo entendimento e quantificação de eventos de enchentes urbanas, buscou-se identificar no município regiões que fossem frequentemente atingidas por enchentes que causassem prejuízos à população. O Córrego Senhorinha, portanto, foi escolhido para a modelagem apresentada neste trabalho.

No dia 22 de março de 2013, de acordo com a Defesa Civil, o nível do córrego chegou a subir 6 metros e o prejuízo causado foi grande. Parte de uma ponte desabou, a calçada cedeu, dois postes caíram, um dos quais sobre uma casa, que foi interditada pela Defesa Civil. Uma tubulação de água potável da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) foi atingida, o que prejudicou o abastecimento de cerca de 100 mil pessoas.

Além dos transtornos com falta d'água, danos aos imóveis e interrupção do trânsito, esse tipo de desastre costuma acarretar em gastos vultuosos, uma vez que custos de reparo, por serem de nível emergencial, são indiscutivelmente maiores que custos de manutenção, além de despesas com licitação. No entanto, ainda é comum no Brasil haver uma certa negligência e omissão do poder público quanto à manutenção dos quatro sistemas de saneamento básico: tratamento e distribuição de água, coleta e tratamento de esgoto, coleta e tratamento de resíduos sólidos e drenagem urbana.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo modelar a bacia hidrográfica do Córrego Senhorinha, a fim de quantificar as vazões de escoamento superficial, identificando portanto as causas das frequentes enchentes, principalmente a de março de 2013.

Além disso, de posse dos resultados da modelagem, deseja-se analisá-los e compará-los, para propor medidas mitigadoras para as causas identificadas.

Como objetivos secundários, buscou-se a delimitação das áreas de contribuição de cada trecho homogêneo do córrego. Essa área representa a superfície sobre a qual a quantidade de chuva escoa para o determinado trecho. Essa atividade foi feita em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A ocupação do solo, que também é necessária para desenvolver a modelagem, foi determinada com auxílio das ferramentas de processamento de imagens ArcGIS, Google Earth e AutoCAD.

Buscou-se também determinar a chuva de projeto para a modelagem, que busca retratar a de 22 de março de 2013, que elevou o nível do córrego, segundo a Defesa Civil, além de provocar danos estruturais a algumas edificações.

2 Revisão da literatura

2.1 Hidrologia

Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação, distribuição espacial, suas propriedades físicas e químicas e sua relação com o ambiente, inclusive com os seres vivos. Trata-se do estudo da água na superfície terrestre, no solo e no sub-solo. De uma forma simplificada pode-se dizer que hidrologia tenta responder à pergunta: O que acontece com a água da chuva? (COLLISCHONN; RUTINÉLIA, 2011) Como ramo da engenharia, esta ciência utiliza como base fundamentos de física, hidráulica e estatística.

Historicamente, estudos sobre a hidrologia tiveram seu maior impulso em meados do século XX, quando houve a necessidade de grandes obras hidráulicas principalmente devido a problemas de estimativa insuficiente de vazão de enchentes, o que era consequência principalmente do crescimento das populações ribeirinhas nas maiores cidades da Europa.

Embora o estudo da hidrologia seja recente, com cerca de 200 anos de história, há indícios de preocupação do homem quanto a fenômenos hidrológicos desde o Egito Antigo, há cerca de 3000 anos, principalmente com a construção de canais e diques para promover irrigação. Apesar de algumas dessas obras apresentarem bom desempenho, a ponto de serem copiadas, o “dimensionamento” era feito com base totalmente empírica.

2.1.1 Campos de aplicação da hidrologia

O domínio e a boa gestão dos recursos hídricos são ferramentas valiosas quando se necessitam satisfazer diversas necessidades da população, principalmente quanto ao controle para que o excesso ou a falta de água em um determinado local não cause muitos danos às pessoas, às propriedades ou ao meio ambiente.

A engenharia hidráulica, ou de recursos hídricos, é o ramo da engenharia que estuda o fluxo e o transporte de fluidos, principalmente água. Dentre suas atribuições destacam-se o abastecimento de água, gerenciamento de bacias, potenciais para navegação e irrigação, geração de energia, drenagem, controle de cheias, controle de poluição, controle de erosão, reservatórios, barragens, ente outros.

2.1.2 Ciclo hidrológico

Denomina-se Ciclo hidrológico o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. (TUCCI, 2011) A energia do Sol resulta no aquecimento do ar, do solo e da água superficial e resulta na evaporação da água e no movimento das massas de ar. O vapor de ar é transportado na atmosfera e pode condensar-se formando nuvens. Em circunstâncias específicas o vapor condensado nas nuvens pode voltar à superfície da Terra na forma de precipitação. A evaporação dos oceanos é a maior fonte de vapor para a atmosfera e para a posterior precipitação, mas a evaporação de água dos solos, dos rios e lagos e a transpiração da vegetação também contribuem. A precipitação que atinge a superfície pode infiltrar no solo ou escoar por sobre o solo até atingir um curso d'água. A água que infiltra umedece o solo, alimenta os aquíferos e cria o fluxo de água subterrânea. O ciclo hidrológico é fechado se considerado em escala global. Em escala regional podem existir alguns sub-ciclos. Por exemplo, a água precipitada que está escoando em um rio pode evaporar, condensar e novamente precipitar antes de retornar ao oceano.

As fases do ciclo hidrológico, conforme pode ser visto na Figura 1, são:

- Evaporação;
- Transpiração;
- Condensação;
- Precipitação;
- Escoamento superficial;
- Infiltração;
- Escoamento subterrâneo;

2.1.3 Bacia hidrográfica

Uma bacia hidrográfica é a área sobre uma superfície, tal que toda precipitação incidente escoará para a mesma seção, denominada exutório. No estudo de enchentes, quando se deseja calcular a vazão, proveniente da chuva, que escoa para uma determinada *seção crítica*, a principal etapa é a determinação da área, delimitada topograficamente, que contribui para esse escoamento. A Figura 2 mostra o esquema simplificado de uma pequena bacia hidrográfica.



Figura 1 Ciclo Hidrológico (Fonte: USGS)

2.1.4 Modelagem hidrológica

A vazão de um rio, córrego ou qualquer curso d'água é o resultado da interação entre a precipitação e a bacia, e depende das características da bacia que influenciam a infiltração, armazenamento e evapotranspiração.

Durante as chuvas intensas, a maior parte da vazão que passa por um rio é a água da própria chuva que não consegue penetrar no solo e escoar imediatamente, atingindo os cursos d'água e aumentando a vazão. É desta forma que são formados os picos de vazão e as cheias ou enchentes. O escoamento rápido que ocorre em consequência direta das chuvas é chamado de escoamento superficial. (COLLISCHONN; RUTINÉLIA, 2011)

Modelos hidrológicos são utilizados para se obter o hidrograma resultante da ocorrência de uma tormenta sobre uma bacia hidrográfica. A esse tipo de modelo dá-se o nome de Precipitação-Vazão. Hidrograma é o nome dado à representação gráfica da vazão, ao longo do tempo, que passa por uma determinada seção de controle.

2.1.4.1 IPHS1

O IPHS1 é um sistema computacional modulado, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que permite ao usuário a determinação de hidrogramas de projeto resultante da ocorrência de uma tormenta sobre uma bacia hidrográfica. citeManualIPHS1

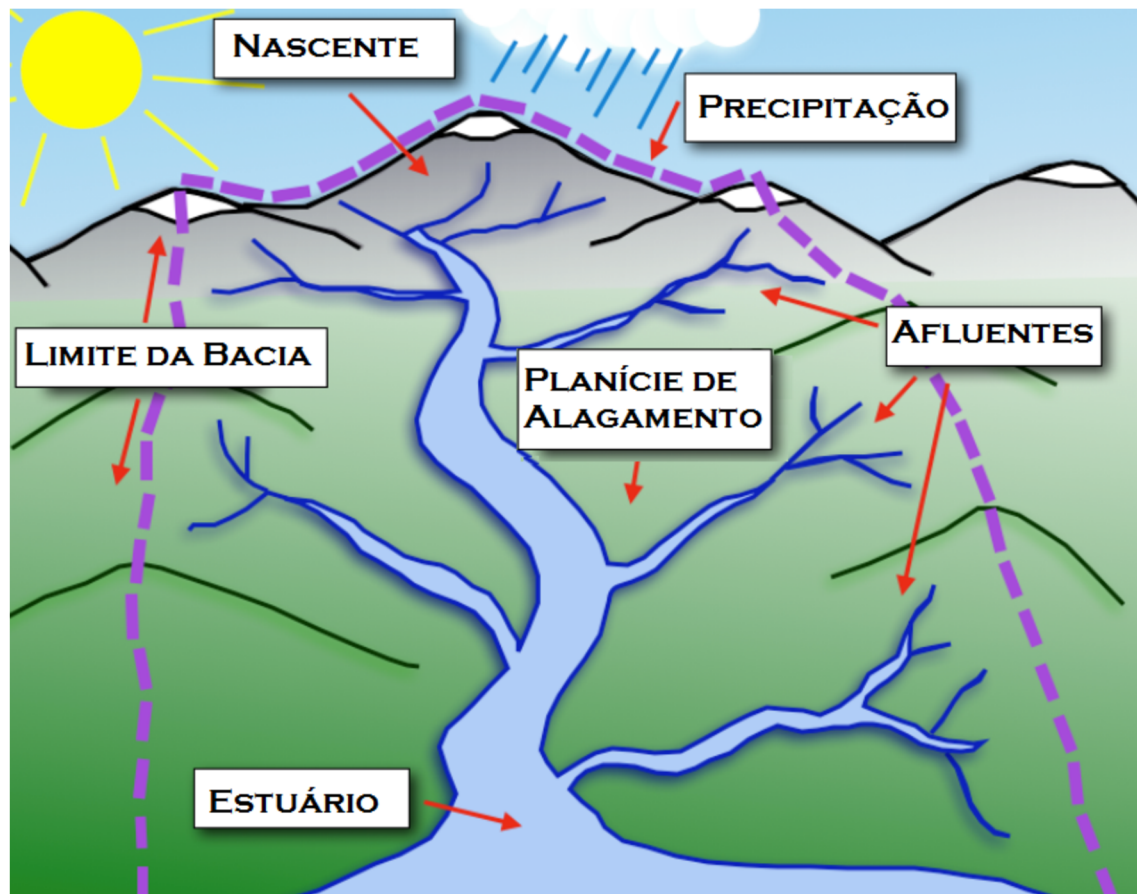


Figura 2 Esquema simplificado de bacia hidrográfica (Fonte: CSERC, modificado)

O programa opera com dois módulos: Rio e Bacia. O módulo Rio corresponde à propagação em canais e soma de hidrogramas, já o módulo Bacia caracteriza-se pela transformação precipitação-vazão sobre a área da bacia. Cada módulo é composto por sub-módulos, que realizam operações hidrológicas específicas. Ademais, cada sub-módulo apresenta diferentes algoritmos para a aquisição dos parâmetros necessários para a execução.

O módulo Bacia é composto pelos sub-módulos:

- Precipitação;
- Separação de escoamento;
- Escoamento superficial;
- Escoamento subterrâneo;

Para o algoritmo de precipitação, é possível optar por precipitação ao longo do tempo ou por precipitação de projeto. A precipitação de projeto utilizada nesta modelagem pode ser inserida pelas seguintes opções:

- Ingressar a precipitação com uma determinada ordenação;
- Ingressar a precipitação acumulada para cada intervalo de tempo, extraídas pela curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) correspondente;
- Uma das IDFs armazenadas no banco de dados do programa.

A separação do escoamento (parcela de chuva efetiva, ou seja, aquela que gera escoamento superficial) pode ser realizada com a utilização dos seguintes algoritmos:

- Modelo IPHII - Horton modificado;
- Exponencial do HEC;
- Curva número do SCS;
- Índice Φ ;
- Holtan.

Já o módulo Rio é composto pelos sub-módulos:

- Escoamento em rios;
- Escoamento em reservatório;
- Derivação de vazões.

O sub-módulo *Escoamento em rios* pode ser modelado de acordo com as seguintes alternativas:

- Modelo Muskingum;
- Modelo Muskingum-Cunge linear ou não-linear;
- Modelo Muskingum-Cunge não-linear com planície de inundação;
- Modelo Muskingum não-linear adaptado especificamente para condutos fechados.

Neste trabalho, os hidrogramas foram originados de um processo de transformação precipitação-vazão sobre as sub-bacias e da propagação das vazões em cada trecho do curso do córrego.

A precipitação de projeto foi inserida ordenada pelo método dos blocos alternados e com duração de 90 minutos, para período de retorno de 25 anos.

Para a determinação da precipitação excedente, utilizou-se o método do *Soil Conservation Service (SCS)*, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, que foi

desenvolvido com a análise de mais de 3.000 tipos de solo e vegetação. A hipótese proposta pelo SCS é

$$\frac{P - P_e}{S} = \frac{P_e}{P} \quad (2.1)$$

em que P é a precipitação total acumulada, P_e é a precipitação efetiva acumulada e S é o armazenamento máximo da bacia, em mm.

Considerando as perdas iniciais I_a : água interceptada pela vegetação, retida nas depressões do terreno, ou evaporadas antes do deflúvio, a equação passa a ser

$$\frac{P - P_e - I_a}{S - I_a} = \frac{P_e}{P} \quad (2.2)$$

Considerando $I_a = 0,2S$, tem-se a precipitação efetiva, que vale

$$P_e = \frac{P - 0,2S^2}{P + 0,8S} \quad (2.3)$$

O valor de S , capacidade de armazenamento do solo, depende do tipo de ocupação. Para facilitar os cálculos, costuma-se fazer a mudança de variável

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (2.4)$$

onde CN é chamado de *número-curva*, variando de 0 a 100 e depende do tipo de solo, ocupação e condição de umidade antecedente.

Para o cálculo do CN , o SCS separa os solos em quatro grupos hidrológicos, A, B, C e D.

Grupo A - Solos arenosos com baixo teor de argila totais, inferior a 8%, não há rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

Grupo B - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, este limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada do que a camada superficial.

Grupo C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30 por%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

Grupo D - Solos argilosos (30-40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

As condições iniciais de umidade do solo são divididas em três:

Condição I - Solos secos - as chuvas, nos últimos dias não ultrapassam 15 mm;

Condição II - Situação média na época das cheias - as chuvas, nos últimos 5 dias, totalizam de 15 a 40 mm e

Condição III - Solo úmido (próximo da saturação): as chuvas, nos últimos dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

2.1.5 Hidráulica de canais

O escoamento em canais é aquele que se dá a superfície livre, ou seja, com uma fronteira exposta à atmosfera. Dependendo da relação entre as magnitudes das forças de inércia e gravitacionais, os escoamentos podem ser divididos em: subcríticos, críticos e supercríticos.

A relação entre essas forças, e consequentemente a classificação podem ser obtidas por meio do *número de Froude*, explicitado pela equação

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot H_m}} \quad (2.5)$$

em que V é a velocidade média na seção, g é a aceleração gravitacional e H_m é a altura hidráulica da seção. (PORTO, 2006)

Se $Fr = 1$, o escoamento é dito *crítico*. Se $Fr < 1$, o escoamento é dito *subcrítico*. Nesse estado, as forças gravitacionais se sobrepõem às inerciais, ocasionando um fluxo de baixa velocidade, fluvial. E se $Fr > 1$, o escoamento é dito *supercrítico*. Nesse estado, as forças inerciais se tornam dominantes, o que caracteriza um fluxo de alta velocidade, também chamado de torrencial (CHOW, 1959). A velocidade do escoamento pode ser calculado pela Fórmula de Manning, expressa na equação

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot \sqrt{S_0} \quad (2.6)$$

em que n é a rugosidade do canal e S_0 é a declividade do fundo.

2.1.6 Projetos de canais

Ao projetar um canal, o projetista deve atentar para algumas observações pertinentes. Obras de retificação, alargamento ou canalização, devem ser feitas de jusante para montante, principalmente em bacias hidrográficas urbanizadas. Uma obra dessa natureza

executada de maneira contrária, ou seja, de montante para jusante, ocasionaria, na ocorrência de uma chuva, um volume maior de água, que chegaria às seções de jusante em um tempo menor, o que é um agravante para as condições de drenagem da parte mais baixa da bacia.

Além disso, é interessante que o projetista superestime o coeficiente de rugosidade do canal (ou seja, considerando o desempenho do córrego a longo prazo) em cerca de 10% a 15% do valor de projeto.

O projetista deve acrescentar uma folga de 20 a 30% da altura d'água acima do nível d'água de projeto de modo a atender uma possível sobrelevação do nível d'água, que pode ser resultado de despejo (natural ou não) de materiais diversos no fundo do canal. Além disso, é desejável evitar grandes profundidades (maiores que 4 metros) em canais urbanos, por causa do custo de escavação, da segurança dos transeuntes e veículos e também por questões estéticas.

Deve-se tomar cuidados especiais em obras de retificação de canais e córregos, principalmente no que se refere a cortes de meandros, pois isso diminui o comprimento longitudinal do trecho d'água e conseqüentemente aumenta-se a declividade e por sua vez a velocidade média, que trás diversos problemas, conforme citado anteriormente, principalmente no que diz respeito ao aumento da magnitude dos processos erosivos, ao transporte de sedimentos e conseqüentemente ao assoreamento. (TUCCI, 1995)

2.1.7 Legislação vigente

A preservação dos recursos hídricos, assim como das florestas e demais formas de vegetação nativa, bem como da biodiversidade, do solo e da integridade do sistema climático, é atualmente abordada pela Lei N°12.727 de 2012, também chamada de O Novo Código Florestal Brasileiro.

Apesar da denominação vanguardista, essa legislação parece ir de encontro ao que se espera de algo inovador, pois modificou com sua promulgação diversos itens, passando a omitir critérios de preservação dos recursos hídricos, além de distorcer alguns conceitos, como o de Área de Proteção Permanente (APP) e de Reserva Legal, passando a ter caráter mais permissivo que as legislações anteriores.

Segundo alguns estudiosos, as alterações do Novo Código Florestal representam mais retrocessos e graves riscos para o país. Essa insatisfação tornou-se pública em 2012 por meio de um manifesto elaborado pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) e pela Academia Brasileira de Ciência (ABC), as mais reconhecidas referências científicas do país. O manifesto acusa que a nova legislação faz com que o Brasil deixe de cumprir compromissos assumidos com seus cidadãos e com o mundo, já que iria de encontro a premissas básicas aprovadas em fóruns internacionais, como a Rio+20, Conferência

das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável. Nessa Conferência, o Brasil assinou um documento que reconhece a importância da colaboração da comunidade científica e tecnológica para o desenvolvimento sustentável e o fortalecimento da conexão entre a ciência e as políticas, mediante avaliações científicas confiáveis que facilitem a adoção de decisões informadas.

Das diversas alterações contestadas pela SBPC e pela ABC, pode-se citar a redução da obrigação de recomposição da vegetação às margens dos rios e a redução das exigências legais para a recuperação de nascentes. Sendo assim, percebe-se que as disposições do Novo Código Florestal Brasileiro não garantem a proteção necessária de alguns processos ecológicos essenciais aos recursos hídricos e que as modificações realizadas na legislação nacional não têm amparo científico. Diante deste quadro, infere-se que os reais interesses que sustentam a nova legislação parecem ter maior cunho político-econômico, que ambiental. Vale comentar que o Novo Código Florestal Brasileiro também recebeu críticas do Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP).

2.2 Geoprocessamento

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma tarefa importante para as atividades das sociedades organizadas. Antes do advento da computação, isso era feito apenas em documentos e mapas em papel, o que impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados.

Com o desenvolvimento simultâneo, na segunda metade do século XX, da tecnologia de informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento. (CÂMARA; DAVIS, 2013)

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente.

Geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltado para um objetivo específico. Neste trabalho, o objetivo é a determinação, a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), da bacia hidrográfica do Córrego Senhorinha, bem como das sub-bacias referentes a cada trecho homogêneo do córrego, conforme será abordado oportunamente.

A principal ferramenta para análise, gestão e representação de dados geográficos é o Sistema de Informação Geográfica (SIG), conhecido também na tradução para o inglês

como *Geographical Information System (GIS)*.

2.2.1 Sistema de Informações Geográficas – SIG

Um SIG possui capacidade de estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos. Essa capacidade é conhecida como *topologia*, ou seja, o estudo genérico dos lugares geométricos, com suas propriedades e relações. Esta estrutura, além de descrever a localização e a geometria das entidades de um mapa, define relações de conectividade, contiguidade e pertinência. (CÂMARA; DAVIS, 2013)

Os dados utilizados em SIG podem ser divididos em dois grandes grupos:

1. Dados gráficos, espaciais ou geográficos, que descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição)
2. Dados não gráficos, alfanuméricos ou descritivos, que descrevem os atributos destas características.

Os dados espaciais, por sua vez, podem ser divididos em:

- Vetorial (Vector)

Mapas são abstrações gráficas compostas por pontos, linhas e polígonos. Todas essas entidades são representadas por pares (X,Y) ou por um conjunto de pares. É dessa forma que as entidades do mundo real são representadas graficamente, de modo vetorial, em um ambiente SIG.

Outro tipo de representação vetorial é a utilizada por softwares do tipo CAD. O grande diferencial de um SIG, quando comparado a outros softwares que trabalham com representação vetorial é quanto a seu conjunto de algoritmos que lhe permite analisar topologicamente as entidades espaciais.

- Matricial (Raster)

Neste formato, tem-se uma matriz de células, às quais estão associados valores, que permitem reconhecer os objetos sob a forma de imagem digital. Cada uma das células, denominadas *píxel*, é endereçável por meio de suas coordenadas (linha, coluna).

As representações vetorial e matricial podem ser observadas pela Figura 3.

Em uma imagem matricial, os valores dos pixels representam uma medição de alguma grandeza física, correspondente a um fragmento do mundo real. Por exemplo, em uma imagem obtida por satélite, cada um dos sensores é capaz de captar a intensidade da reflexão de radiação eletromagnética sob a superfície da Terra em uma específica faixa

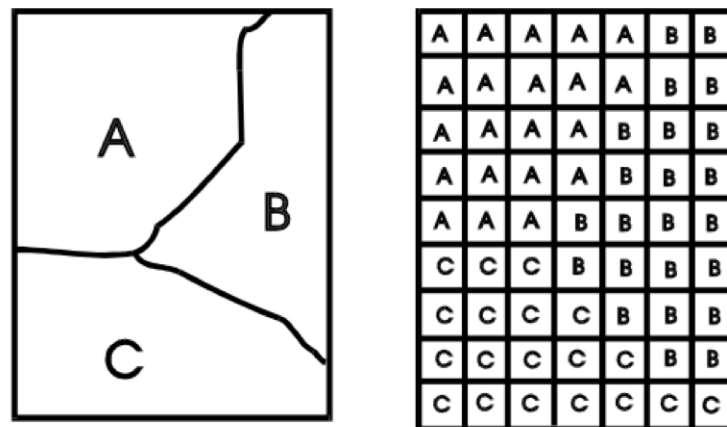


Figura 3 – Representação vetorial e matricial de um mapa temático (CAMARA; MONTEIRO, 2005)

de frequências. Quanto mais alta a reflectância, no caso, mais alto será o valor do pixel. (CÂMARA; DAVIS, 2013)

Os dados alfanuméricos também podem ser subdivididos em dois tipos:

- Atributos dos dados espaciais:

São dados que fornecem informações descritivas acerca de características de algum dado espacial. Estão ligados aos elementos espaciais através de identificadores comuns, normalmente chamados de geocódigos, que estão armazenados tanto nos registros alfanuméricos como nos espaciais.

- Atributos georreferenciados:

São dados onde a preocupação é apenas georeferenciar alguma característica específica, sem descrever as suas feições espaciais.

2.2.2 Modelo Numérico de Terreno – MNT

O termo modelo numérico de terreno (ou MNT) é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Comumente associados à altimetria, também podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, como teor de minerais, ou propriedades do solo ou subsolo, como aeromagnetismo. (CÂMARA; DAVIS, 2013)

Entre os usos de modelos numéricos de terreno, pode-se citar:

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;

- Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Um MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y), em um referencial qualquer, com atributos denotados de z, que descrevem a variação contínua da superfície. (CAMARA; MONTEIRO, 2005)

Quando essa superfície trata-se da topografia de uma determinada região, ao Modelo Numérico de Terreno dá-se o nome de Modelo Numérico de Elevação (MNE).

2.2.3 Obtenção dos dados

Os dados de MNE utilizados neste trabalho tratam-se um plano de informação com dados numéricos de Altitude, em formato matricial (*raster*), que foi obtida em extensão **.tiff**, em 32 bits, obtida do projeto Topodata (INPE, 2011), que foi gerada pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e tratada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Esses dados SRTM foram gerados em uma missão espacial feita a bordo da aeronave Endeavour entre 11 e 22 de fevereiro de 2000. A espaçonave realizou uma órbita de 233 km de altitude, com inclinação de 57°, objetivando a obtenção de dados topográficos digitais de cerca de 80% do globo terrestre entre as latitudes 60°N e 56°S.

Concluída a missão, foi feita a coleta de 12 TB de dados, que foram disponibilizados pela NASA para distribuição pública através da *United States Geological Survey (USGS)*, com resolução de 30 m para os EUA e 90 m para o resto do mundo.

O projeto Topodata apresenta os arquivos geoTIFF para o território brasileiro, após as operações de preenchimento de falhas, refinamento, derivação e pós-processamento, passando a ter resolução de 30 m. Obteve-se então o arquivo **23S465ZN.tiff**, representado esquematicamente na Figura 4 .

2.2.4 Geoprocessamento em ArcGIS

As operações de geoprocessamento foram feitas pelo ArcGIS, que é um grupo de programas, produzido pela ESRI, que constitui um SIG. Neste trabalho utilizou-se o **ArcGIS 10.1** e em seguida segue uma breve explanação acerca das ferramentas do *software* para análise hidrológica.

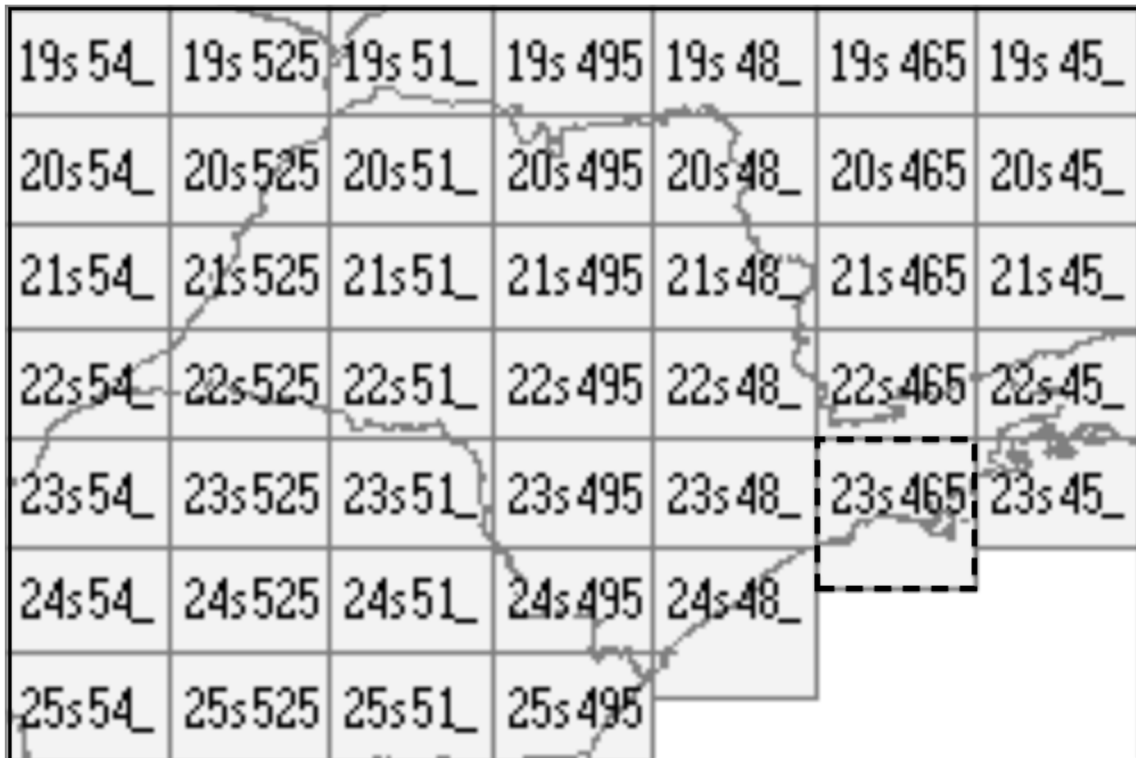


Figura 4 Representação do arquivo geoTIFF obtido do Topodata. Quadricula 23s465 utilizada para a área de estudo (INPE, 2011)

2.2.4.1 Modelo Digital de Elevação – DEM

Os dados digitais mais comuns que representam o formato da superfície da Terra compõem o Modelo Digital de Elevação (DEM).

Conforme comentou-se em 2.2.3, um DEM é uma matriz (*raster*) que representa a superfície terrestre com dados contínuos. A precisão dos dados é determinada pela resolução, ou seja, a distância entre dois pontos da amostra. Outro fator relevante que afeta a precisão é quanto ao tipo do dado DEM, que pode ser um inteiro (*integer*) ou real (*float point*). (ESRI)

As ferramentas de análise hidrológica (*hydrologic analysis tools*) do ArcGIS são projetadas para modelar a convergência do fluxo através de uma superfície natural. Para isso, assume-se que a superfície possui declividade vertical suficiente para garantir que se possa determinar um caminho preferencial de fluxo.

A modelagem em ArcGIS considera que cada célula da matriz pode receber afluente de qualquer célula adjacente, porém o fluxo só segue para uma célula adjacente.

2.2.4.2 Correção do DEM

Uma matriz DEM pode conter erros, que em geral podem ser classificados como depressão (*sink*), ou pico (*peak*). *Sink* é quando uma célula apresenta cota inferior às cotas das células adjacentes. A existência de um *sink* pode representar alguma “falha”

da natureza, como alguma caverna, o que é interpretado pelo modelo como um ponto de drenagem interna, no entanto em geral *sinks* representam imperfeições no DEM (ESRI). O principal problema causado por um *sink* é que todo o fluxo que passa pela célula fica contido nela, ou seja, nada sai. Com o mesmo raciocínio, um *peak* é uma célula rodeada por valores de conta inferiores ao seu.

Ambos os tipos de erro supracitados, principalmente os *sinks*, devem ser removidos antes de se tentar determinar quaisquer informações sobre a superfície estudada. As Figuras 5 e 6 apresentam exemplos desses erros e suas correções.



Figura 5 Vista do perfil de um *sink* e sua correção (ESRI)



Figura 6 Vista do perfil de um *peak* e sua correção (ESRI)

2.2.4.3 Delimitação da bacia hidrográfica

Para se delimitar uma bacia hidrográfica ou determinar o caminho de drenagem, em ambiente ArcGIS, deve-se seguir uma série de passos. Algumas operações são necessárias, outras opcionais, dependendo do tipo de arquivo de entrada.

A direção do fluxo é sempre aquela com maior declividade. Uma vez que se conhece essa direção, necessita-se determinar quantas e quais são as células cujo fluxo converge para uma dada célula. Essa informação é utilizada para se delimitar os limites da bacia e os caminhos de drenagem.

O fluxograma da Figura 7 mostra o processo de extração das informações hidro-lógicas, como limites da bacia e caminhos de drenagem, em um ambiente SIG.

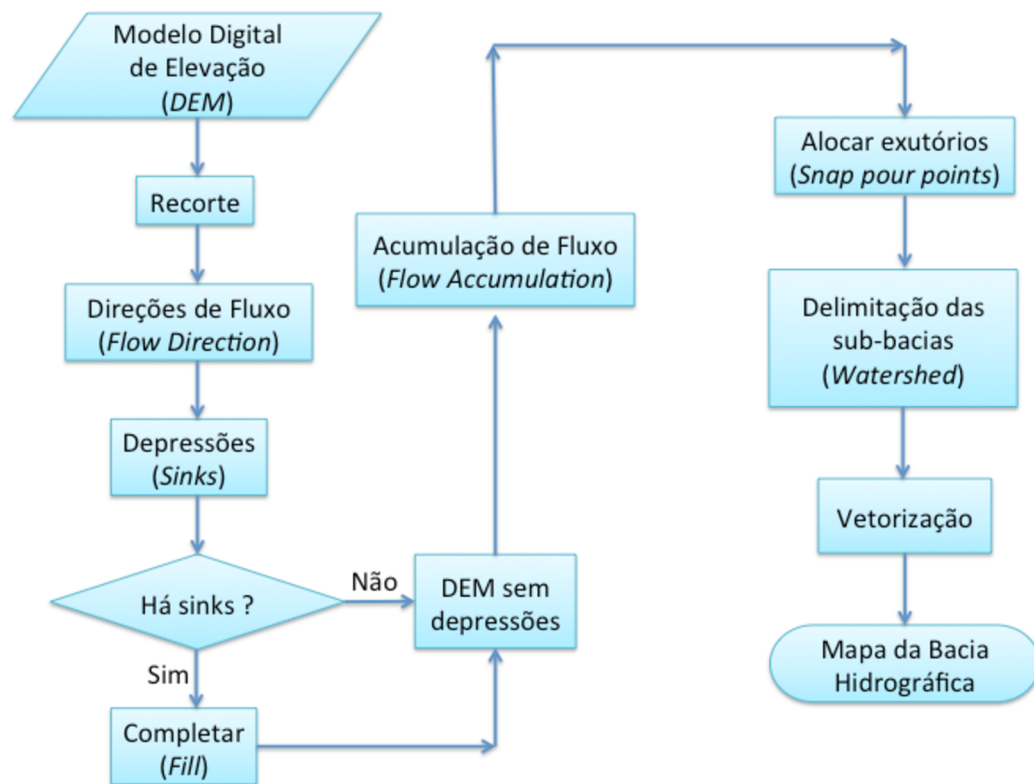


Figura 7 Fluxograma das operações de geoprocessamento feitas no ArcGIS

Como se sabe, toda bacia hidrográfica está intimamente relacionada a um exutório específico. Ou seja, para cada exutório, deve-se determinar a respectiva área de contribuição.

As ferramentas de hidrologia do ArcGIS permitem ao usuário especificar os exutórios e então são calculadas as sub-bacias referentes a cada trecho do curso d'água.

2.2.4.4 Aplicações das ferramentas: Hydrologic Analysis

As ferramentas de hidrologia do ArcGIS, utilizadas para determinar caminhos de drenagem e delimitar bacias hidrográficas, são:

- Basin: Cria uma matriz com a delimitação de todas as bacias hidrográficas;
- Sink: Cria uma matriz identificando todos os *sinks* ou áreas de drenagem interna;
- Fill: Corrige os *sinks* na matriz (superfície), removendo, portanto, pequenas imperfeições no arquivo de dados;
- Flow Accumulation: Cria uma matriz com o fluxo acumulado em cada célula.
- Flow Direction: Cria uma matriz com a direção de fluxo em cada célula, que dá-se pela maior declividade com relação às células vizinhas;

- Flow Length: Calcula, para cada célula da matriz, a distância a montante, a jusante, ao longo do caminho de drenagem;
- Snap Pour Point: Posiciona cada exutório pour point para a célula com maior valor de *Flow Accumulation*, dentro de uma distância especificada;
- Stream Link: Associa valores únicos aos trechos de uma rede (em formato matricial) entre duas intersecções;
- Stream Order: Ordena os segmentos da árvore que representa a rede de drenagem;
- Stream to Feature: Converte o arquivo matricial (*raster*) para atributos que representam a mesma rede de drenagem;
- Watershed: Determina a área de contribuição para os exutórios (*pour points*);

3 Área de estudo

3.1 São José dos Campos

São José dos Campos situa-se no Estado de São Paulo, na região Sudeste do país, no Vale do Paraíba, que é limitado pela Serra da Mantiqueira, ao norte, e pela Serra do Mar, ao sul. O município está localizado entre as metrópoles São Paulo e Rio de Janeiro, a 90 quilômetros da primeira. Devido a essa localização estratégica, São José apresenta elevado processo de urbanização, que vem acontecendo desde meados da década de 1950. Dessa forma, o fluxo migratório para a cidade contribuiu para um crescimento acelerado e desordenado do município, havendo na década de 80 um intenso processo de implantação de lotes clandestinos. (SANTOS, 2007)

Relacionado à urbanização acentuada, é percebido o processo de impermeabilização de áreas originalmente naturais, principalmente por pavimentos, calçadas e telhados, o que tende a reduzir a capacidade de infiltração do solo e consequentemente aumentar o escoamento superficial, principal causa das enchentes.

A Lei de Zoneamento de São José dos Campos não é muito clara quanto à ocupação de áreas às margens de rios e córregos, o que tende a trazer problemas de duas naturezas: de drenagem, em que o aumento do nível dos córregos em áreas urbanas pode trazer diversos prejuízos gerados pela inundação e de saneamento, no que diz respeito à contaminação e ao transporte de sedimentos indevidos, principalmente em áreas com grande fragilidade ambiental, como nascentes de rios, recargas de aquíferos e cabeceiras das bacias hidrográficas. (MACHADO, 2012)

Alguns aspectos físicos, relevantes para entender melhor a área de estudo, apresentados por SANTOS, são:

- Área: 1,118 km^2 ;
- Localização: Abrange áreas desde os esporões da Serra da Mantiqueira até as bordas do Planalto Paraitinga – Paraibuna;
- Origem: Aglomerados seiscentistas em 1767
- Clima: Cwa (Clima mesotérmico úmido);
- Pluviosidade: Precipitações abundantes ocorrem nos meses de novembro a março, predominância de massa de ar tropical, a direção principal do vento é do setor sudeste e a intensidade é de 1,0 a 2,5 m/s ;

- Temperatura: Máximas de 29,6°C e mínimas de 12°C;
- Geologia: Grande diversidade de rochas, como litologias de embasamento cristalino, atribuídas ao Grupo Paraíba e ao Grupo Açungui, sedimentos aluvionares recentes nas calhas dos Rios Paraíba do Sul e Buquira;
- Geomorfologia: Planalto Atlântico;
- Relevo: Planícies fluviais posicionadas às margens do Rio Paraíba do Sul. Na direção norte, encontra-se uma região de colinas chamada mar de morros, com altitudes médias variando entre 660 e 975 metros, constituindo os contrafortes da Serra da Mantiqueira. Na direção sul, a partir das planícies fluviais, encontram-se os terraços ou colinas tubulares;
- Hipsometria: 560 metros na várzea do Rio Paraíba do Sul a 2.086 metros no Pico do Selado, a noroeste do município, já no estado de MG;
- Cobertura vegetal natural: A Mata Atlântica recobria as áreas do município modeladas pela Serra da Mantiqueira e pela Serra do Mar. Nas Colinas Tabuliformes, ocorriam manchas de cerrado (Savana Arbórea Aberta), nas várzeas do Rio Paraíba do Sul e de seus afluentes, predominavam as Matas de Várzea (Floresta Estacional Semidecidual Aluvial);
- Hidrografia: Rio Paraíba do Sul.

O Córrego Senhorinha, objeto de estudo deste trabalho, é um afluente do Rio Vidoca, que é um afluente do Rio Paraíba do Sul.

3.2 Rio Paraíba do Sul

O Rio Paraíba do Sul banha os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. O rio atravessa a região do Vale do Paraíba e é considerado o mais importante do Estado do Rio de Janeiro. O rio é formado pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna.

Considerando sua nascente mais afastada da foz, o rio Paraíba do Sul nasce na Serra da Bocaina, no Estado de São Paulo, com o nome de rio Paraitinga, recebendo o nome rio Paraíba do Sul na confluência com o Paraibuna, na Represa de Paraibuna. Perfaz um percurso total de 1.137 km, desde a nascente do rio Paraitinga até a foz em Atafona (São João da Barra), no Norte Fluminense.

Os principais afluentes do Paraíba do Sul são o Jaguari, o Buquira, o Paraibuna, o Piabanha, o Pomba e o Muriaé. Esses dois últimos são os maiores e deságuam, respectivamente, a 140 e a 50 quilômetros da foz. Entre os sub-afluentes, está o rio Carangola,

importante rio da bacia do rio Paraíba do Sul, posto que serve a duas unidades da federação, o Estado de Minas Gerais e o Estado do Rio de Janeiro.

Sua bacia hidrográfica ocupa área de 56.500 km^2 .

Apenas a fim de curiosidade, foi neste rio que encontrou-se a famosa estátua de Nossa Senhora da Conceição Aparecida, em meados de 1717.

3.3 Rio Vidoca

A bacia do Rio Vidoca é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Possui área de aproximadamente $60,08 \text{ km}^2$, com maior parte localizada na região sul do município de São José dos Campos. Sua cabeceira encontra-se na altitude de 730 metros, na região de Planalto Atlântico, nas proximidades da divisa entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos.

A bacia é predominantemente urbana além de apresentar alto índice de degradação ambiental, o que acentua ainda mais a frequência de inundações, assoreamentos e erosões na margem do rios e córregos afluentes. Dois problemas bastante graves no Rio Vidoca são: o lançamento clandestino de esgotos sem tratamento prévio e a erosão acentuada das margens. (MACHADO, 2012)

A ocupação da bacia do Rio Vidoca é bastante desordenada, com vários pontos de invasão e ocupação de áreas impróprias. As classes com maior poder aquisitivo ocuparam as melhores áreas e modificaram as áreas que necessitam de adequação para construção por serem mais bem situadas. Por sua vez, a população mais pobre ocupou as áreas com maiores declividades ou sujeitas a inundações, como por exemplos as áreas de várzeas e encostas de morros sujeitas a deslizamentos. (MACHADO, 2012)

3.4 Córrego Senhorinha

O Córrego Senhorinha, que faz parte da Bacia Hidrográfica do Rio Vidoca, está inserido na região sul, a mais populosa da cidade de São José dos Campos. Segundo a Prefeitura Municipal, na região sul habitam cerca de 40 a 50% dos moradores da cidade.

Alguns bairros próximos à nascente do córrego apresentam densidade demográfica bastante elevada, a exemplo do Campo dos Alemães. (MACHADO, 2012)

Na literatura e também na mídia, são comuns registros de enchentes na Bacia Hidrográfica do Senhorinha.

Esta bacia vem sofrendo um acelerado processo de urbanização nos últimos anos, alguns novos loteamentos foram assentados, que além de impermeabilizarem a área também lançam seu esgoto doméstico e parte do lixo no córrego em questão, o que agrava

ainda mais o problema de inundações. Essa substituição de áreas antes recobertas de vegetação por áreas impermeabilizadas diminui sensivelmente o volume de água infiltrado no solo e seu tempo de escoamento, gerando um aumento significativo do volume total de água escoado num relativamente curto intervalo de tempo após o início da chuva. Além disso, como resultado dos processos erosivos que vêm acontecendo na bacia, há uma grande geração de transporte de sedimentos que pode ser observada logo após a confluência do córrego Senhorinha com o rio Vidoca e que têm sido objeto de sucessivas dragagens. (VENDRAME; SCOFIELD, 2000)

4 Resultados e discussões

4.1 SIG

Conforme comentou-se em 2.2.3, obteve-se o arquivo **23S465ZN.tiff** do Topodata (INPE, 2011), que é uma imagem digital, pré-tratada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), com resolução final de 30 metros.

A Figura 8 apresenta a imagem da matriz (*raster*) deste Modelo Digital de Elevação (DEM), em níveis de cinza. Percebe-se que a imagem engloba uma região bem maior que a bacia hidrográfica do Córrego Senhorinha, objeto de estudo deste trabalho, a comentar, na parte inferior da imagem, em tom preto, a vasta extensão do oceano Atlântico, que banha o litoral do estado de São Paulo. A fim de exemplificar, na imagem pode-se observar o município-arquipélago de Ilhabela, que possui área de 348 km², o que é cerca de 50 vezes maior que a área da Bacia do Senhorinha, conforme será visto oportunamente.

Como o arquivo possui grande volume de dados que não são relevantes para este trabalho, é interessante reduzir o tamanho do arquivo. Isso é feito recortando-se a imagem.

4.1.1 Recorte da imagem digital

A primeira operação feita em ambiente ArcGIS foi o recorte da área de interesse a fim de otimizar o processamento dos dados pelo computador.

Recortou-se um retângulo com extremidades 23°05'40", 46°02'42", 23°20'33" e 48°43'20" e o resultado pode ser visto nas Figuras 8 e 9.

4.1.2 Correção das falhas

Utilizou-se a função *sink* do ArcGIS para identificar os pontos de depressão no DEM, para consequentemente serem corrigidos. A Figura 10 apresenta a matriz correspondente às células com ocorrência dessas falhas.

Após corrigirem-se as falhas de *sinks*, com a ferramenta *fill*, obtém-se um DEM a partir do qual se é possível identificar com mais racionalidade as direções de fluxo, que é a próxima etapa do geoprocessamento. Esse novo DEM é apresentado na Figura 13.

4.1.3 Direções de fluxo

Nessa etapa, cada célula da matriz recebe um valor correspondente à direção para onde o fluxo efluirá a partir desta dada célula. a direção é dada em potência de 2 (1, 2,



Figura 8 Imagem digital (DEM), com ênfase para a região recortada

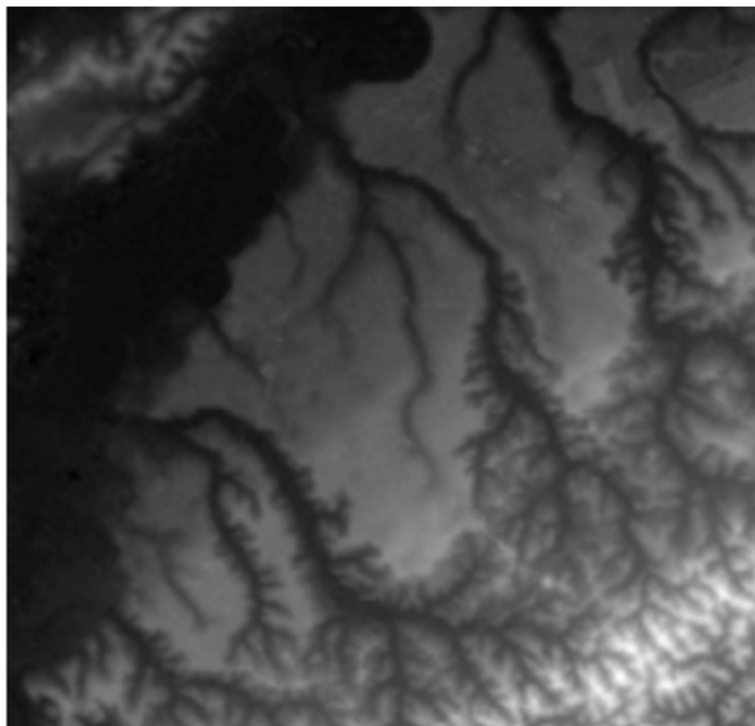


Figura 9 Recorte do DEM, com valores inteiros (*integer*)

4, 8, 16, 32 e 64), que correspondem aos pontos cardeais e colaterais (L, SE, S, SO, O, NO, N e NE) respectivamente, conforme Figura 12.

A Figura 13 apresenta as direções de fluxo para cada célula da matriz, com cor conforme a matriz *Direction Code* da Figura 12.

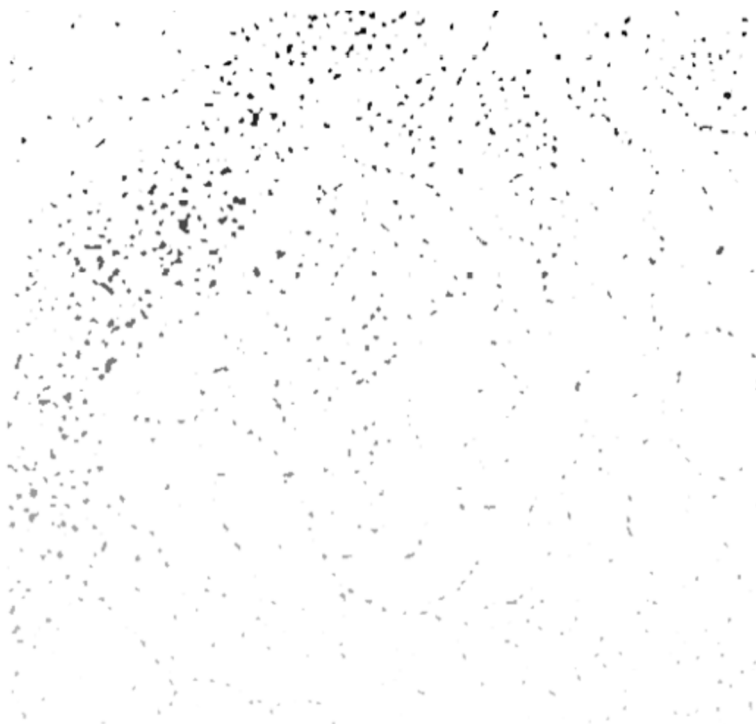


Figura 10 Determinação das falhas tipo *Sink* do DEM

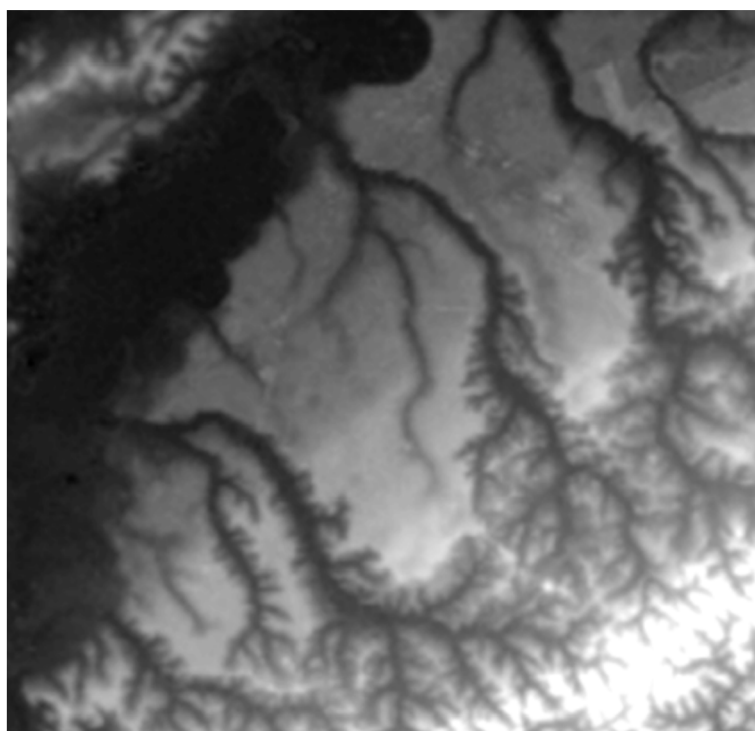


Figura 11 Recorte do DEM, após correção das falhas

4.1.4 Fluxo acumulado

A matriz de fluxo acumulado é gerada a partir da matriz de direções de fluxo. Nessa etapa, é importante adotar uma condição (ferramenta *Con*) que impõe um limite de valor a partir do qual a célula é componente do sistema de drenagem. Neste trabalho,



Figura 12 Matriz *Direction Code* Representação das 8 direções (D8) de modelagem de fluxo proposta por Jenson e Domingue (1988). (ESRI)

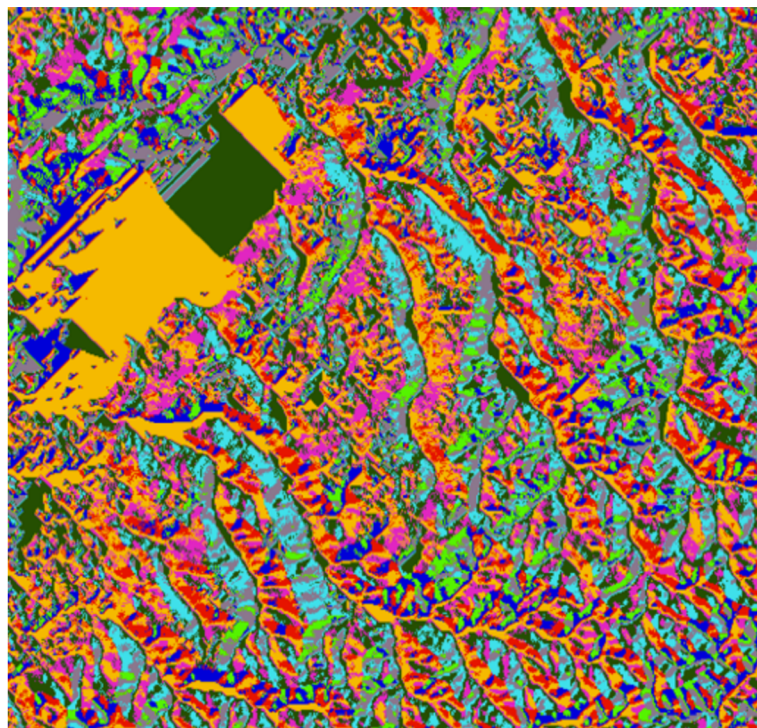


Figura 13 Direção do fluxo

este limite considerado foi **100** e a matriz resultante encontra-se na Figura 14. Percebe-se que já é possível identificar caminhos com feições semelhantes a de um rio, ou córrego.

4.1.5 Exutórios das sub-bacias (Pour points)

Uma vez que a modelagem Precipitação–Vazão é feita para cada trecho homogêneo do córrego, foi necessário fazer uma visita a campo, a fim de identificar os trechos de diferentes características e, consequentemente, dar continuidade ao trabalho.

Fez-se portanto uma visita técnica por todo o percurso do córrego Senhorinha, no dia 04 de julho de 2013. Durante a visita, o córrego foi discretizado em 7 trechos com características que foram consideradas homogêneas pelo autor.

Vale lembrar que para cada trecho é necessário delimitar a área de contribuição,



Figura 14 Matriz de fluxo acumulado

ou seja, a área que drena água para esse determinado trecho. Sendo assim, o ponto a montante de cada trecho foi considerado o exutório da sub-bacia a sua montante. Dessa forma, obtiveram-se as áreas de contribuição para cada um dos trechos.

As Figuras que apresentam as imagens dos trechos homogêneos do Córrego Senhorinha e sua representação em AutoCAD encontram-se no Apêndice A.1.

4.1.6 Delimitação das sub-bacias

Uma vez que se determinaram os limites dos trechos homogêneos do córrego, ou seja os *pour points*, é possível se determinar todas as células que escoam água da chuva para cada um desses pontos, ou seja, as áreas de contribuição.

Essa operação é feita com a ferramenta *Watershed* e o resultado é obtido em formato matricial. Em seguida são feitas algumas operações a fim de transformar a imagem matricial em um mapa vetorial, que se encontra apresentado na Figura 15.

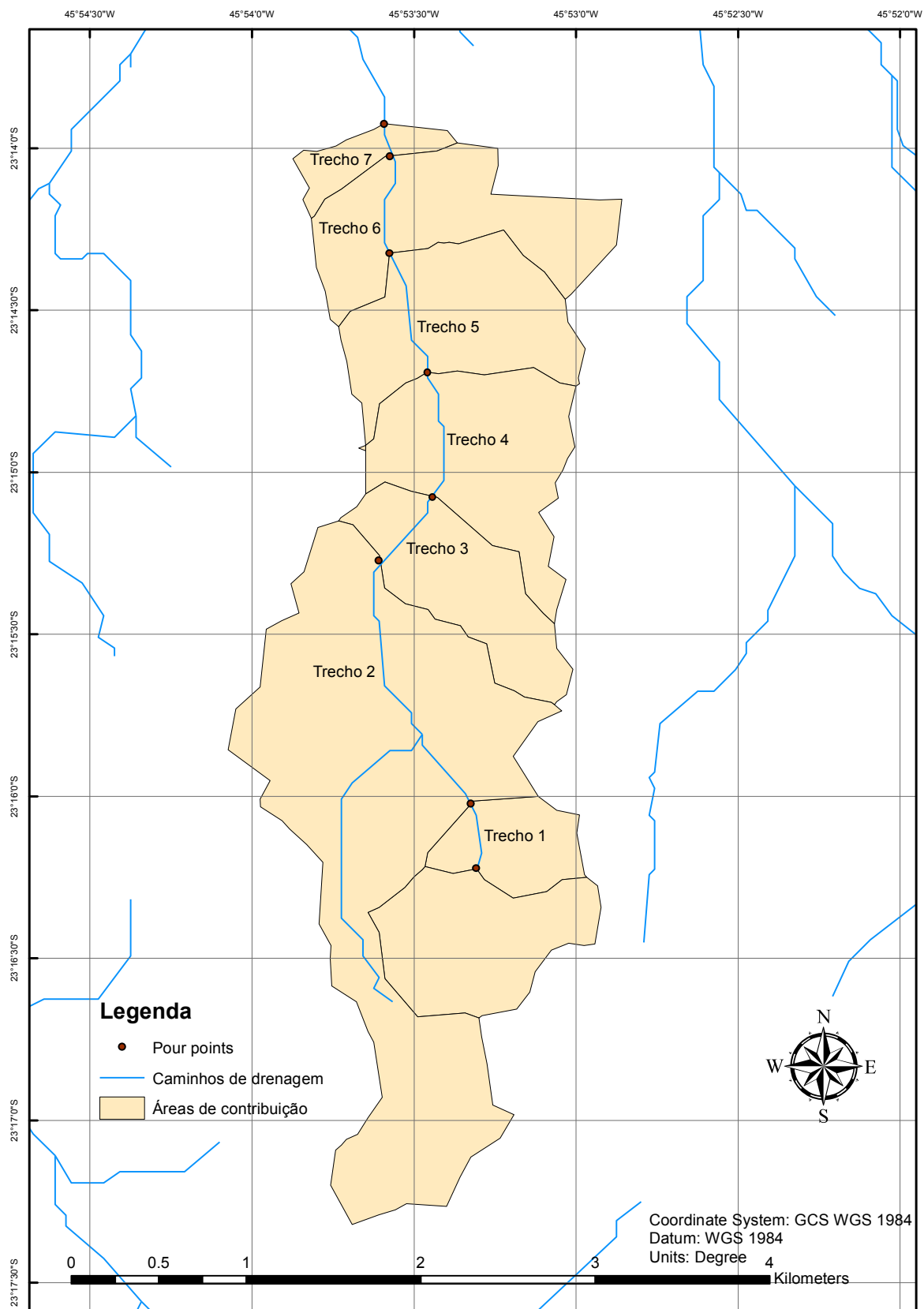


Figura 15 – Mapa gerado com os trechos e suas respectivas áreas de contribuição

4.2 Modelagem IPHS1

4.2.1 Obtenção dos parâmetros

4.2.1.1 Discretização dos trechos

Conforme citado anteriormente, a bacia hidrográfica foi subdividida em 7 trechos considerados homogêneos pelo autor.

No IPHS1, cada trecho d'água é representado por operações hidrológicas do Módulo Rio, ou seja, propagação de água em canais. (VILLANUEVA, 2004)

O método de propagação do escoamento em canais adotado foi o Método de Muskingum-Cunge Linear, para o qual devem-se fornecer os seguintes parâmetros de cada trecho:

- Comprimento do trecho de propagação;
- Cota de fundo de montante;
- Cota de fundo de jusante;
- Altura do canal;
- Largura do canal;
- Rugosidade dos sub-trechos;

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de entrada referentes aos trechos d'água conforme explanado.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada referentes aos trechos d'água

Item	unidade	1	2	3	4	5	6	7
Comprimento do trecho	m	383	3720	1270	1450	1210	1200	480
Cota de fundo de montante	m	641	635	617	610	601	599	590
Cota de fundo de jusante	m	635	617	610	601	599	590	587
Altura do canal H	m	4.33	1.20	3.2	1.96	1.70	2.14	2.00
Largura do canal B	m	3.31	4.20	7.4	6.9	2.40	10.36	7.80
Rugosidade do sub-trecho	-	0.045	0.045	0.050	0.028	0.033	0.035	0.028

4.2.1.2 Áreas de contribuição

As áreas de contribuição referentes a cada trecho homogêneo do córrego podem ser obtidas diretamente quando finalizadas as operações do ArcGIS e conforme pode ser visto na Figura 15. A Tabela 2 apresenta os valores das áreas de cada sub-bacia.

Tabela 2 – Áreas de contribuição obtidas pelo ArcGIS

Trecho	Área (m^2)	Área (km^2)	Área acum (km^2)
1	1064700	1.0647	1.0647
2	3019500	3.0195	4.0842
3	666900	0.6669	4.7511
4	905400	0.9054	5.6565
5	855000	0.8550	6.5115
6	852300	0.8523	7.3638
7	171900	0.1719	7.5357

4.2.1.3 Chuva de projeto

O conhecimento das características das precipitações intensas de curta duração é de grande importância para o dimensionamento de obras hidráulicas, tais como galerias de águas pluviais, canalizações de córregos, calhas de escoamento, bueiros, vertedores de barragens e canais de irrigação e de drenagem.

Para certa intensidade de chuva efetiva, admitida constante e igualmente distribuída sobre uma bacia hidrográfica, a máxima vazão superficial a ser verificada na sua seção de saída corresponde a uma duração de chuva igual ao tempo de concentração da bacia, a partir da qual a vazão seria constante se assim a chuva permanecesse. Assim, o dimensionamento das obras hidráulicas exige, além do conhecimento das características hidráulicas da bacia hidrográfica, o conhecimento, também, da relação entre a intensidade, a duração e a frequência da precipitação. (MAGNI; CURI, 2006)

- Equação IDF

As relações entre intensidade, duração e frequência das precipitações intensas (denominadas Equações IDF) devem ser deduzidas a partir das observações de chuvas ocorridas durante um período suficientemente longo para que seja possível estimar probabilidades de recorrência pelas frequências amostrais. Essas relações são traduzidas por uma família de curvas intensidade - duração, uma para cada frequência (ou para cada período de retorno, que é igual ao inverso da frequência acumulada).

Nesse estudo, utilizou-se a equação IDF obtida com dados do posto pluviográfico D2-021R (São Francisco Xavier), localizado no município de São José dos Campos. Essa equação foi obtida após atividades de monitoramento fluviométrico realizadas a interesse da Prefeitura Municipal de São José dos Campos, por engenheiros da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. Poderia ter sido utilizada a IDF de Taubaté, cidade que dista cerca de 40 km de São José dos Campos, que é bastante difundida na literatura, no entanto o autor optou por não utilizá-la.

Os dados disponíveis de precipitações, utilizados no trabalho supracitado, correspondem a 20 anos de observações, referentes aos períodos entre 1974-1984 e 1992-2000, o que foi considerado suficiente para a definição de equações que relacionam intensidade, duração e frequência das precipitações intensas. (MAGNI; CURI, 2006)

A equação IDF em questão é

$$i = 31,3034 \cdot (t+20)^{-0,8662} + 3,7081 \cdot (t+10)^{-0,7598} \cdot (-0,4801 - 0,9171 \cdot \ln(\ln(\frac{T}{T-1}))) \quad (4.1)$$

em que i é a intensidade da chuva, em mm/h, t é o tempo de duração, em minutos e T é o tempo de duração, em anos.

Hietograma de projeto é uma sequência de precipitações capaz de achar a maior enchente para a qual uma obra de drenagem deve ser projetada. A Tabela 3 apresenta os valores de intensidade (em mm/h) para diversos períodos de retorno e duração, conforme a IDF utilizada.

Tabela 3 – Valores de intensidade (em mm/h) de chuva de projeto

	Período de retorno T (anos)								
duração (min)	2	5	10	15	20	25	50	100	200
15	83.6	103.6	116.9	124.4	129.6	133.7	146.1	158.4	170.7
30	61.5	75.5	84.8	90.0	93.7	96.5	105.2	113.8	122.4
45	49.0	60.0	67.3	71.4	74.3	76.5	83.3	90.1	96.9
60	40.9	50.1	56.2	59.6	62.0	63.8	69.5	75.2	80.8
75	35.3	43.2	48.4	51.4	53.4	55.0	59.9	64.8	69.7
90	31.1	38.0	42.7	45.3	47.1	48.5	52.9	57.2	61.5
105	27.8	34.1	38.2	40.6	42.2	43.5	47.4	51.3	55.1
120	25.2	30.9	34.7	36.9	38.4	39.5	43.1	46.6	50.1
135	23.1	28.3	31.8	33.8	35.2	36.2	39.5	42.8	46.0
150	21.3	26.2	29.4	31.2	32.5	33.5	36.5	39.6	42.6
165	19.8	24.4	27.4	29.1	30.3	31.2	34.0	36.8	39.7
180	18.5	22.8	25.6	27.2	28.3	29.2	31.9	34.5	37.2

- Duração crítica

Para bacias hidrográficas de pequena área, em geral adota-se para a duração da chuva crítica o tempo de concentração. A validade dessa hipótese dá-se quando se admite que após a duração do tempo de concentração, a contribuição do escoamento superficial ao exutório atinge regime permanente. (TUCCI, 1995)

Diversas fórmulas têm sido formuladas para para quantificar o tempo de concentração. Vale ressaltar que as expressões são empíricas e portanto devem-se respeitar as condições sob as quais as equações foram obtidas.

Uma fórmula bastante aceita, e utilizada neste trabalho, para calcular esse parâmetro é através do método cinemático, que divide a bacia em N trechos homogêneos e calcula a velocidade de escoamento em cada trecho. Por fim, o tempo de concentração é calculado pela equação 4.2.

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{60} \cdot L_i \cdot V_i \quad (4.2)$$

Em áreas urbanas, aconselha-se dividir o tempo de concentração em duas parcelas, um tempo inicial, como sendo o tempo até a precipitação atingir a rede de drenagem, e um tempo de translação, correspondente ao percurso propriamente dito no canal. É possível também dividir o tempo inicial em dois tipos de escoamento, um em forma de lâmina sobre a superfície, que não chega a se propagar por 50 metros, e outro, que se forma em calhas rasas ou sarjetas. (TUCCI, 1995)

Calcularam-se também os tempos de concentração para as sub-bacias por outros métodos conhecidos na literatura, a fim de comparação, e os resultados encontrados encontram-se na Tabela 4.

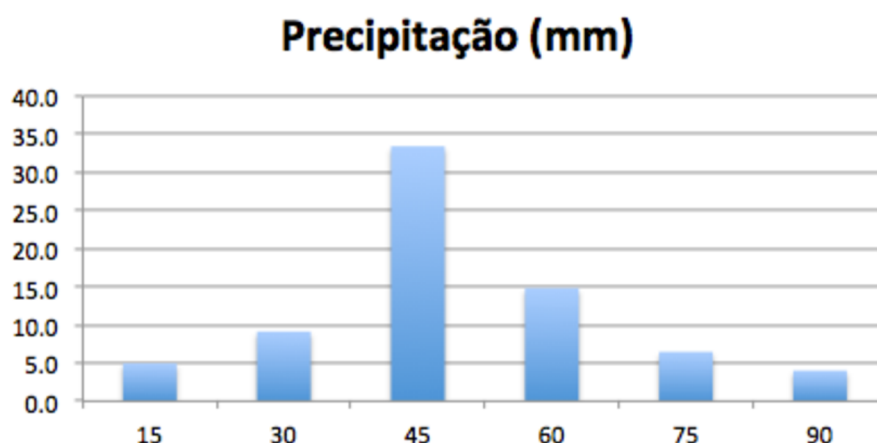
Tabela 4 – Tempos de concentração para as sub-bacias calculadas por diversos métodos

Sub-bacia	Tc (min)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Kirpich	9.9	7.4	55.3	17.3	20.8	14.9	16.0	9.0
FAA	20.9	16.6	70.2	30.6	34.8	27.3	29.0	19.5
Onda cinemática	16.6	13.2	63.5	25.7	29.6	22.8	24.2	15.4
SCS - "Lag formula"	17.7	12.2	112.9	37.1	37.2	25.3	26.7	24.5
Método cinemático	9.35	8.24	21.74	11.28	13.12	11.28	13.16	9.20

Sendo assim, de posse do tempo de concentração calculado, adotou-se o período de duração da chuva de projeto como sendo 90 minutos. O tempo total foi dividido em 6 intervalos, cada um com 15 minutos, conforme pode-se ver na Figura 16. Vale lembrar que este hietograma foi gerado pelo método dos blocos alternados, que sugere a distribuição temporal da precipitação a partir da equação IDF conhecida. O período de retorno escolhido foi 25 anos, por se tratar de verificação da necessidade de obra de drenagem. Maiores informações sobre o método dos blocos alternados podem ser encontradas em (TUCCI, 1995).

4.2.1.4 Determinação da precipitação excedente

Conforme foi apresentado em 2.1.4.1, a determinação da precipitação excedente foi feita pelo método da Curva-Número do SCS. Como a modelagem em questão trata-se de uma região urbanizada, atentou-se para a utilização das tabelas que melhor retratavam a ocupação do solo nesse tipo de região.

Figura 16 Hietograma de projeto ($Tr = 25$ anos)

Uma vez que a ocupação não é homogênea em cada área de contribuição, o CN utilizado foi a média ponderada pelas áreas de cada tipo de ocupação, conforme explicado em 2.1.4.1. A determinação da ocupação do solo foi feita manipulando-se, em AutoCAD, dados geográficos da bacia, obtidas no ArcGIS, e imagens de satélite, visualizadas no Google Earth. A ocupação da bacia pode ser vista na Figura 17 e contabilizada, em termos percentuais, com auxílio da Tabela 5.

Tabela 5 Ocupação de cada sub-bacia, em %

Ocupação \ Sub-bacia	0 e 1	2	3	4	5	6	7
Bosques ou zonas florestais	12.6	5.9	5.9	0.0	0.0	11.2	15.3
Espaco aberto, parque	13.6	11.1	18.7	11.6	12.0	7.0	34.0
Zonas residenciais	2.5	2.8	2.5	3.0	3.0	2.8	1.7
Estacionamentos, telhados, viadutos	47.3	53.2	48.3	56.7	56.4	52.4	32.5
Arruamentos e estradas	24.0	27.0	24.5	28.7	28.6	26.6	16.5

Nos dias anteriores ao dia 23 de março de 2013, para o qual foi a chuva de projeto foi modelada, choveu bastante, o que é comum nessa época do ano. Portanto, considerou-se a condição III de umidade antecedente, que caracteriza solos saturados. A classificação do solo quanto ao grupo hidrológico foi feita após análise granulométrica de amostras de solo coletadas nas margens do córrego e de inferências técnicas quanto à capacidade de infiltração dos solos da região.

A Tabela 6 apresenta o cálculo resumido do CN para cada sub-bacia em estudo.

Vale ressaltar que a sub-bacia denominada 0 é aquela que está a montante da entrada do Trecho 1, utilizada para para o cálculo do hidrograma de entrada do referido trecho.



Figura 17 Ocupação da bacia Google Earth (adaptado)

4.2.2 Resultados da modelagem

Executada a modelagem, é importante considerar dois aspectos com relação à vazão máxima de escoamento em cada trecho do córrego:

Tabela 6 – Cálculo resumido de CN para cada área de contribuição

Item	Unidade	Sub-bacia							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Área	km ²	0.7453	0.3194	3.0195	0.6669	0.9054	0.8550	0.8523	0.1719
Talvegue	%	5.0%	8.5%	1.5%	4.0%	3.4%	4.8%	4.1%	5.3%
Solo	-	D	D	C	B	B	C	D	B
CN calc	-	93	93	94	90	94	94	95	81
Umidade	-	III	III	III	III	III	III	III	III
CN corrig	-	97.2	97.2	97.6	96.0	97.6	97.6	98.0	91.6
S	%	18	18	16	29	15	15	13	58

- Altura da lâmina d'água
- Tipo de escoamento

Para a análise, determinou-se, por meio dos hidrogramas gerados pelo IPHS1, a vazão máxima de entrada e de saída de cada trecho e consequentemente adotou-se o máximo valor para o diagnóstico do problema.

A altura da lâmina d'água deve ser analisada a fim de se verificar a capacidade, em termos de vazão, de cada trecho do córrego. Se a lâmina d'água ultrapassar a altura útil da seção, conclui-se pela insuficiência do trecho em suportar a vazão escoada. O resumo desses cálculos pode ser visto na Tabela 7.

Para determinar o tipo de escoamento, utilizou-se a teoria da Energia ou Carga Específica, a qual afirma que para cada nível de energia pre-fixado, existem duas possibilidades de veicular uma determinada vazão. Esses dois escoamentos possuem características bem diferentes, um chamado de escoamento rápido, torrencial ou supercrítico e outro chamado de lento, fluvial ou subcrítico (PORTO, 2006). O resumo dos cálculos para classificação do escoamento pode ser visto na Tabela 8

4.2.2.1 Hidráulica de canais

De posse das vazões de pico dos trechos, é possível compará-las com as capacidades de transporte dos mesmos. Para essa comparação, utilizou-se a fórmula de Manning, que calcula a velocidade do escoamento em canais abertos. Para isso, simularam-se situações, com os parâmetros hidrogeométricos, ou seja, as propriedades do escoamento que estão relacionadas com a seção transversal: profundidade, cota do nível d'água, largura superficial, área molhada, perímetro molhado e raio hidráulico. (TUCCI, 1995)

Para cada trecho, estimou-se a lâmina d'água para a vazão de pico e consequentemente calculou-se a velocidade pela fórmula de Manning. Com a velocidade e a lâmina d'água de hipótese, calculou-se a capacidade de vazão do trecho e iterativamente

determinou-se a lâmina d'água para a qual as vazões, de Manning e do hidrograma resultante, são idênticas. A Tabela 7 apresenta o resumo dos cálculos e verificação da lâmina d'água máxima em cada trecho.

Para calcular a vazão, basta multiplicar a velocidade pela área molhada. A Tabela 8 apresenta o resumo dos cálculos de classificação do escoamento.

Tabela 7 – Cálculos e verificação da lâmina máxima

Trecho	Q _{ent} (m^3/s)	Q _{sai} (m^3/s)	Q _{max} (m^3/s)	y (m)	y máx (m)	Lâmina Ok?	Dif
1	21.67	19.47	21.67	0.94	4.22	SIM	78%
2	28.71	24.47	28.71	1.35	3.20	SIM	58%
3	77.12	72.20	77.12	1.47	1.96	SIM	25%
4	81.30	79.48	81.30	6.02	1.70	NAO	-254%
5	93.26	29.13	93.26	1.41	2.14	SIM	34%
6	33.91	33.56	33.91	1.41	2.00	SIM	30%
7	53.16	52.65	53.16	1.15	2.25	SIM	49%

Tabela 8 – Classificação do escoamento em cada trecho

Trecho	Q _{ent} (m^3/s)	Q _{sai} (m^3/s)	Q _{max} (m^3/s)	Vel (m/s)	Froude	Escoamento
1	21.67	19.47	21.67	6.67	2.20	Supercrítico
2	28.71	24.47	28.71	4.23	1.16	Supercrítico
3	77.12	72.20	77.12	6.79	1.79	Supercrítico
4	81.30	79.48	81.30	5.63	0.73	Subcrítico
5	93.26	29.13	93.26	6.36	1.71	Supercrítico
6	33.91	33.56	33.91	3.08	0.83	Subcrítico
7	53.16	52.65	53.16	6.20	1.85	Supercrítico

5 Conclusões

5.1 Diagnóstico

Observando-se os valores da Tabela 7, é possível inferir que à exceção do Trecho 4, com capacidade para 28% da vazão simulada para a precipitação de projeto, os demais trechos apresentaram vazão de pico abaixo de sua capacidade, o que indica que a seção transversal está apta a operar com aquela chuva de projeto, no que se refere ao potencial de inundação.

Entrevistando-se um morador da região, foi possível confirmar a baixa capacidade do trecho cuja modelagem apontou inundação. O entrevistado afirmou que é comum, nas proximidades daquele trecho, subir o nível do córrego e que já houve diversos eventos de alagamento, além de danos estruturais a duas pontes nas proximidades. Em suas palavras, “(...) a água chega à avenida, embora não entre nas casas.”

Com base no tipo de escoamento, apresentado na Tabela 8, conclui-se que o escoamento é classificado *supercrítico* em 5 dos 7 trechos, para as vazões referentes à chuva de projeto. Esse resultado é interessante, principalmente quanto ao Trecho 7, a montante do local onde se localizava a ponte da Av. Guadalupe que cedeu em março de 2013, o qual apresenta $Fr = 1,85$. Esse valor, e consequentemente o escoamento supercrítico, também chamado de torrencial, representa um escoamento de alta velocidade, que foi responsável pela intensificação da erosão nas margens do córrego e consequentemente pela ruptura da estrutura de fundação da antiga ponte. A velocidade de escoamento alta também agrava o transporte de sedimentos e consequentemente o assoreamento do curso d'água em trechos subsequentes, com menores velocidades.

5.2 Comentários

Em termos práticos, o projeto e a construção de um canal estão condicionados por uma série de restrições de natureza variada. Em um sistema de drenagem urbana, por exemplo, o projeto pode depender de condições topográficas, geotécnicas, construtivas, de influência do sistema viário, existência de obras de arte, faixa de domínio, entre outros. (PORTO, 2006)

De acordo com PORTO, a velocidade média máxima desejável para canais em terrenos de aluvião, como é o caso do Córrego Senhorinha, é de 0,91 m/s, a fim de se evitar a erosão elevada e a mínima é de 0,84 m/s, de modo a evitar a deposição de lama, lodo e o crescimento de plantas aquáticas. Conforme percebe-se pela Tabela 8, as

velocidades em todos os trechos, para a chuva de projeto, estão acima do limite máximo.

O engenheiro projetista deve também atentar para a proteção dos taludes dos canais escavados em solo nas transições próximas a pontes, bueiros e outras estruturas especiais. Uma medida eficaz é o revestimento desses taludes com concreto, gabiões ou alvenaria, de modo a se considerar a rugosidade do novo material. (PORTO, 2006)

Uma possível solução para canais urbanos que apresentam eventos desastrosos, como é o caso do Córrego Senhorinha, é o uso de uma seção mista, na qual em época de estiagem a vazão de escoamento confina-se na parte central do canal, e durante as cheias o leito secundário passa a ser ocupado. Além de simples dimensionamento e execução, a seção composta ainda permite o uso do leito secundário para outros tipos de atividades quando de sua não utilização, o que agrega valor econômico-social para a região.

5.3 Dificuldades encontradas

As principais dificuldades que surgiram ao longo da elaboração deste trabalho foram com relação à falta de dados hidrológicos para subsidiar o estudo. A ausência de postos fluviográficos na região e até mesmo a escassez de informações pluviográficas, em quantidade e qualidade adequadas, foram os principais entraves para a maior credibilidade do modelo.

Além disso, tratando-se diretamente com a preparação e execução do modelo, pode-se dizer que a grande variedade de métodos existentes para o cálculo do tempo de concentração, por exemplo, podem agregar incertezas para a veracidade da modelagem. Embora haja diversos métodos e fórmulas para obter os parâmetros, não se pode dizer que esse tipo de problema tem respostas satisfatórias (TUCCI, 1995).

5.4 Sugestões de continuação do trabalho

Dadas as dificuldades apontadas em 5.3, o autor sugere um maior monitoramento e maior instalação de postos pluviométricos e pluviográficos, a fim de se obterem dados de chuvas com maior representatividade e portanto elaborar modelos com maior acurácia.

Além disso, é sugerido um estudo experimental, com medidores de vazão e velocidade, ao longo do Córrego Senhorinha, a fim de comparar os resultados experimentais com os obtidos nesse trabalho e assim poder calibrar o modelo.

A abordagem completa do problema de drenagem urbana da zona sul de São José dos Campos deve estender-se para o Rio Vidoca, cuja bacia, conforme comentou-se em 3.3, é predominantemente urbanizada. O rio tem ocorrências frequentes de inundações, além de elevado grau de erosão nas margens e assoreamento.

O monitoramento hidrológico desses cursos d'água seria útil para mapear áreas de risco e propor melhorias ao Plano Diretor de Drenagem Urbana do município.

5.5 Aspectos qualitativos

A abordagem apresentada neste trabalho priorizou a análise no que diz respeito à quantificação de vazões e velocidades de escoamento, que é o que de fato caracteriza eventos de inundação, conforme explicado ao longo do texto.

Considerando o aspecto qualitativo, é importante comentar que principalmente devido aos processos de urbanização, comuns nas grandes cidades brasileiras, a poluição dos cursos d'água devido ao lançamento clandestino de esgoto e resíduos sólidos (lixo) é também um problema gravíssimo.

A impermeabilização da região, comprovada já que a região estudada apresenta CN médio de 96.6, faz com que o escoamento carregue material solto ou solúvel, que se encontra depositado na região, o que tende a aumentar significativamente a carga poluente no córrego.

Essa poluição apresenta diversas origens, a citar a abrasão e o desgaste das ruas pelos veículos, lixo acumulado nas ruas e calçadas, resíduos orgânicos de pássaros e animais domésticos, resíduos de combustível, óleo e graxa deixados pelos veículos, atividades de construção, principalmente ligadas a movimentações de terra para novas construções, o que foi percebido em uma das visitas de campo. Além disso, são contribuintes para a poluição o lançamento clandestino de esgoto e o vazamento de produtos químicos.

Em um córrego, ou rio, essas condições de poluição transformam um evento probabilístico (chuva crítica) em um potencial disseminador de doenças de veiculação hídrica e extremamente prejudiciais, como diarreia infecciosa, cólera, leptospirose, hepatite e esquistossomose.

5.6 Considerações finais

As enchentes urbanas são hoje um problema crônico do Brasil, e suas principais causas são a impermeabilização do solo e a ocupação das várzeas dos rios. Além disso, a gerência inadequada do planejamento da drenagem e projetos de engenharia mal dimensionados são agravantes para esse quadro. Com relação a projetos mal elaborados, isso pode ser retratado quando se dimensiona um sistema de drenagem de modo a escoar rapidamente a precipitação excedente, quando na verdade sabe-se que um bom sistema de drenagem é aquele que drena o escoamento sem produzir impactos negativos nem no local, nem a jusante (TUCCI, 1995).

Além das considerações técnicas, que ficam sob responsabilidade do engenheiro projetista, deve-se salientar a necessidade de haver harmonia entre os diversos atores do meio urbano, que são a população e o poder público. Cabe à população a consciência de que é errado dispor seus resíduos em lugares indevidos, bem como fazer construções ilegais e geralmente precárias nas margens dos rios e córregos. Ademais, é de responsabilidade do poder público diagnosticar, projetar e operar adequadamente obras hidráulicas de caráter público, além de educar e quando necessário punir a população que descumpre as legislações vigentes quanto a esse apelo, tanto do ponto de vista hidrológico, como do ponto de vista sanitário. É necessário que se elaborem Planos Diretores de Drenagem, a fim de atenuar ao máximo os prejuízos econômicos, ambientais e de saúde pública causados pelo descuido exercido quando se trata de saneamento.

Vale ressaltar que saneamento tem caráter preventivo, ou seja, trabalha-se para evitar que surjam potenciais causadores problemas de saúde ao homem. No momento em que ocorre um desastre, são tomadas atitudes emergenciais, as quais elevam drasticamente os custos de reparo dos danos. A conta, por fim, é paga por toda a sociedade.

Referências

- CAMARA, D.; MONTEIRO. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. [S.l.]: DPI – INPE, 2005.
- CHOW, V. T. *Open–Channel Hydraulics*. [S.l.]: McGraw–Hill Book Company, 1959.
- COLLISCHONN, W.; RUTINÉLIA, T. *Introduzindo Hidrologia*. [S.l.]: IPH – UFRGS, 2011.
- CSERC, C. S. E. R. C. *The Watershed Game*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Engenharia_hidráulica>. Acesso em: 09 ago. 2013.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C. *Fundamentos de Geoprocessamento*. [S.l.], 2013.
- ESRI. *ArcGIS Help 10.1*. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html/>>. Acesso em: 10 ago. 2013.
- ESRI. *ESRI*. Disponível em: <<http://www.esri.com/>>. Acesso em: 10 ago. 2013.
- INPE, I. N. de P. E. *Topodata*. 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 09 ago. 2013.
- MACHADO, A. Tese de Mestrado, *Produção e transporte de sedimentos na bacia do rio Vidoca em São José dos Campos, São Paulo*. São José dos Campos: [s.n.], 2012. 105 p.
- MAGNI, T.; CURI. Atividade de determinação da equação de chuva intensa. *Prefeitura Municipal de São José dos Campos*, 2006.
- PORTO, R. d. M. *Hidráulica Básica*. [S.l.]: EESC - USP, 2006.
- SANTOS, G. M. Tese de Mestrado, *A Ocupação do Espaço e a Questão Sócio Ambiental na Bacia Hidrográfica do Córrego dos Freitas - São José dos Campos - SP*. São José dos Campos: [s.n.], 2007. 146 p.
- TUCCI, C. E. M. *Drenagem urbana*. [S.l.]: ed. ABRH – UFRGS, 1995.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. [S.l.]: ed. ABRH – UFRGS, 2011.
- URBANO, S. de P. *São José em dados – 2012*. [S.l.], 2012.
- USGS, U. G. S. *The Water Cycle - O Ciclo da Água*. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html/>>. Acesso em: 25 ago. 2013.
- VENDRAME, A.; SCOFIELD. Aspectos da evolução da urbanização e dos problemas de inundação em são josé dos campos. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2000.
- VILLANUEVA, A. e. a. *Modelo de Simulação Hidrológica IPHS1*. [S.l.], 2004.

A Apêndices

A.1 Trechos homogêneos



Figura 18 Trecho 1 (foto do autor)

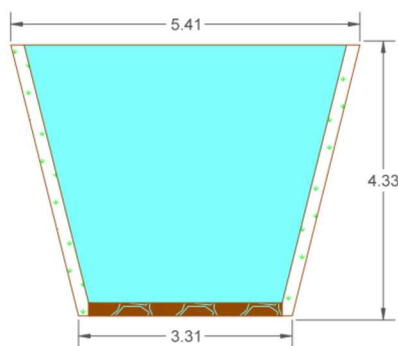


Figura 19 Trecho 1 (imagem do AutoCAD)



Figura 20 Trecho 2 (foto do autor)

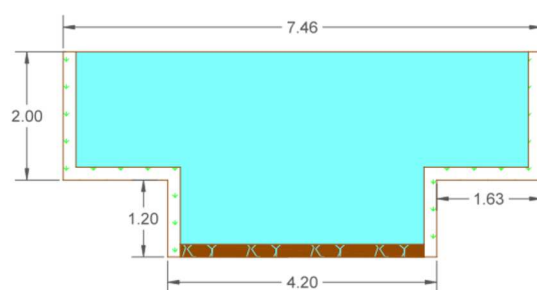


Figura 21 Trecho 2 (imagem do AutoCAD)



Figura 22 Trecho 3 (foto do autor)

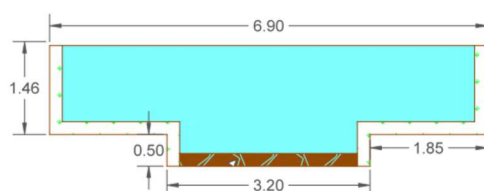


Figura 23 Trecho 3 (imagem do AutoCAD)



Figura 24 Trecho 4 (foto do autor)

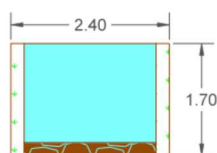


Figura 25 Trecho 4 (imagem do AutoCAD)



Figura 26 Trecho 5 (foto do autor)

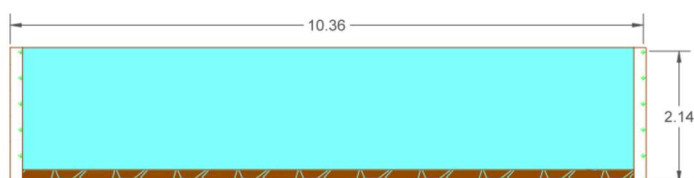


Figura 27 Trecho 5 (imagem do AutoCAD)



Figura 28 Trecho 6 (foto do autor)

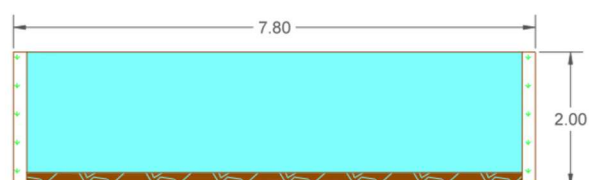


Figura 29 Trecho 6 (imagem do AutoCAD)



Figura 30 Trecho 7 (foto do autor)

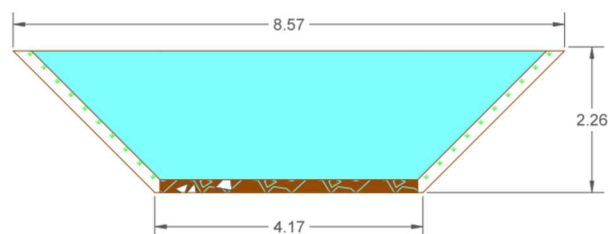


Figura 31 Trecho 7 (imagem do AutoCAD)

A.2 Hietogramas de projeto

Nos hietogramas, em cor amarela é apresentada a parcela de chuva que se “perde”, ou seja, que é interceptada pela vegetação, retida nas depressões do terreno, ou evaporadas antes do deflúvio. Já em verde está representada a parcela da chuva que escoa superficialmente, responsável pela vazão no córrego.

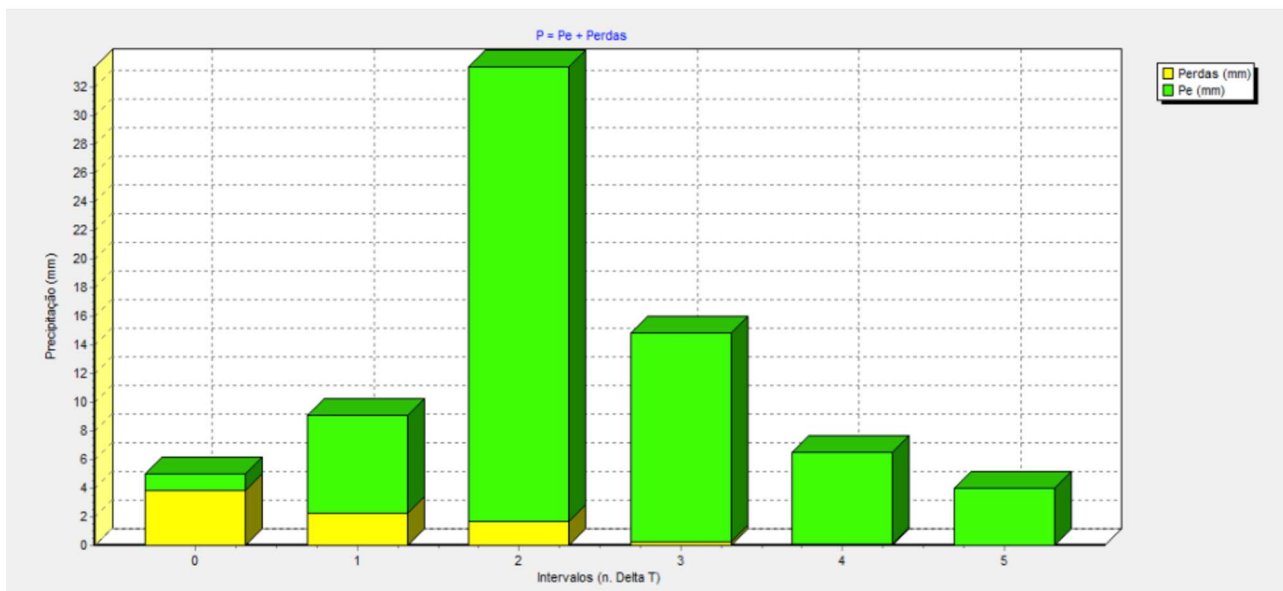


Figura 32 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 0

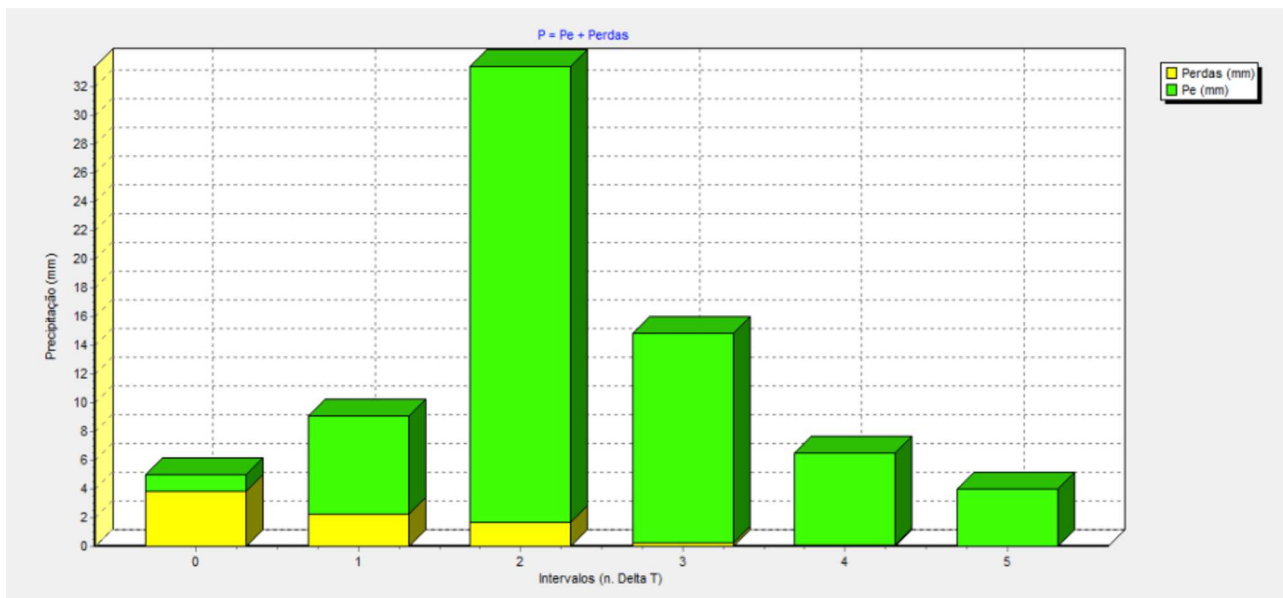


Figura 33 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 1

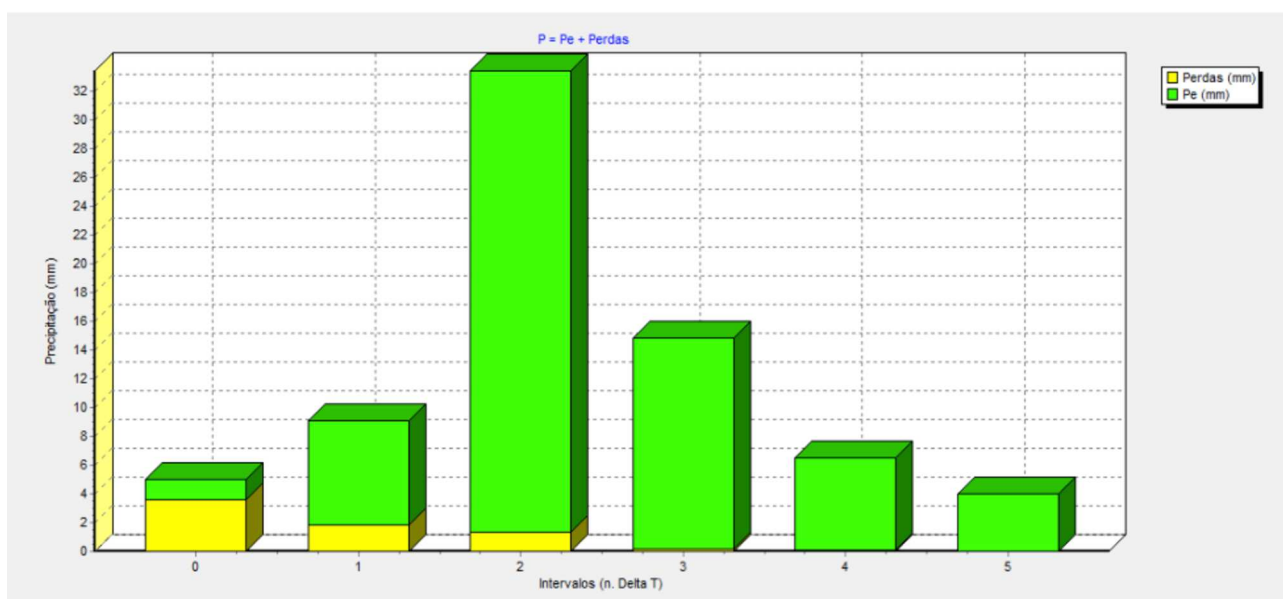


Figura 34 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 2

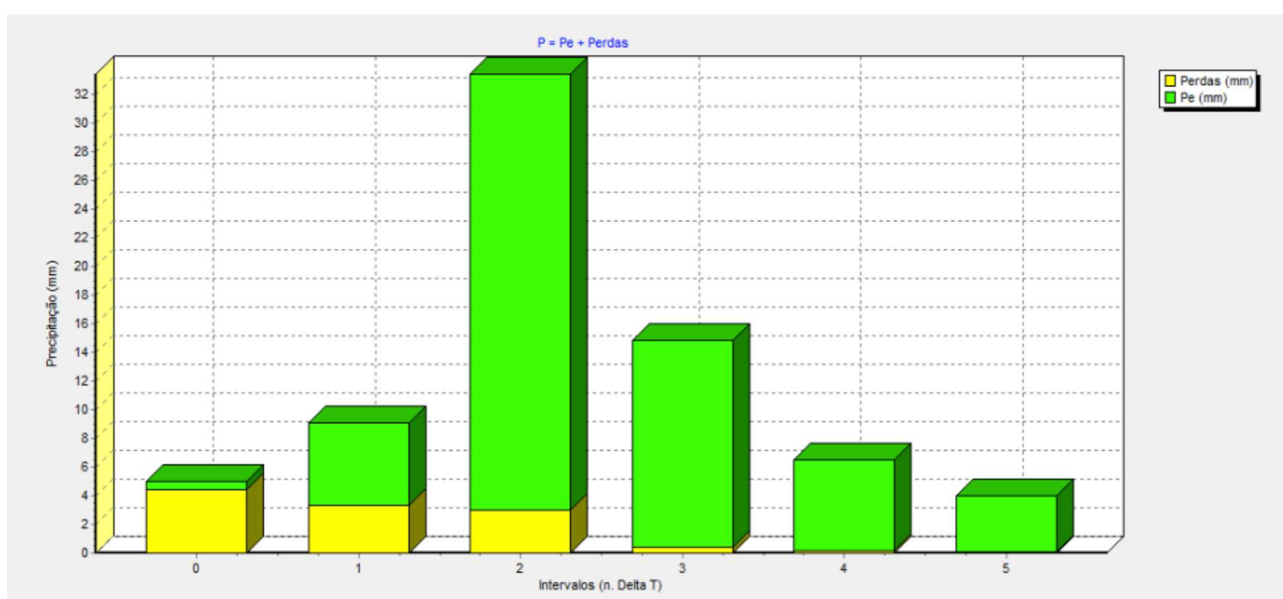


Figura 35 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 3

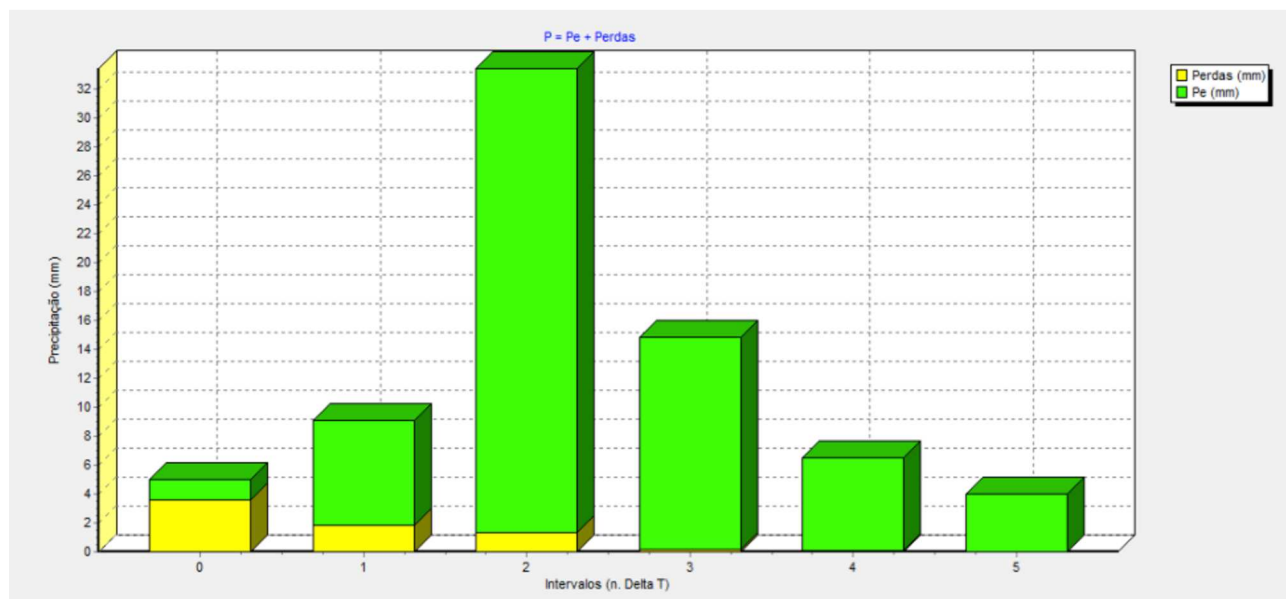


Figura 36 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 4

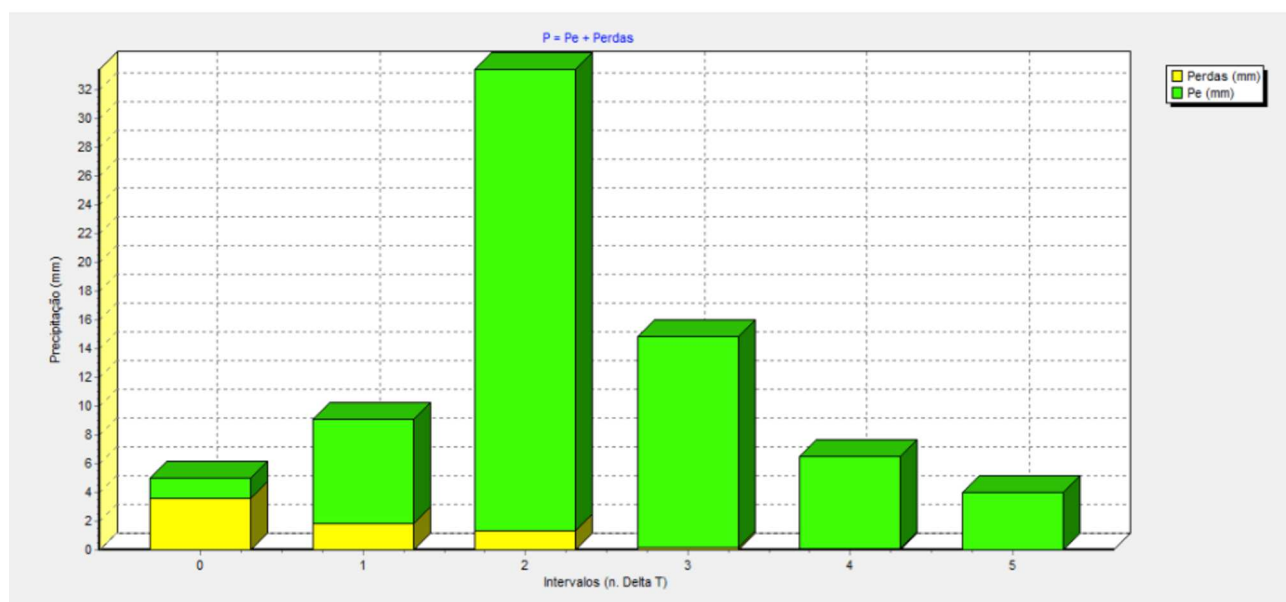


Figura 37 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 5

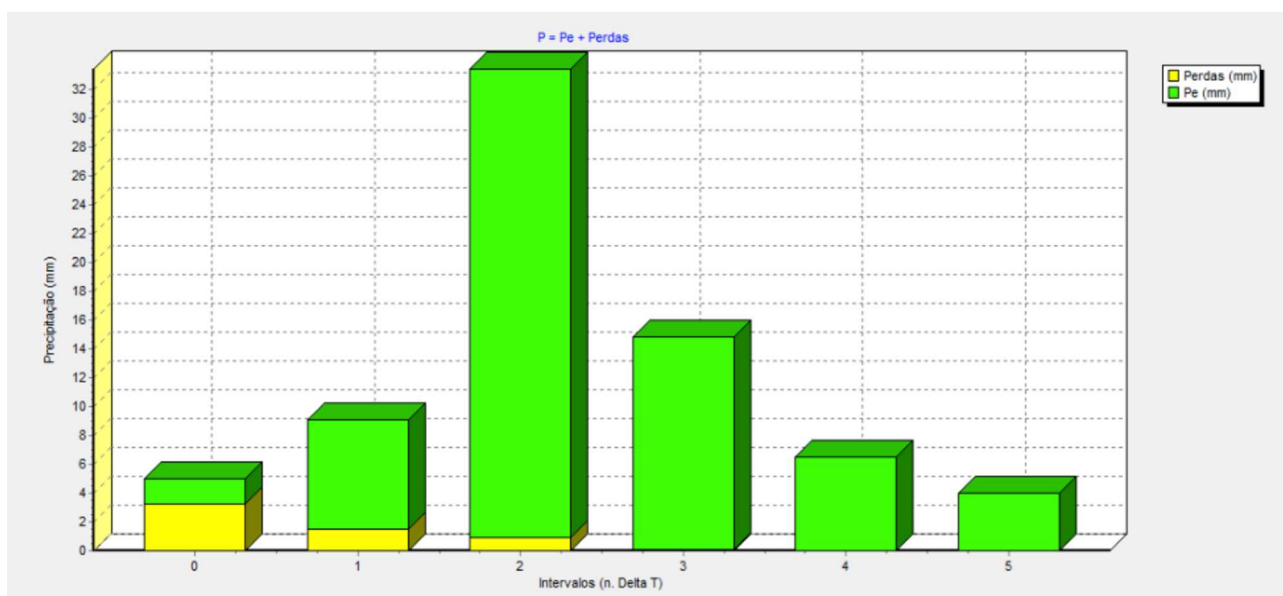


Figura 38 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 6

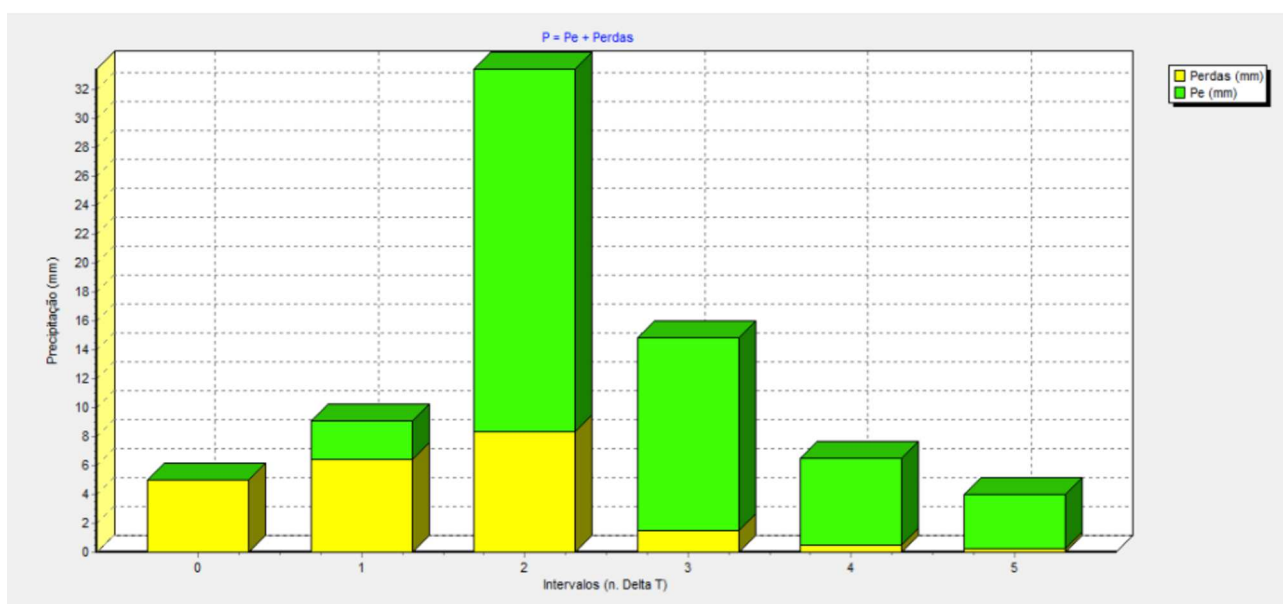


Figura 39 Hietograma de projeto: efetiva + perdas - Sub-bacia 7

A.3 Precipitação efetiva e hidrograma das sub-bacias

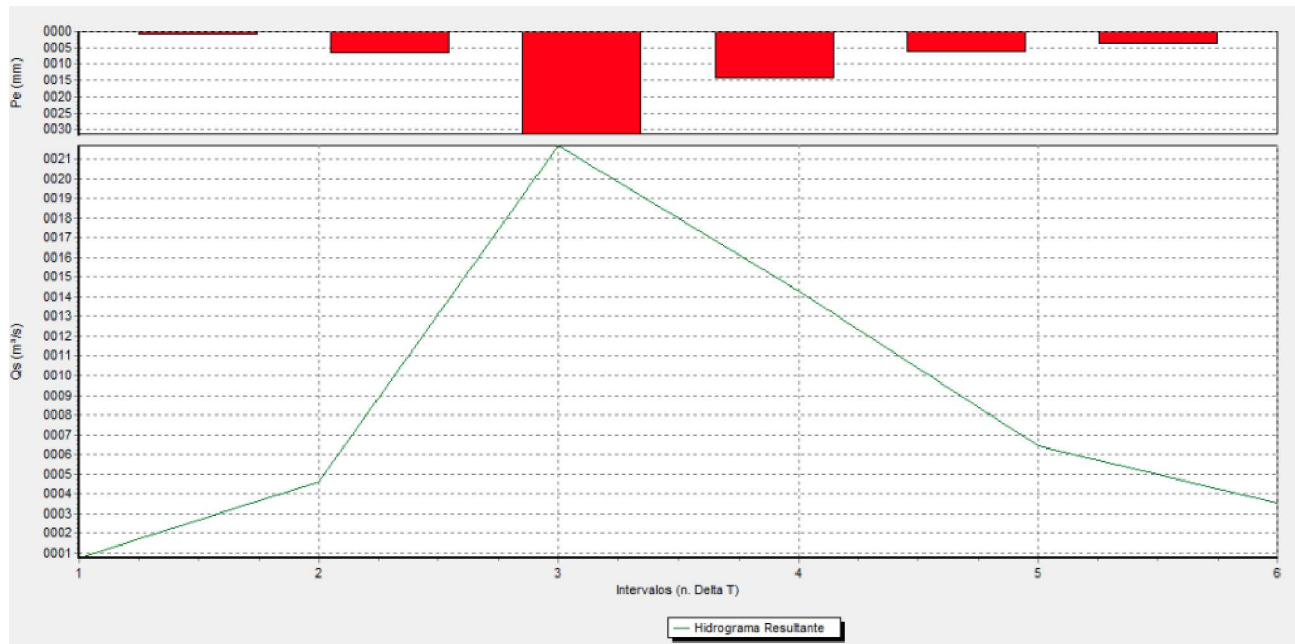


Figura 40 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 0

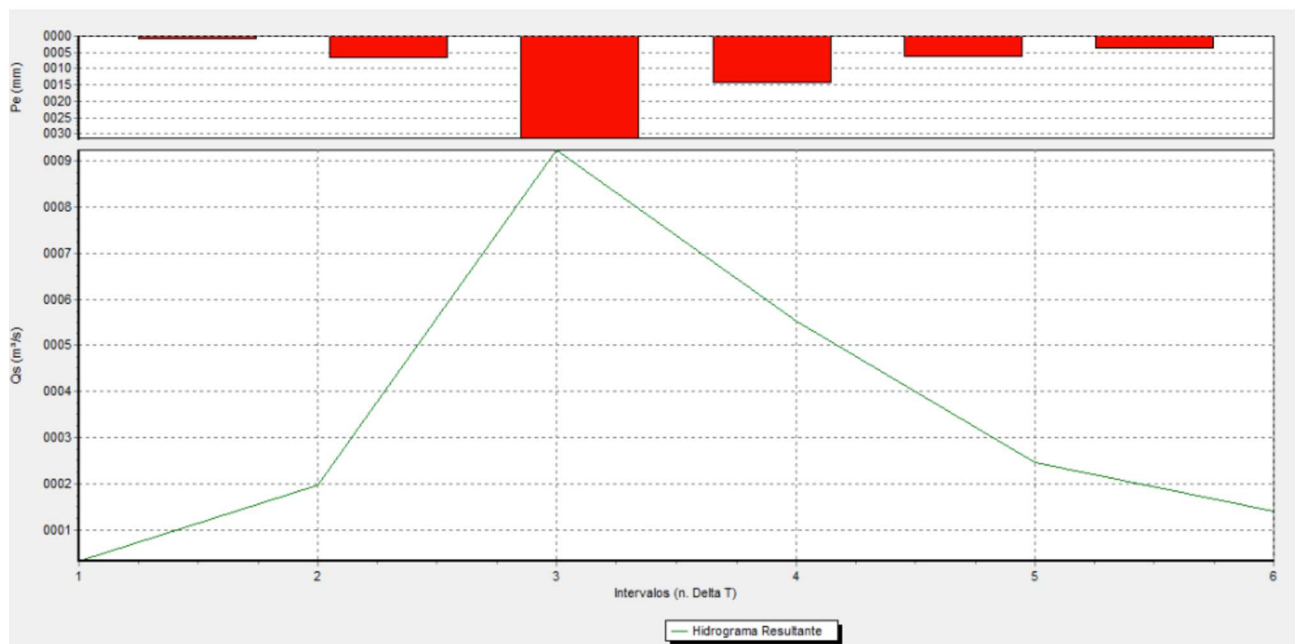


Figura 41 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 1

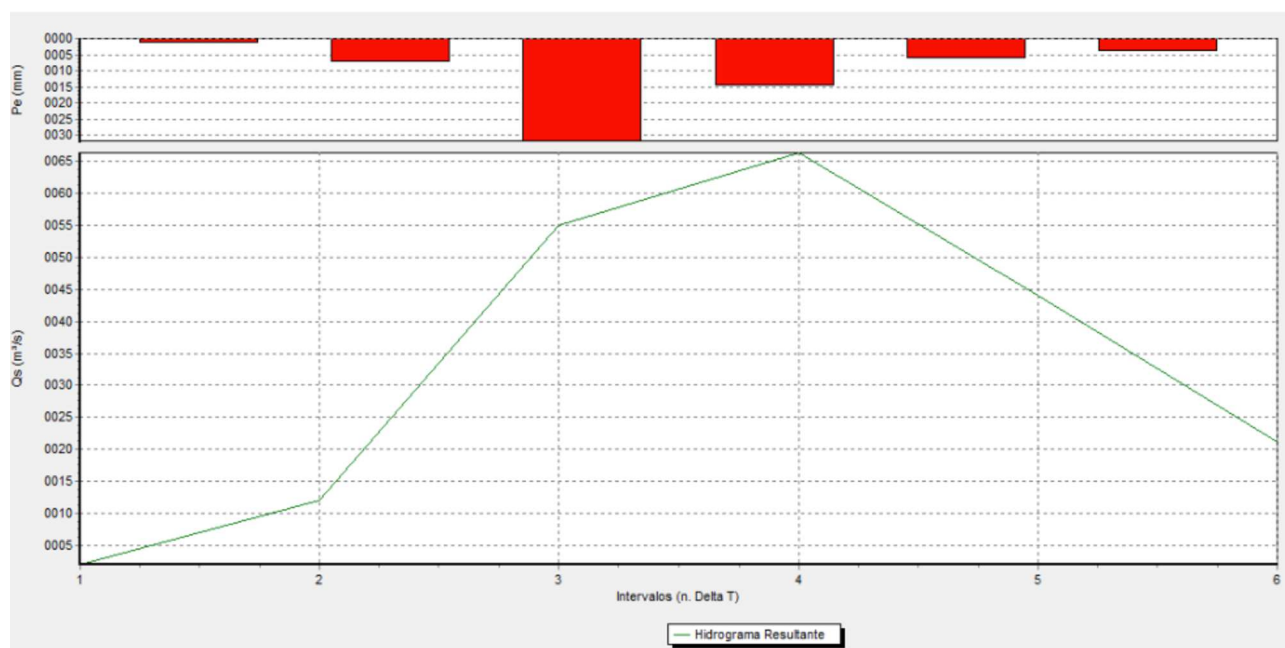


Figura 42 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 2

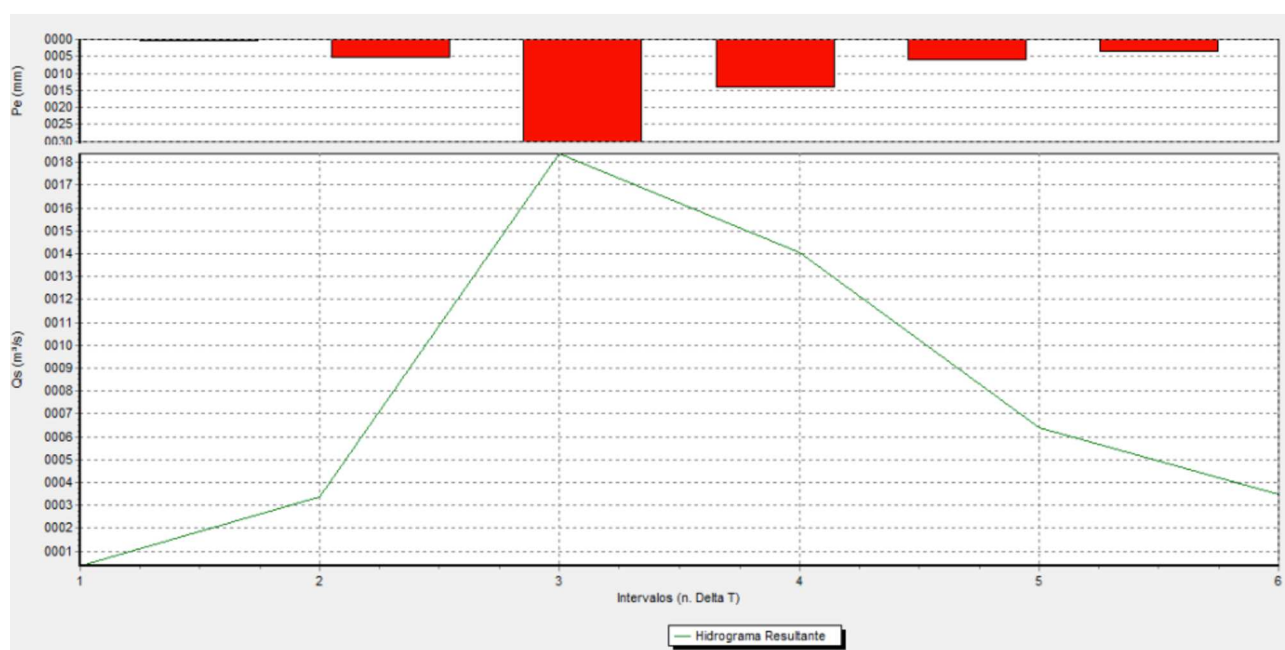


Figura 43 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 3

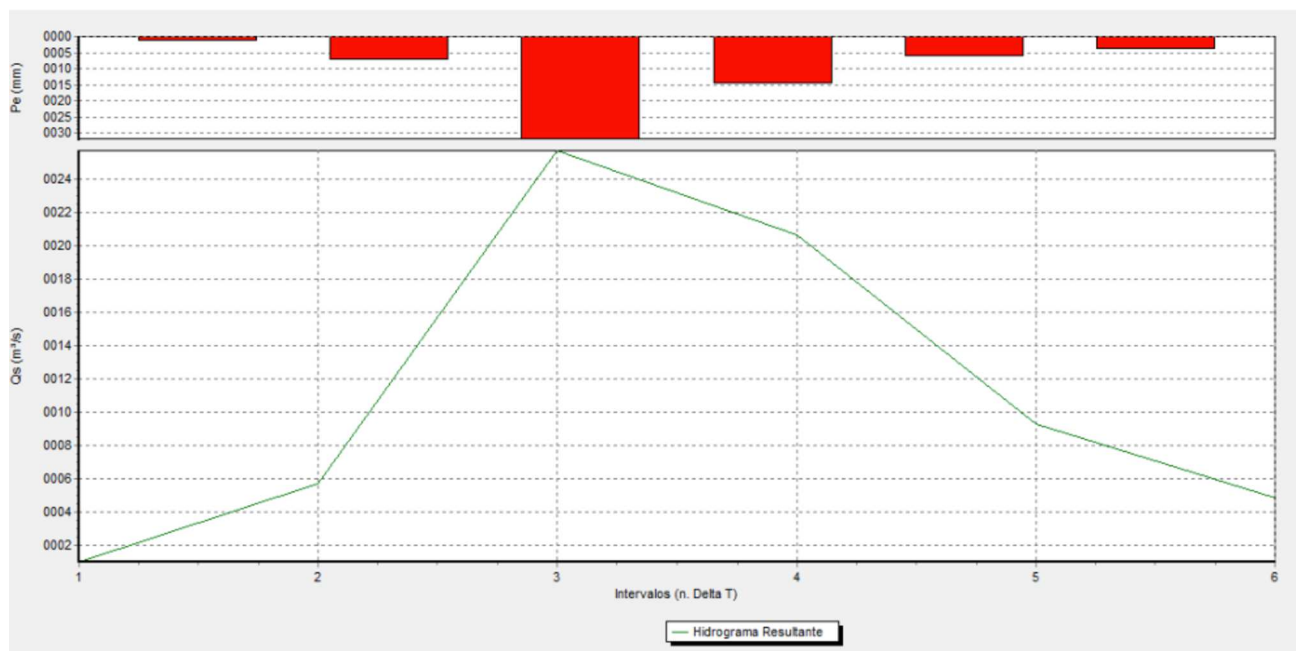


Figura 44 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 4

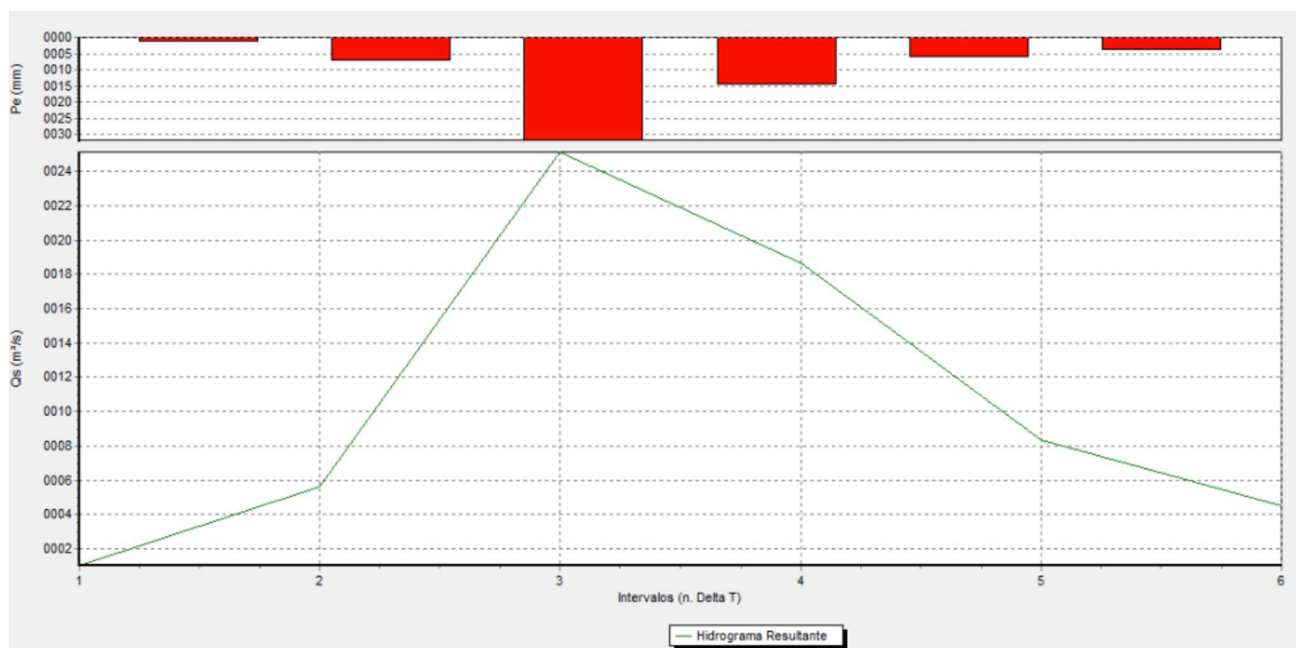


Figura 45 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 5

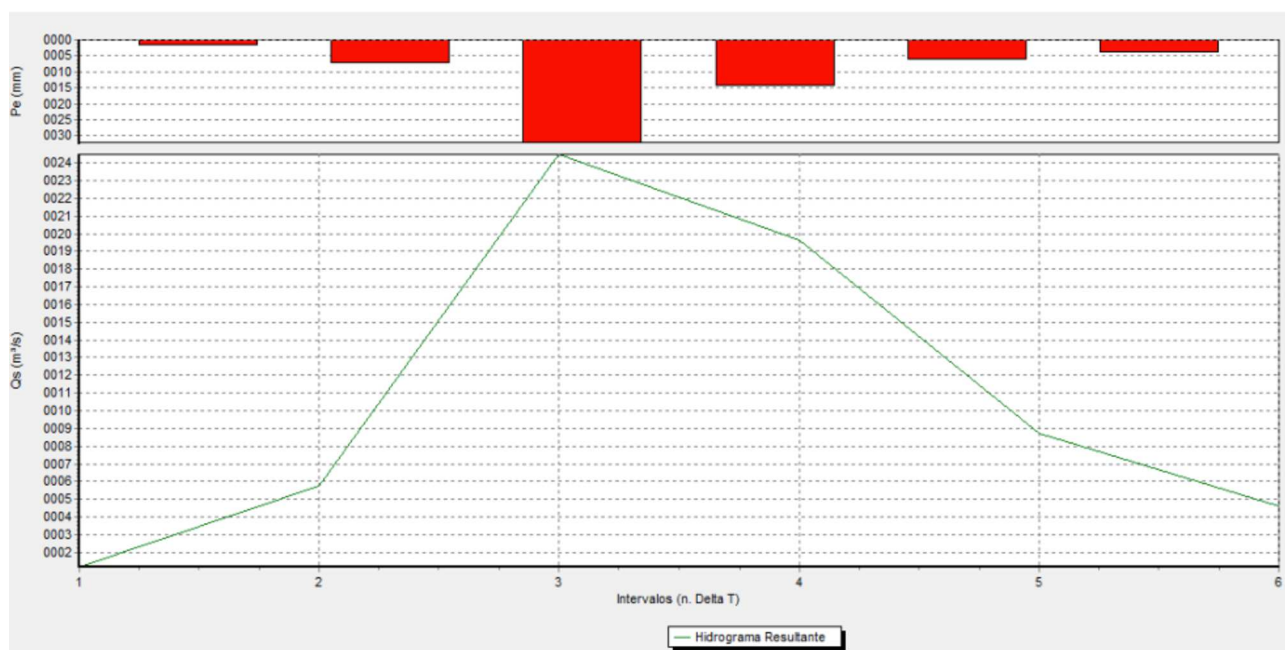


Figura 46 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 6

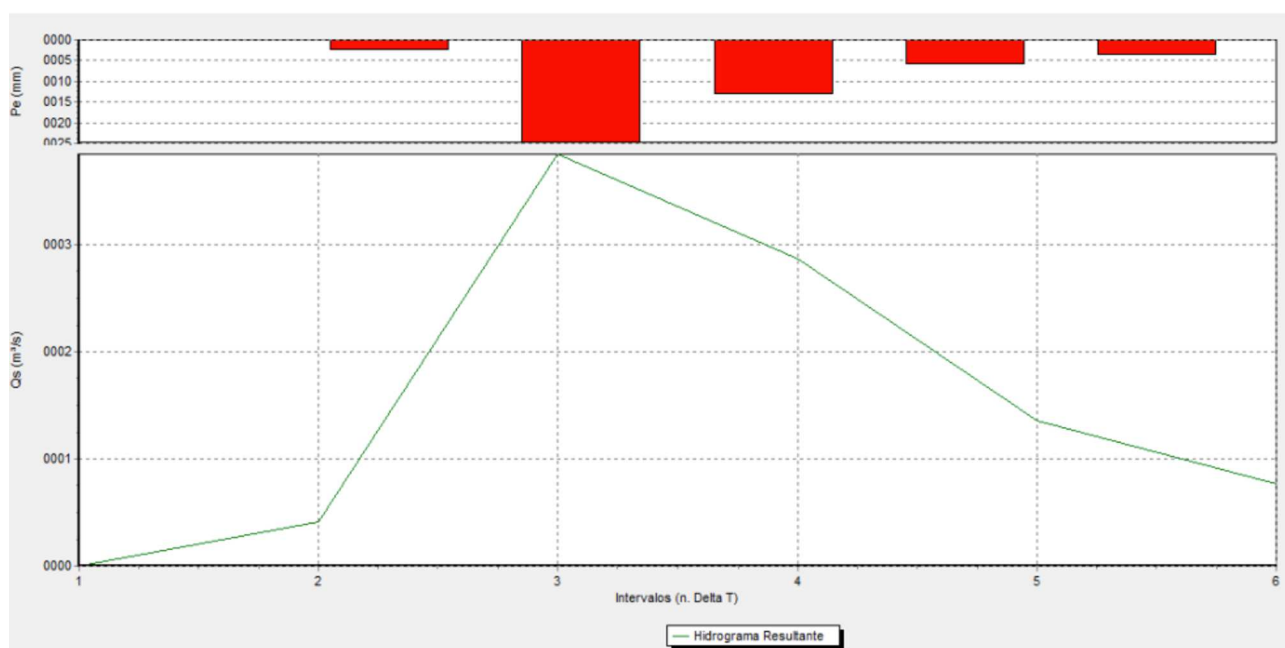


Figura 47 Precipitação efetiva + hidrograma de saída Sub-bacia 7

A.4 Hidrogramas de entrada e saída dos trechos

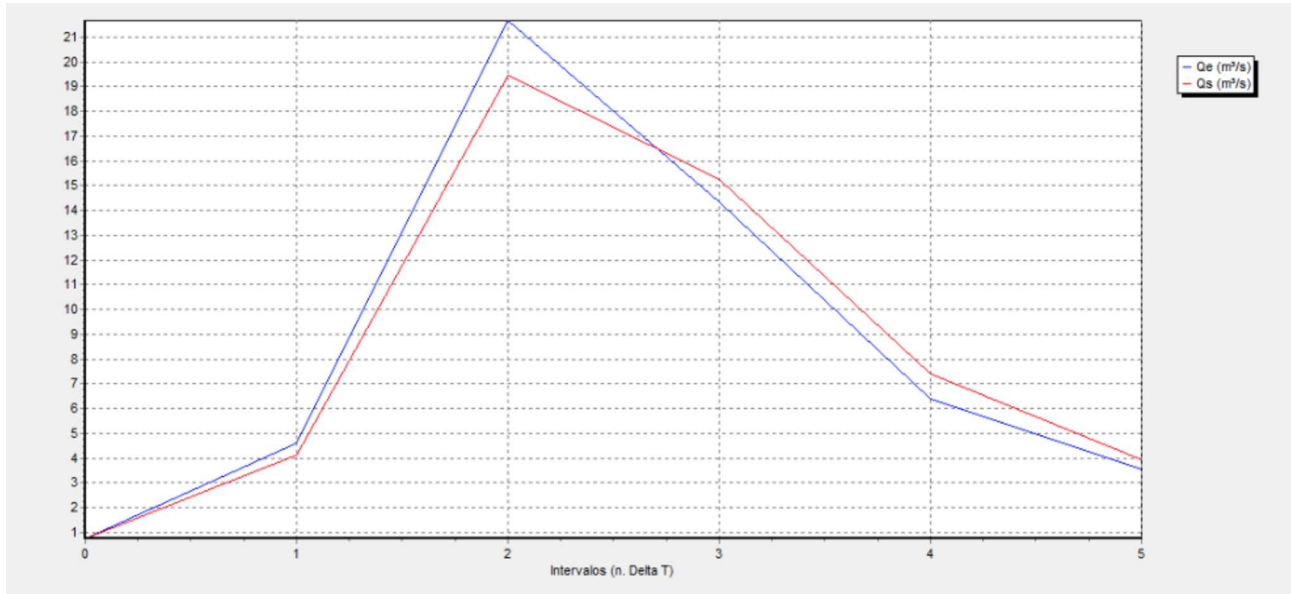


Figura 48 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 1

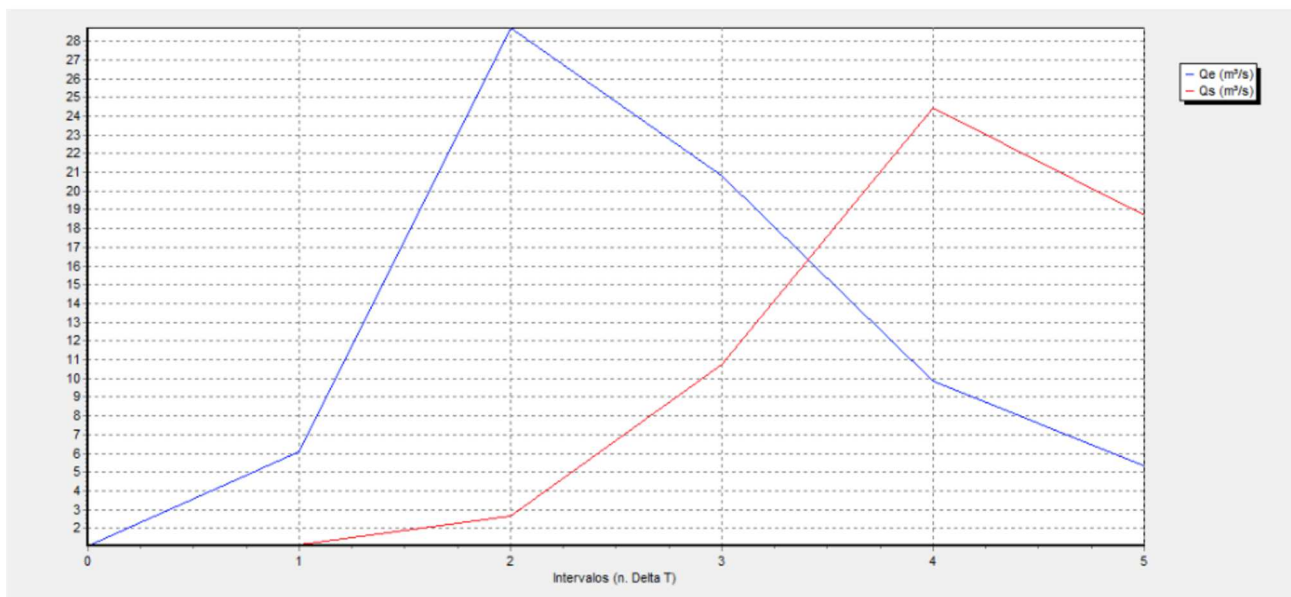


Figura 49 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 2

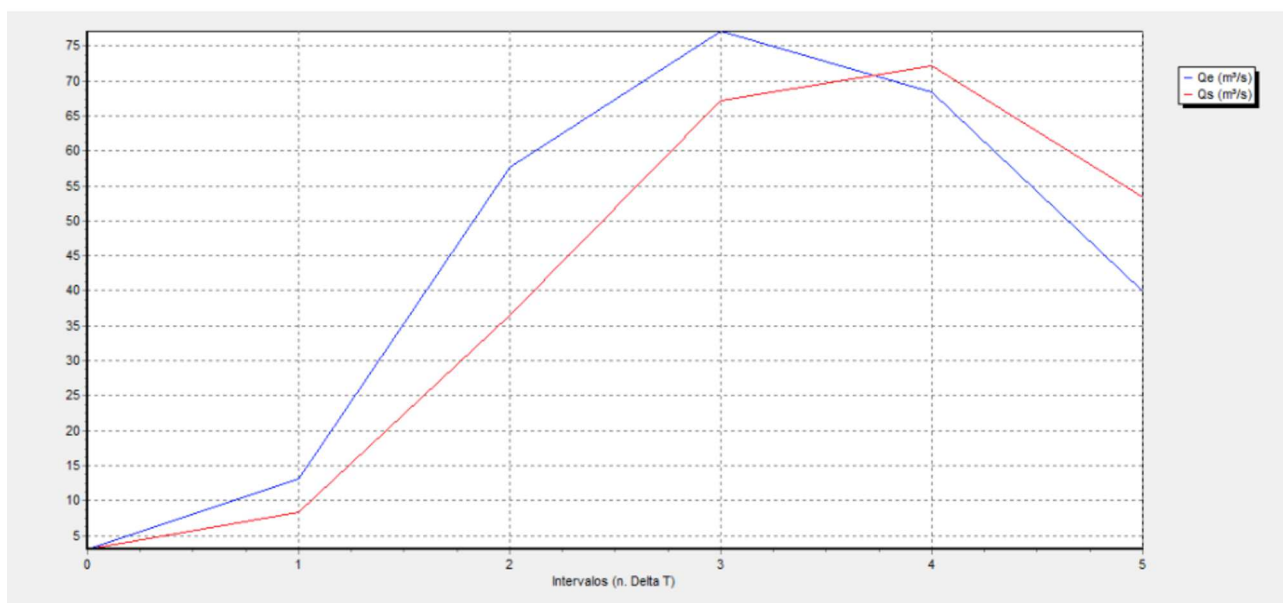


Figura 50 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 3

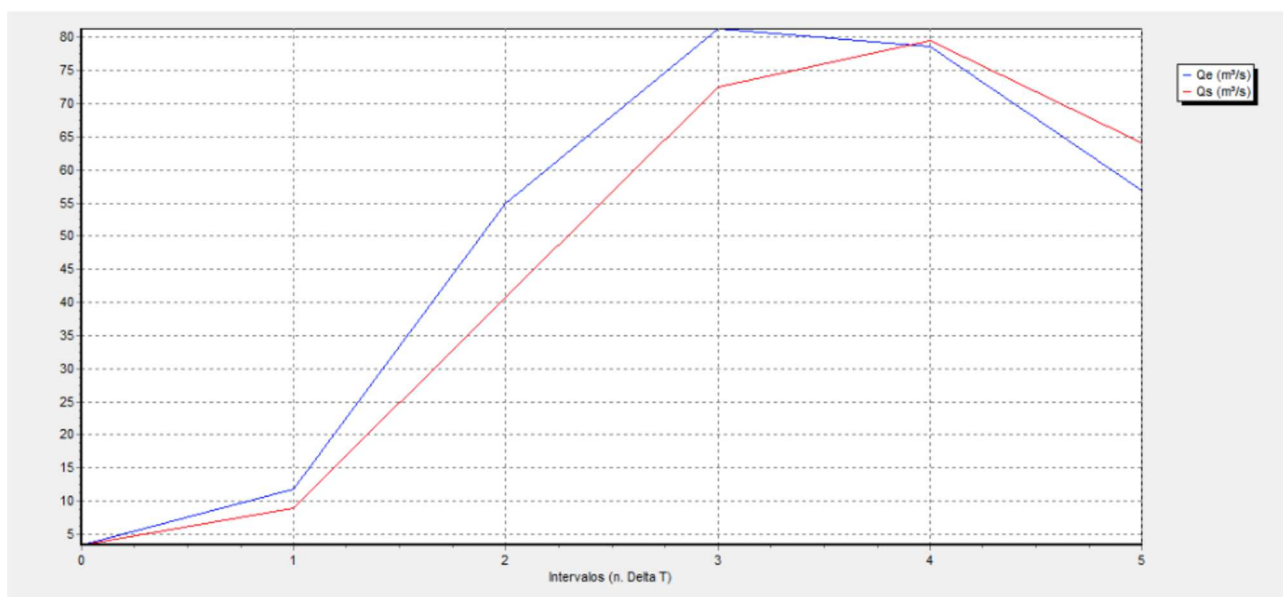


Figura 51 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 4

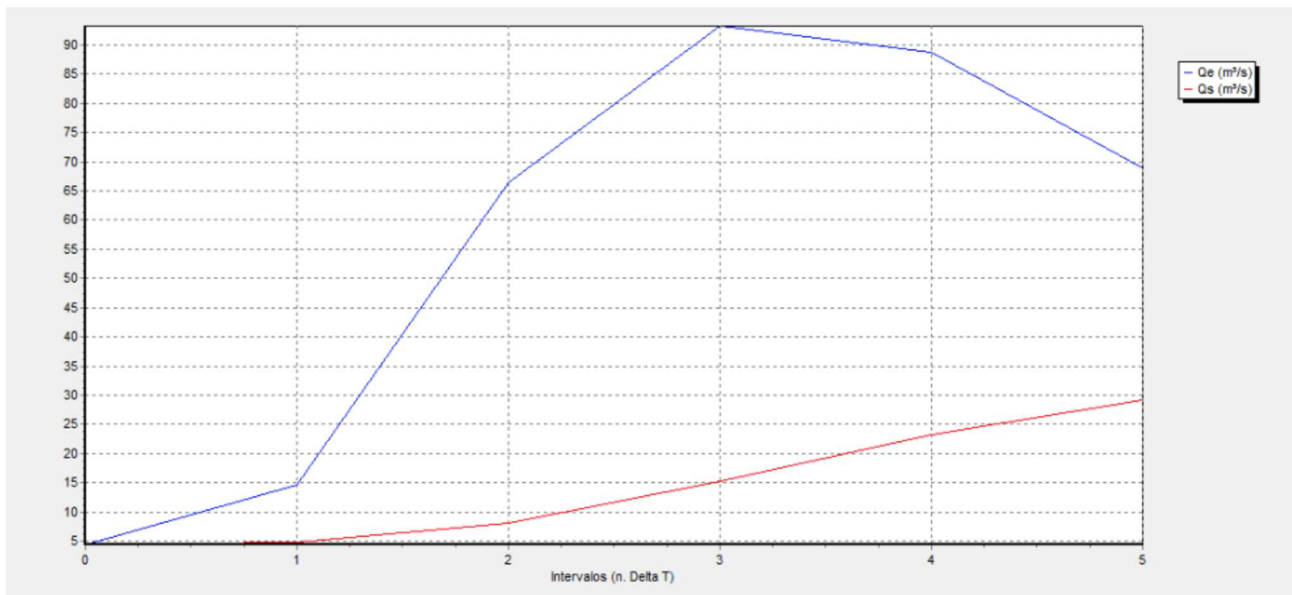


Figura 52 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 5

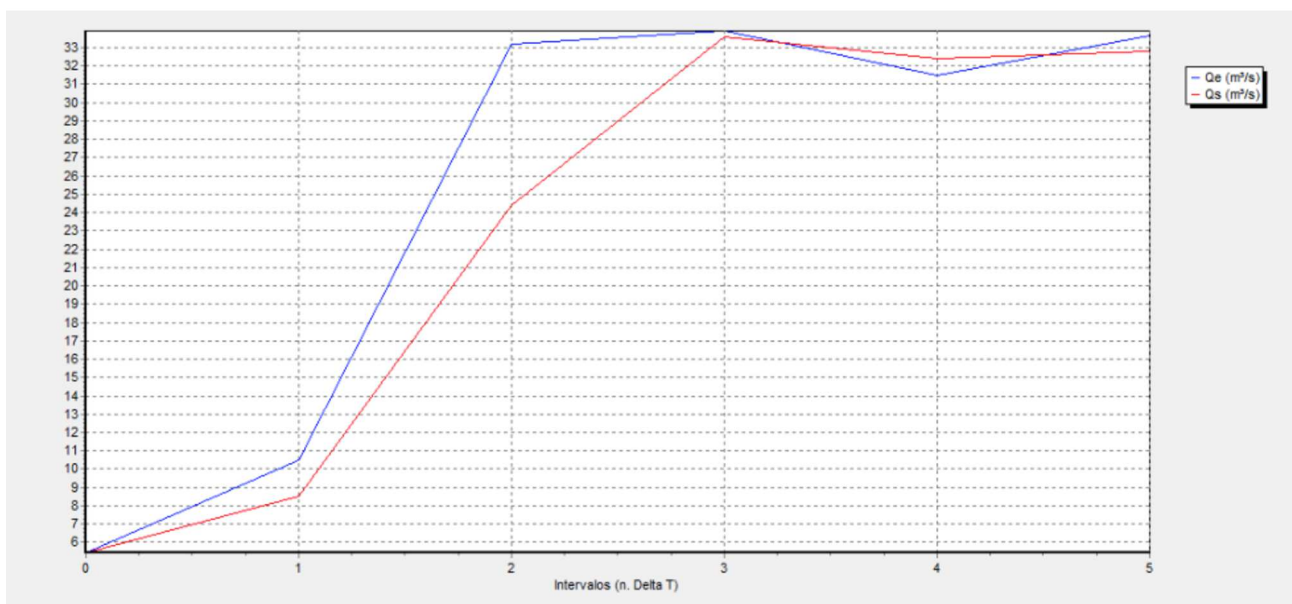


Figura 53 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 6

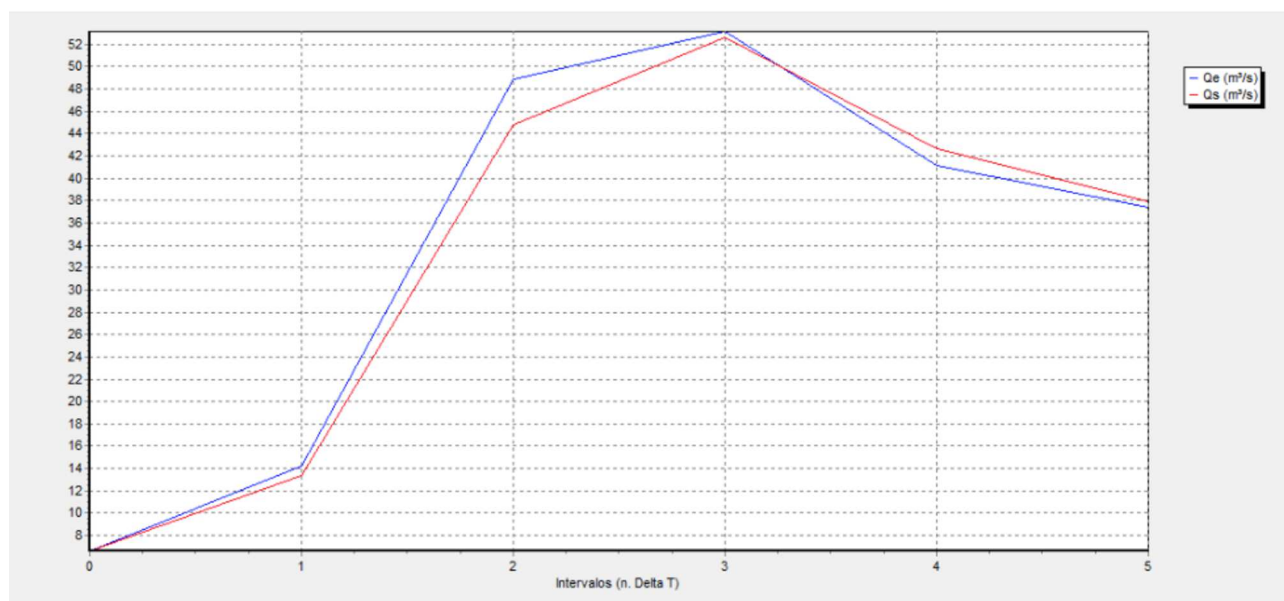


Figura 54 Hidrogramas de entrada e saída - Trecho 7

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 25 de novembro de 2013	3. REGISTRO Nº DCTA/ITA/TC-094/2013	4. Nº DE PÁGINAS 75
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Modelagem hidrológica de uma região afetada por enchentes em São José dos Campos-SP.			
6. AUTOR(ES): Maurício Vinícios Oliveira de Souza			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Macrodrenagem; SIG; Modelagem hidrológica IPHS1; Enchentes.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Enchentes; Drenagem; Áreas urbanas; Sistemas de informação geográfica; Estudo de casos; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO:		X Nacional	Internacional
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientadora: Prof. Dr. Nadiane Smaha Kruk. Publicado em 2013.			
11. RESUMO: A ocorrência de enchentes é um sério problema para a sociedade e para o governo, uma vez que causam danos custosos aos cofres públicos e põem em risco a saúde e os bens da população. Áreas urbanizadas costumam ser alvo mais frequente da atuação das enchentes, haja vista o processo de impermeabilização que as construções costumam exercer sobre o solo. Em São José dos Campos-SP, o Córrego Senhorinha, localizado em uma região densamente urbanizada, tem apresentado frequentemente eventos desastrosos, como o que ocorreu em março de 2013, trazendo prejuízos diretos a mais de 100 mil pessoas. O presente Trabalho de Graduação (TG) quantificou vazões de escoamento máximas ocasionadas devido a uma determinada chuva de projeto. Para isso, utilizaram-se ferramentas de Geoprocessamento e Hidrologia, além de ser subsidiado por visitas de campo, atividades de laboratório e entrevistas com moradores da região atingida. A chuva de projeto tenta simular a chuva do dia 23 de março de 2013 e foi obtida pela Equação Intensidade – Duração – Frequência (IDF) de São José dos Campos. O geoprocessamento foi feito em ambiente ArcGIS e a modelagem Precipitação-Vazão foi realizada por meio do software IPHS1, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Perceberam-se dois problemas principais: o extravasamento do córrego e a caracterização de escoamento torrencial, em trechos distintos da bacia. Por fim, teceram-se comentários acerca das causas comuns das enchentes e de maneiras a fim de mitigá-las.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			