

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**LARISSA VIEIRA**

**Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis  
lineares**

São Carlos  
2015

**LARISSA VIEIRA**

**Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis  
lineares**

Dissertação apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título de  
mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto  
Filho

**VERSÃO CORRIGIDA**

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

São Carlos  
2015

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

V657a Vieira, Larissa  
Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares / Larissa Vieira; orientador Oswaldo Augusto Filho. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Obras lineares. 2. Modelo hidrológico. 3. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 4. Vazões máximas. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LARISSA VIEIRA**.

Título da dissertação: "Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares".

Data da defesa: 25/09/2015

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Oswaldo Augusto Filho (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Osni José Pejon**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Fábio Augusto Gomes Vieira Reis**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Rio Claro)

### Resultado:

Aprovada

Aprovada

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais, pelo amor e confiança incondicionalmente depositados em mim.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças para enfrentar as adversidades do dia-a-dia e paciência para compreender o tempo Dele. A Ele minha eterna gratidão.

Ao professor Oswaldo Augusto Filho, pelos ensinamentos, pela motivação e pela disposição em me orientar a distância, tornando possível minha permanência nos caminhos da pós-graduação e a conclusão desta dissertação.

À minha família, pelo amor e admiração incessantes. Ao meu pai, Daltro, pelos melhores conselhos para toda vida. À minha mãe, Jane, pelo colo, pelo amparo e pela infindável bondade com a qual aprendo todos os dias. À minha irmã, Lizyana, por compartilhar da mesma luta na vida profissional e acadêmica e por acreditar na busca pelo melhor, sempre. Ao meu irmão, Henrique, pelo companheirismo, pela estima e por tornar nossa casa em nosso lar. À minha avó, Elzira (*in memoriam*) pelo apreço e orgulho com que sempre me motivou, e pelas orações perseverantes para que eu seguisse meu caminho. A todos meus familiares que, de alguma forma, me apoiam e acreditam no meu potencial.

Aos meus amigos que estiveram presentes, mesmo quando distantes, nos momentos de alegria e de desânimo. À Carolina e à Gabriela, companheiras de jornada e diversão em Curitiba. À Mariane, que mesmo a muitos quilômetros de distância, compartilhou comigo os altos e baixos do cotidiano. Ao Rodrigo, por dividir as aflições e recompensas dos árduos estudos, e por estar sempre disponível para ajudar. Ao Pedro, à Débora e à Andréa pelas horas de divertimento e risos nas minhas idas à Cascavel.

Aos colegas da pós-graduação, que se tornaram bons amigos. À Amanda, pelas divertidas estadias em São Carlos, pelas quais sou infinitamente grata. À Mariana A. F., à Mariana K. e à Jussara pela solidariedade nas preocupações acadêmicas e pelas boas gargalhadas. Ao Bruno, por me incentivar a iniciar o mestrado, pelos inúmeros bons conselhos e por me acolher em São Carlos na minha chegada e tantas vezes depois.

Aos colegas do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, que compreenderam minha escolha de seguir adiante meu percurso acadêmico. À Josefina e à Rosana, por terem me acolhido como alguém da família, pelo consolo nas horas tristes e pela motivação para continuar em frente. Ao Sérgio, pela paciência, pela compreensão e por

sempre permitir minhas viagens a São Carlos. À Silvana, ao Rafael, ao Marcelo, à Denise e ao Paulo, por se solidarizarem com minha situação e pelos aconselhamentos profissionais.

Aos professores e funcionários do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, pela excelente formação proporcionada e pelos serviços prestados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa e auxílio financeiro, no decorrer do primeiro ano do mestrado enquanto estive em São Carlos.

A todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, para a consolidação de mais uma etapa tão importante em minha vida.

## RESUMO

VIEIRA, L. **Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares.** Dissertação. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2015. 132 p.

Estudos hidrológicos são extremamente importantes em projetos de obras lineares, nas quais o traçado deve minimizar o risco de instabilidade tanto na fase de construção como na fase de operação. O escoamento superficial, além de ser um parâmetro fundamental para a definição do traçado e dos projetos subsequentes, influencia diretamente a dinâmica dos processos geológico-geotécnicos na área do empreendimento. A presente pesquisa propõe um método para realizar uma estimativa das vazões máximas nas travessias de obras civis lineares, integrando modelos hidrológicos obtidos com Sistema de Informação Geográfica (SIG) e métodos usuais de cálculo de vazões de cheia. O método foi aplicado em um setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), entre os municípios de São Simão e Cravinhos (SP). O modelo hidrológico foi obtido no *software* ArcGIS 9.3, a partir da definição de uma área mínima de contribuição de 5 hectares, adequada para a escala da base cartográfica digital (1:10.000) e para as características da área de estudo. As 29 bacias de contribuição delimitadas foram posteriormente validadas na vistoria de campo. A compatibilidade entre as bacias geradas pelo modelo hidrológico e as bacias identificadas visualmente na área de estudo foi satisfatória. As vazões máximas foram calculadas pelo Método Racional (bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>) e pelo Método Racional Modificado (bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup>), que abrangeu o Método de McMath, o Método Racional com expoente redutor de área e o Método Racional com coeficiente de retardo, sendo o último o que apresentou os resultados mais razoáveis. O cálculo das vazões de cheia foi realizado para períodos de retorno de 10 e 50 anos, a partir dos quais foram gerados Mapas de Vazões Máximas, que foram utilizados para inferência de riscos de eventos perigosos de natureza geológico-geotécnica causados pela ação das águas pluviais na região do oleoduto. Como o traçado do oleoduto foi posicionado ao longo dos divisores principais, não foram identificados locais críticos. Posteriormente, o traçado do oleoduto foi utilizado como referência para uma aplicação do método proposto em um projeto de drenagem. As bacias com valores de vazões máximas classificados com muito baixos não foram incluídas devido aos fluxos pouco significativos. Para as bacias com valores de vazões de cheia classificados como baixos e médios, sugeriu-se a utilização de dispositivos de drenagem superficial. Para as bacias com vazões máximas classificadas como altas e muito altas, foi proposta a utilização de dispositivos de drenagem de transposição de talvegues. Os resultados obtidos na pesquisa permitiram a consolidação do método proposto para aplicação em outros tipos de obras lineares e em locais com diferentes características ambientais.

Palavras-chave: Obras lineares. Modelo hidrológico. Sistema de Informação Geográfica (SIG). Vazões máximas.



## ABSTRACT

VIEIRA, L. **Application of hydrological models with GIS in linear civil constructions.** Dissertação. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2015. 132 p.

Hydrological studies are extremely important in linear constructions projects, in which the routing must minimize the risk of instability both during construction and in operation phase. The surface runoff, in addition of being a fundamental parameter to routing definition and subsequent projects, directly influences the dynamics of geological-geotechnical processes in the enterprise area. The present research proposes a method to estimate maximum flows in crossing locations in linear civil constructions, integrating hydrological models obtained with Geographic Information System (GIS) and usual methods of peak flows calculation. The method was applied in a sector of São Paulo – Brasília (OSBRA) oil pipeline, between the municipalities of São Simão and Cravinhos (SP). The hydrological model was obtained in ArcGIS 9.3 software, from the definition of a minimal area of contribution of 5 hectares, adequate for the scale of the digital cartographic base (1:10.000) and for the study area characteristics. The 29 delimited watersheds were subsequently validated in the field visit. The compatibility between watersheds generated in the hydrological model and watersheds visually identified in the study area was satisfactory. The maximum flows were calculated by Rational Method (watersheds with area less than 2 km<sup>2</sup>) e by Modified Rational Method (watersheds with area higher than 2 km<sup>2</sup>), which included McMath Method, Rational Method with reducing exponent area and Rational Method with retard coefficient, and the latter presented the most reasonable results. Peak flows calculation was performed for return periods of 10 and 50 years, from which were generated Maximum Flows Maps, which were used for inference of risks of hazardous events of geological-geotechnical nature caused by rainwater action in the pipeline region. The pipeline routing was positioned along the main dividers, therefore critical locations were not identified. Subsequently, the pipeline routing was used as a reference for application of the proposed method in a drainage project. Basins with maximum flows classified as very low were not included due to its low significance flows. For basins with peak flows values classified as low and medium, it was suggested the use of surface drainage devices. For basin with maximum flows classified as high and very high, it was proposed the use of thalwegs transposition drainage devices. The results obtained in the research allowed the consolidation of the proposed method to application in other types of linear constructions and in locals with different environmental characteristics.

Keywords: Linear constructions. Hydrological model. Geographic Information System (GIS). Maximum flows.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Área de estudo .....	20
Figura 4.1 - Ciclo hidrológico (adaptado de ANA, 2007) .....	22
Figura 4.2 – Representação de uma bacia hidrográfica (OLAYA, 2013) .....	23
Figura 4.3 – Método de definição da ordem de canais de Strahler (1957) e Shreve (1966) ..	25
Figura 4.4 – Escoamento superficial (BETTS, 1999) .....	27
Figura 4.5 – Quadro de fatores condicionantes do escoamento (adaptado de Chow <i>et al.</i> , 1988) .....	28
Figura 4.6 – Erosão hídrica às margens da rodovia SP-304 (GLOBO.COM, 2013) .....	30
Figura 4.7 – Municípios com equações IDF no Estado de São Paulo (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999) .....	37
Figura 4.8 – Tela do <i>software</i> Plúvio 2.1 .....	39
Figura 4.9 – Visualização simultânea das diferentes camadas de dados no SIG (adaptado de CAMPBELL; SHIN, 2012) .....	50
Figura 4.10 – Representação das estruturas vetorial e <i>raster</i> (COELHO, 2006) .....	51
Figura 4.11 – Visualização 3D de um MDE (OBSERVASC, 2012) .....	52
Figura 4.12 – MDE com malha retangular ( <i>raster</i> ) e com malha triangular (TIN) (adaptado de BROSTUEN; COX, 2000) .....	53
Figura 4.13 – Exemplo de rede de drenagem extraída do MDE (COSTA; FONSECA, 2008) .....	55
Figura 4.14 – Oito possíveis direções de fluxo (adaptado de JENSON; DOMINGUE, 1988) ..	55
Figura 4.15 – Cálculo das áreas de contribuição .....	57
Figura 4.16 – Extração da rede de drenagem .....	57
Figura 4.17 – (a) Perfil de uma depressão antes e depois da utilização da ferramenta <i>Fill</i> . (b) Perfil de um pico antes e depois da utilização da ferramenta <i>Fill</i> (ESRI, 2010) .....	60
Figura 4.18 – Estrutura das ferramentas <i>Flow Direction</i> e <i>Flow Accumulation</i> (ESRI, 2010)	61
Figura 4.19 – Aproximação gradual de uma linha no formato <i>raster</i> evidenciando o “efeito escada” (adaptado de SILVA, 2010) .....	63
Figura 4.20 – Comparação entre métodos de vetorização de redes de fluxo (ESRI, 2010) ..	63
Figura 4.21 – Ferramenta <i>Watershed</i> : delimitação de bacias de drenagem (ESRI, 2010) ....	64
Figura 5.1 – Fluxograma das etapas de pesquisa.....	65
Figura 5.2 – Fluxograma das etapas da fase de modelagem hidrológica em SIG .....	67
Figura 5.3 – Fluxograma das etapas da fase de cálculo das vazões máximas do método proposto .....	72
Figura 6.1 – Setor do mapa de materiais inconsolidados .....	78
Figura 6.2 – Setor do mapa de uso e ocupação do solo .....	80

Figura 6.3 – Mapa de direção de fluxo .....	81
Figura 6.4 – Linhas de fluxo do escoamento superficial, considerando área mínima de contribuição de 5 ha.....	83
Figura 6.5 – Setor do mapa de ordenamento das linhas de fluxo do escoamento superficial, pela classificação de Strahler (1957) .....	85
Figura 6.6 – Pontos de exutório .....	86
Figura 6.7 – Bacias contribuintes delimitadas pela ferramenta <i>Watershed</i> .....	88
Figura 6.8 – Parâmetros do <i>software</i> Plúvio 2.1 para o município de São Simão.....	98
Figura 6.9 – Parâmetros do <i>software</i> Plúvio 2.1 para o município de Cravinhos .....	99
Figura 6.10 – Gráfico intensidade x duração da precipitação. Período de retorno de 10 anos .....	100
Figura 6.11 – Gráfico intensidade x duração da precipitação. Período de retorno de 50 anos .....	101
Figura 6.12 – Exutório da Bacia 02 .....	110
Figura 6.13 – Exutório da Bacia 04 .....	110
Figura 6.14 – Drenagem perene no exutório da Bacia 04 .....	111
Figura 6.15 – Exutório da Bacia 29 .....	111
Figura 6.16 – Drenagem perene no exutório da Bacia 29 .....	112
Figura 6.17 – Estrada rural que intercepta a Bacia 02 .....	113
Figura 6.18 – Rodovia SP-270 interceptando a Bacia 02.....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros das Equações do tipo geral (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)	32
Tabela 4.2 – Valores de $\alpha$ (PFAFSTETTER, 1982 <i>apud</i> MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)	33
Tabela 4.3 – Valores de $\beta$ e dos parâmetros $a$ , $b$ e $c$ (adaptado de PFAFSTETTER, 1982 <i>apud</i> MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)	34
Tabela 4.4 – Coeficientes das equações do tipo $\ln \ln$ , elaboradas entre 1979 e 1982 (MERO; MAGNI <i>apud</i> MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)	35
Tabela 4.5 – Coeficientes das equações de chuvas intensas para equações do tipo $i_{t,T} = A (t + B)C + D (t + E)F \times \{ G + H \ln \ln [ T / (T-1) ] \}$ para $10 \leq t \leq 1440$ com $i_{t,T}$ : intensidade da chuva (mm/min) para duração $t$ (min) e período de retorno $T$ (anos) (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)	38
Tabela 4.6 – Coeficiente de escoamento superficial (DAEE, 1994)	44
Tabela 4.7 – Valores para o cálculo do coeficiente de escoamento de McMath (BATISTA <i>et al.</i> , 2002)	45
Tabela 6.1 – Distribuição percentual das classes de materiais inconsolidados (GIMENES, 2013)	76
Tabela 6.2 – Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo (GIMENES, 2013)	77
Tabela 6.3 – Áreas das bacias contribuintes	89
Tabela 6.4 – Valores de C atribuídos para as unidades de uso e ocupação do solo e materiais inconsolidados	91
Tabela 6.5 – Valores de C calculados para cada bacia	91
Tabela 6.6 – Tempos de concentração calculados para cada bacia	93
Tabela 6.7 – Intensidade de precipitação obtida pela equação Eng. Otto Pfafstetter para o município de São Simão	95
Tabela 6.8 – Intensidades de precipitação obtidas pela equação tipo $\ln \ln$ para o município de São Simão	96
Tabela 6.9 – Intensidades de precipitação obtidas pela equação dada pelo <i>software</i> Plúvio 2.1 para o município de São Simão	97
Tabela 6.10 – Intensidades de precipitação obtidas pela equação dada pelo <i>software</i> Plúvio 2.1 para o município de Cravinhos	99
Tabela 6.11 – Intensidades de precipitação utilizadas nos cálculos das vazões máximas	102
Tabela 6.12 – Cálculo das vazões máximas das bacias com $A < 2\text{km}^2$	104
Tabela 6.13 – Cálculo do coeficiente de escoamento de McMath	105

Tabela 6.14 – Cálculo das vazões máximas pelo método de McMath .....	105
Tabela 6.15 – Cálculo das vazões máximas pelo método racional com coeficiente de retardo .....	106
Tabela 6.16 – Cálculo das vazões máximas pelo método racional com expoente redutor de área .....	106
Tabela 6.17 – Comparação das vazões máximas calculadas para as bacias com $A > 2 \text{ km}^2$ (tempo de retorno de 10 anos) .....	106
Tabela 6.18 – Comparação das vazões máximas calculadas para as bacias com $A > 2 \text{ km}^2$ (tempo de retorno de 50 anos) .....	107
Tabela 6.19 – Pontos de controle levantados na vistoria em campo .....	108
Tabela 6.20 – Tipo de obra de drenagem necessária de acordo com a classificação dos valores de vazões máximas .....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Coeficiente de escoamento superficial ou <i>runoff</i>
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESD	Escoamento superficial direto
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
<i>h</i>	Altura pluviométrica
<i>i</i>	Intensidade da precipitação
IDF	Intensidade – duração – frequência
IGC	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
OSBRA	Oleoduto São Paulo - Brasília
PI	Plano de informação
PMSP	Prefeitura Municipal de São Paulo
SIG	Sistema de Informação Geográfica
<i>t</i>	Duração da precipitação
Tc	Tempo de concentração
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
TR	Tempo de recorrência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1</b>	<b>Hidrologia de superfície</b> .....	<b>22</b>
4.1.1	Bacia hidrográfica .....	23
4.1.2	Precipitação .....	26
4.1.3	Escoamento superficial.....	27
4.1.4	Erosão hídrica pluvial.....	29
<b>4.2</b>	<b>Equações de chuvas intensas</b> .....	<b>31</b>
4.2.1	Equação geral .....	32
4.2.2	Equações Eng. Otto Pfafstetter .....	33
4.2.3	Equações do tipo <i>ln ln</i> .....	34
4.2.4	Novas equações de chuvas intensas para o Estado de São Paulo .....	35
4.2.5	<i>Software</i> Plúvio 2.1 .....	39
<b>4.3</b>	<b>Estimativa de vazões máximas pelo Método Racional</b> .....	<b>40</b>
4.3.1	Método Racional .....	40
4.3.2	Tempo de concentração.....	42
4.3.3	Intensidade.....	43
4.3.4	Coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de <i>runoff</i> ) .....	43
4.3.5	Método Racional Modificado .....	44
4.3.6	Aplicações do Método Racional na estimativa de vazões .....	46
<b>4.4</b>	<b>Sistemas de Informação Geográfica</b> .....	<b>49</b>
4.4.1	Conceituação .....	49
4.4.2	Modelo Digital de Elevação (MDE).....	51
4.4.3	Modelos hidrológicos em SIG.....	54
4.4.4	Usos dos modelos hidrológicos .....	58
4.4.5	Ferramentas hidrológicas em SIG.....	60
<b>5</b>	<b>MÉTODO E ETAPAS DE PESQUISA</b> .....	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelagem hidrológica em SIG</b> .....	<b>67</b>
<b>5.2</b>	<b>Cálculo das vazões máximas</b> .....	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>Modelagem hidrológica em SIG</b> .....	<b>75</b>
6.1.1	Base cartográfica digital e correção hidrológica do MDE .....	75
6.1.2	Mapa de Materiais Inconsolidados e de Uso e Ocupação do Solo .....	76

6.1.3	Definição da direção e acumulação de fluxo .....	79
6.1.4	Extração das linhas de fluxo do escoamento superficial .....	82
6.1.5	Definição dos pontos de exutório e delimitação das bacias contribuintes .....	84
<b>6.2</b>	<b>Cálculo das vazões máximas .....</b>	<b>90</b>
6.2.1	Cálculo do coeficiente de escoamento .....	90
6.2.2	Cálculo do tempo de concentração.....	92
6.2.3	Cálculo da intensidade de precipitação .....	94
6.2.4	Cálculo das vazões máximas.....	103
<b>6.3</b>	<b>Validação dos resultados em campo.....</b>	<b>108</b>
<b>6.4</b>	<b>Mapas de Vazões Máximas .....</b>	<b>114</b>
6.4.1	Riscos de processos geológico-geotécnicos na área do oleoduto OSBRA ...	116
6.4.2	Aplicação do método proposto em projeto de drenagem .....	117
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>129</b>
	<b>APÊNDICE A</b> – Mapa de documentação .....	130
	<b>APÊNDICE B</b> – Mapa de vazões máximas para um período de retorno de 10 anos .....	131
	<b>APÊNDICE C</b> – Mapa de vazões máximas para um período de retorno de 50 anos .....	132



# 1 INTRODUÇÃO

As obras lineares são, por definição, aquelas que possuem uma de suas três dimensões consideravelmente maior que as outras duas: rodovias, ferrovias, dutovias, canais e linhas de transmissão, entre outras. Presentes em todo o território nacional, tais obras são de extrema importância para o desenvolvimento e para a integração do país.

Devido às grandes extensões, as obras de aspecto linear atravessam trechos com variações nas características geológicas, geomorfológicas, de uso e de cobertura do solo e de condições climáticas, com destaque para diferentes regimes de precipitação pluviométrica, resultando em condicionantes geotécnicos distintos ao longo do traçado. Assim, podem ser provocados desequilíbrios ambientais que acarretam o aumento da suscetibilidade à erosão, movimentos de massa e ao assoreamento, comprometendo a integridade e a segurança da obra (KOCHEN, 2006; PUPIM *et al.*, 2007).

Neste contexto, observa-se a necessidade de estudos hidrológicos bastante criteriosos, já que o escoamento superficial representa um importante parâmetro na definição do traçado das obras lineares, além de influenciar diretamente a dinâmica dos processos geológico-geotécnicos na área do empreendimento. Assim, os estudos de hidrologia superficial constituem um recurso indispensável para minimizar o risco de instabilidade, tanto na fase de construção como na de operação.

É importante mencionar que há diferenças entre os sistemas adotados para a travessia do escoamento superficial em cada tipo de obra linear, seja rodoviária, ferroviária, dutoviária, entre outras. No entanto, o mesmo procedimento para obter o modelo hidrológico pode ser aplicado genericamente em diferentes tipos de obras lineares, considerando bacias de contribuição delimitadas a partir de pontos de exutório localizados ao longo do traçado da obra.

Tendo em vista a necessidade de estabelecer um mecanismo para obter o referido modelo hidrológico, esta pesquisa desenvolveu um método cuja sequência de etapas permite a modelagem das linhas de fluxo do escoamento superficial e a delimitação das bacias contribuintes, a partir da definição de uma área mínima de contribuição. Ainda, o procedimento permite a integração de métodos de cálculo para estimativa das vazões máximas nos locais de travessia do escoamento superficial.

Para tanto, o método foi aplicado num setor do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), entre os municípios de São Simão e Cravinhos (SP), com posterior validação dos resultados obtidos em campo. O traçado do oleoduto foi utilizado como referência para a

subsequente consolidação do procedimento, possibilitando a aplicação do método em diferentes localidades e outros tipos de obras lineares.

O modelo hidrológico da região do empreendimento, que integra as linhas de fluxo do escoamento superficial e as respectivas bacias contribuintes, juntamente com os valores de vazões máximas calculados, constitui um Plano de Informação (PI) que pode ser utilizado em estudos de traçado, anteprojetos, estudos ambientais, estudos geológico-geotécnicos, entre outros, inclusive em projetos de drenagem e de obras de contenção.

No caso em estudo, o PI obtido foi utilizado para determinação de áreas de risco de eventos perigosos de natureza geológico-geotécnica na região do oleoduto, especialmente erosões hídricas pluviais, que podem ocasionar impactos ambientais, econômicos e sociais relevantes. No Brasil, uma fração significativa dos processos erosivos ocorre pela ação das águas pluviais, condicionados às propriedades do solo (coesão, grau de estruturação, textura, capacidade de retenção de água, aeração), declividade do terreno e tipo de uso e cobertura, entre outros (SILVA, 1972).

Assim, no caso de obras civis lineares, a eliminação da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo constituem-se como fortes fatores indutores da erosão hídrica pluvial. A retirada da vegetação induz os processos erosivos porque a mesma protege o solo por meio da redução da energia cinética do impacto da gota de chuva, já que a água é interceptada antes de atingir o solo. Por outro lado, a impermeabilização das faixas ocupadas pelas obras de desenvolvimento linear causa a acumulação de águas pluviais nas margens das faixas, acarretando o aumento da velocidade do escoamento superficial e concentrando forças distribuidoras e arrastadoras do solo.

Nos estudos de comportamento hidrológico, no qual a variação espacial possui grande importância, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma ferramenta indispensável. A partir do SIG é possível combinar informações topográficas, dos tipos e usos do solo e dos regimes pluviométricos relativos às bacias de drenagem, possibilitando a simulação e a previsão de diferentes cenários.

A topografia é um fator determinante nos processos hidrológicos, principalmente no escoamento superficial. Os atributos topográficos podem ser determinados a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE é uma matriz com células do mesmo tamanho e com um valor de elevação atribuído a cada uma delas. Para obter um modelo hidrológico a partir de um MDE, são realizados os seguintes procedimentos: primeiramente, é obtida a direção de fluxo; em seguida, define-se o fluxo acumulado, para então extrair a rede de drenagem e delimitar as bacias de contribuição.

Com as bacias contribuintes delimitadas, é possível calcular as vazões de pico respectivas. Dentre as metodologias disponíveis para tanto, destaca-se o Método Racional, conhecido pela facilidade de aplicação em bacias pequenas. Segundo Villela e Mattos

(1975), o método é utilizado para estimar o escoamento superficial por meio de dados de precipitações, considerando as principais características da bacia.

A principal proposta do método apresentado é a aplicação em fases iniciais de projeto, para subsidiar decisões a respeito do traçado da obra linear, buscando minimizar riscos geológico-geotécnicos nas travessias de escoamento superficial, além de reduzir custos de implantação e de posterior manutenção do empreendimento. Ainda, o método proposto também pode ser utilizado para identificação de trechos críticos em obras já implantadas.

A presente dissertação está dividida em sete capítulos, sendo a Introdução apresentada no primeiro capítulo. No Capítulo 2, é definido o objetivo da pesquisa. O Capítulo 3 fornece informações sobre a área de estudo, bem como o motivo de escolha da mesma. No Capítulo 4 consta a Revisão Bibliográfica realizada a respeito dos temas envolvidos na pesquisa: hidrologia de superfície, equações de chuvas intensas, estimativas de vazões máximas pelo Método Racional e pelo Método Racional Modificado (Método de McMath, Método Racional com coeficiente de retardo e Método Racional com expoente redutor de área) e Sistemas de Informação Geográfica. O Capítulo 5 apresenta o método proposto e o detalhamento das etapas da pesquisa, sendo o método subdividido em duas fases: a primeira corresponde à modelagem hidrológica em SIG, e a segunda refere-se aos cálculos das vazões máximas. No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões. Por fim, as conclusões encontram-se no Capítulo 7.

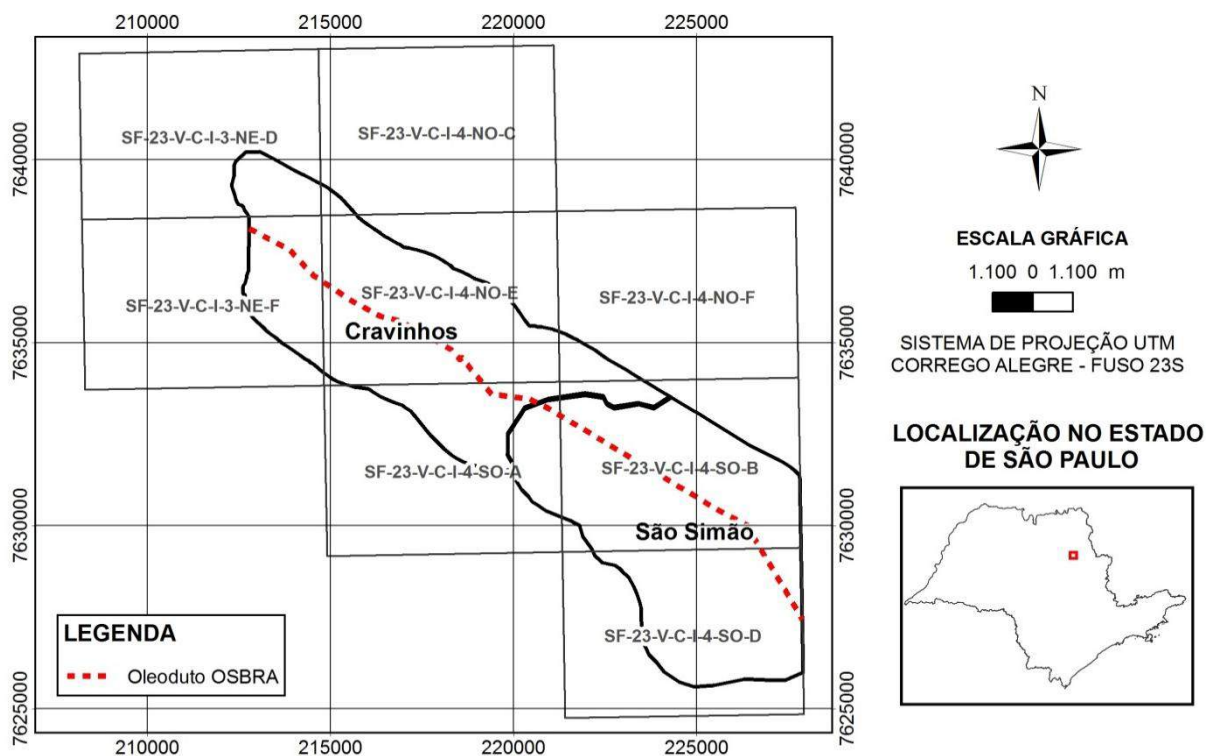
## 2 OBJETIVO

O objetivo da pesquisa foi estruturar um método para a estimativa das vazões máximas nos locais de travessia das drenagens em obras civis lineares, integrando modelos hidrológicos elaborados em ambiente SIG e métodos simples e já consagrados para o cálculo das vazões de cheia (Método Racional e Método Racional Modificado).

Para a elaboração do modelo hidrológico, a proposta foi estabelecer uma sequência de etapas de aplicação das ferramentas do *software* ArcGIS 9.3, para automatizar o procedimento de extração das linhas de fluxo do escoamento superficial e da delimitação das bacias de contribuição, a partir da definição de pontos de exutório localizados ao longo do traçado da obra linear.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre os municípios de São Simão e Cravinhos, na região nordeste do estado de São Paulo. Possui 83,99 km<sup>2</sup>, abrangendo uma faixa de terreno com largura de 2 km de cada lado de uma extensão de 18,5 km do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA). A Figura 3.1 apresenta os limites e a articulação das folhas topográficas em escala 1:10.000 da área de estudo.



**Figura 3.1** – Área de estudo

A topografia da região constitui-se de colinas amplas (amplitudes inferiores a 100 m) e declividades variando de baixa a média (3 a 7°). As formações geológicas presentes no local são arenitos eólicos com estratificação cruzada, pertencentes à Formação Botucatu, e derrames basálticos com camadas de arenito intertrapiano e intrusões diabásicas, pertencentes à Formação Serra Geral. Ambas as formações são do período Jurássico-Cretáceo, com sobreposição de depósitos aluviais e coluviais cenozóicos.

A área de estudo está inserida na Bacia do Rio Pardo, considerada uma bacia hidrográfica muito importante do estado de São Paulo, cuja pluviosidade média é 1350 mm/ano. A estação chuvosa ocorre entre os meses de dezembro e março, quando as

temperaturas médias variam de 22 a 26° C. Já no período seco, a variação das temperaturas médias ocorre entre 13 e 16° C (AUGUSTO FILHO *et al.*, 2010).

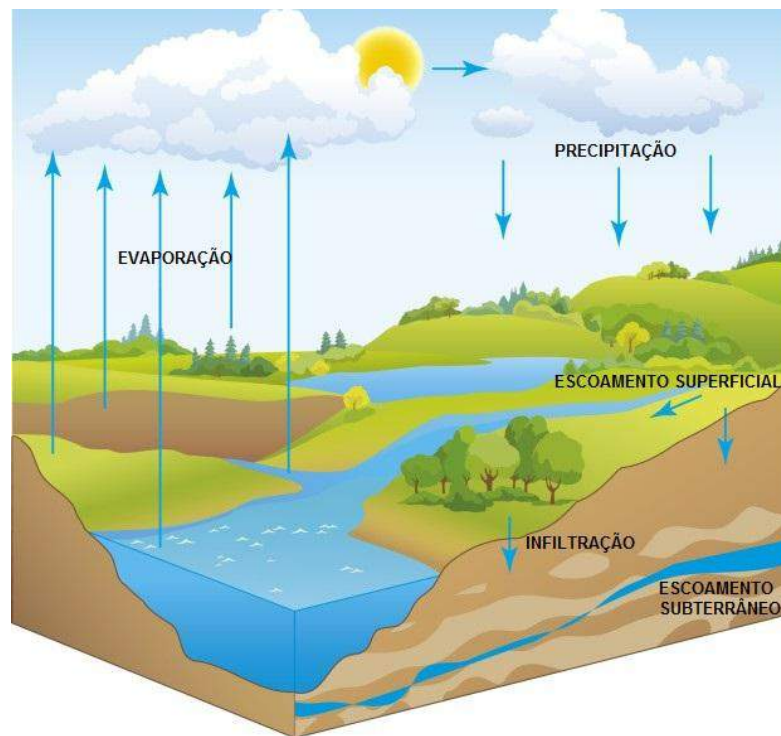
O oleoduto OSBRA é constituído por tubos de aço corrugado com diâmetro nominal de 20 polegadas. A instalação do oleoduto foi realizada entre os anos de 1998 e 1999, pela técnica de abertura de trincheiras, nas quais os tubos foram assentados e posteriormente cobertos com solo compactado. A profundidade média de assentamento dos tubos varia de 1,5 a 3,0 m (AUGUSTO FILHO, 2008).

A escolha do setor deve-se à disponibilidade da base cartográfica digital e do Modelo Digital de Elevação (MDE) previamente elaborados para um trecho entre os municípios de São Simão e Cravinhos no estado de São Paulo (AUGUSTO FILHO, 2008). O trecho selecionado para a presente pesquisa representa as principais características de interesse para aplicação de modelos hidrológicos e cálculos de vazões máximas da região, abrangendo os diferentes tipos de uso e ocupação do solo, materiais inconsolidados, declividades, regimes pluviométricos, entre outros.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Hidrologia de superfície

O ciclo hidrológico (Figura 4.1) pode ser definido como o fenômeno de circulação de água entre a superfície terrestre e a atmosfera. O início do ciclo ocorre a partir do vapor d'água presente na atmosfera que, em determinadas condições meteorológicas, condensa-se formando microgotículas. O agrupamento das microgotículas e eventuais partículas de poeira e gelo dá origem às nuvens. Por meio da dinâmica das massas de ar, ocorre a transferência de água da atmosfera para a superfície da Terra, denominada precipitação (SILVEIRA, 1993).



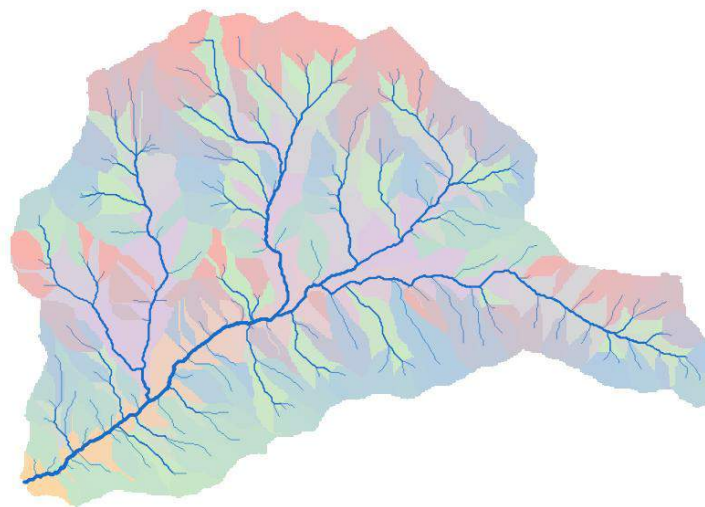
**Figura 4.1** - Ciclo hidrológico (adaptado de ANA, 2007)

Parte do volume de água precipitado é interceptada pela vegetação e outras barreiras, retornando à atmosfera por evaporação. O restante da precipitação, que atinge a superfície do solo, pode sofrer evaporação ou então ser absorvido por infiltração, visto que o solo é um meio poroso. A partir do momento em que ocorre a saturação do solo, a precipitação também passa a escoar livremente pela superfície do terreno, seguindo linhas de maior declividade (RIGHETTO, 1998).

Por gravidade, a água esco superficialmente até as cotas mais baixas, superando o atrito com a superfície do solo. A manifestação inicial do escoamento se dá na forma de filetes de água, que se moldam ao relevo. A erosão de partículas de solo no trajeto do escoamento, juntamente com a topografia existente, moldam a rede de drenagem (SILVEIRA, 1993).

#### 4.1.1 Bacia hidrográfica

O principal interesse de estudo do ciclo hidrológico é na fase terrestre, na qual o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica (Figura 4.2). Uma bacia hidrográfica geralmente é definida como a área na qual ocorre a captação natural das águas precipitadas para um determinado curso d'água (rio ou afluentes). A bacia é uma unidade hidrológica frequentemente utilizada como unidade físico biológica, socioeconômica e política para planejamento e manejo dos recursos naturais (SILVEIRA, 1993; BROOKS *et al.*, 1997).



**Figura 4.2** – Representação de uma bacia hidrográfica (OLAYA, 2013)

Analogamente, uma bacia de contribuição pode ser definida como uma área de captação das águas pluviais, que converge o escoamento superficial para um único ponto de saída, denominado exutório. O exutório de uma bacia de contribuição não constitui, necessariamente, um corpo d'água. O exutório pode ser considerado como um ponto de interesse de instalação de um dispositivo de drenagem ou um local crítico, no qual é necessário conhecer a área de contribuição (drenagem) que ali chega.

Pode-se considerar a bacia (hidrográfica ou de contribuição) como um sistema físico: o volume de água precipitado é a entrada e o volume de água escoado pelo exutório



é a saída. As perdas são os volumes evaporados, transpirados ou infiltrados. Portanto, o papel hidrológico da bacia é transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma saída de água de forma mais distribuída no tempo (escoamento).

Segundo Silveira (1993), o escoamento pode ser separado em escoamento rápido ou superficial e escoamento lento ou subterrâneo. A separação é conveniente porque possibilita quantificar e analisar o escoamento de maior magnitude numa cheia, ou seja, o escoamento superficial.

Os dados fisiográficos de uma bacia são características que podem ser extraídas de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite. Basicamente são áreas, comprimentos, declividades e tipos de coberturas de solo medidos diretamente ou expressos por índices. A seguir são apresentados os conceitos dos dados fisiográficos mais utilizados.

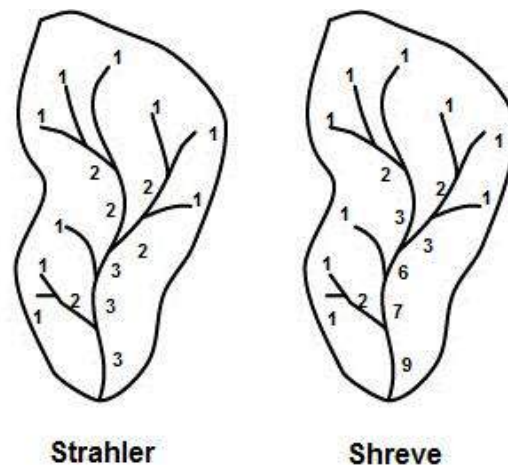
A área da bacia é um dado muito importante para definir seu potencial hídrico, pois o valor da área multiplicado pela lâmina da precipitação define o volume de água recebido pela bacia.

Existem diversos índices atribuídos à rede de drenagem. O mais simples se trata apenas da medição em planta do comprimento do curso d'água principal. Outros representam a totalidade da rede de drenagem, como Horton (1945), que demonstra a validade de relações empíricas que tendem a ser constantes em uma bacia, e para tanto, ordena-se os canais da rede de drenagem com números inteiros.

O critério de Horton (1945) para definição da ordem dos canais é: os canais de primeira ordem são aqueles que não possuem tributário; os canais de segunda ordem tem apenas afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem recebem canais de segunda ordem, podendo também receber diretamente canais de primeira ordem, e assim sucessivamente. Deste modo, a maior ordem é atribuída ao canal principal, designação que prevalece em todo o comprimento da rede, desde o exutório da bacia até a nascente.

Uma modificação do sistema de Horton foi proposta por Strahler (1957), na qual a subjetividade da classificação das nascentes é evitada, pois todos os canais sem tributários são considerados como de primeira ordem, mesmo que sejam nascentes dos rios principais e afluentes; os canais de segunda ordem são os que se originam da confluência de dois canais de primeira ordem, podendo também ter afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem são originados da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordem, e assim sucessivamente (Figura 4.3)

Em contrapartida, o método de classificação de Shreve (1966) considera a ordem dos canais como aditiva, ou seja, a confluência de dois canais de primeira ordem gera um canal de segunda ordem; mas a junção de um canal de primeira ordem com um de segunda ordem dá origem a um canal de terceira ordem; e a junção de um canal de segunda ordem com outro de terceira ordem gera um canal de quinta ordem e assim por diante (Figura 4.3).



**Figura 4.3** – Método de definição da ordem de canais de Strahler (1957) e Shreve (1966)

Os índices de declividade são referentes aos cursos d'água da rede de drenagem e às vertentes. É possível obter arquivos digitais representativos da superfície de uma bacia e, a partir das informações apresentadas, estudar a fisiografia da bacia.

Os processos hidrológicos nas bacias são, essencialmente, contínuos e tridimensionais. A análise espacial e temporal de tais processos é bastante complexa, o que leva à adoção de simplificações que envolvem a discretização dos processos (RENNÓ; SOARES, 2001). Na discretização de bacias, são utilizados critérios de subdivisão espacial para representação da bacia. Em geral, é adotada uma das seguintes estruturas para a discretização (TUCCI, 1998):

- Concentrado: as bacias são representadas por uma precipitação média e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço. Tal estrutura é utilizada geralmente para bacias pequenas, onde a distribuição espacial dos parâmetros e variáveis não compromete os resultados;
- Distribuição em sub-bacias: a bacia é subdividida de acordo com a drenagem principal. A subdivisão é realizada conforme a disponibilidade de dados, locais de interesse e variabilidade de parâmetros físicos da bacia;
- Distribuição em módulos: discretização realizada por formas geométricas (quadrados ou retângulos), sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizando internamente os componentes dos processos. Tal discretização busca um detalhamento maior à medida que os módulos possuem dimensões menores.

#### 4.1.2 Precipitação

De acordo com Bertoni e Tucci (1993), a precipitação é compreendida como a água que provém do meio atmosférico e atinge a superfície terrestre: neblina, chuva, granizo, orvalho, geada e neve. A diferença entre os tipos de precipitação é o estado em que a água se encontra.

A determinação da intensidade da precipitação é muito importante para o controle de inundações e de processos geológico-geotécnicos como a erosão hídrica pluvial, escorregamentos, assoreamentos e movimentos de massa (deslizamentos, corridas etc.). Devido à capacidade de produzir escoamento, a chuva é considerada o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia.

As características principais da precipitação são: total, duração e distribuições temporal e espacial. O total precipitado não tem significado se não estiver relacionado a uma duração. A ocorrência da precipitação é um processo aleatório: não é possível uma previsão determinística com antecedência. O tratamento dos dados de precipitação para a maioria dos problemas hidrológicos é estatístico.

As grandezas que caracterizam uma chuva são explicadas a seguir:

- a) Altura pluviométrica ( $h$ ): é definida como a espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região na qual ocorreu a precipitação, considerando que não ocorresse infiltração, evaporação ou escoamento para fora dos limites da região. A unidade de medição usual é o milímetro de chuva (volume de precipitação por metro quadrado de superfície).
- b) Duração ( $t$ ): é o período de tempo durante o qual a chuva precipita. As unidades normalmente utilizadas são o minuto ou a hora.
- c) Intensidade ( $i$ ): é definida como a precipitação por unidade de tempo, obtida pela divisão da altura pluviométrica pela duração da chuva. É expressa em mm/h ou mm/min. A intensidade de uma precipitação é variável no decorrer do tempo, mas para análise dos processos hidrológicos, geralmente são definidos intervalos nos quais a intensidade é considerada constante.
- d) Probabilidade de ocorrência ( $P$ ) e tempo de recorrência (TR): a precipitação é caracterizada como um fenômeno aleatório. Na análise de alturas pluviométricas (ou intensidades) máximas, o TR é interpretado como o número médio de anos durante o qual se espera que a precipitação analisada seja igualada ou superada. O inverso do TR é a probabilidade desta precipitação ocorrer no período de um ano (probabilidade anual). Por exemplo, uma precipitação com 1% de probabilidade anual tem um TR = 100 anos.

O tempo de retorno permite obter o valor da intensidade média máxima correspondente à duração desejada. Tal duração é adotada igual ao tempo de concentração da bacia ( $T_c$ ), por ser a duração que provoca a máxima vazão de pico correspondente ao tempo de retorno escolhido.

Ao tratar-se de modelagem hidrológica de fluxos superficiais, deve-se entender que a precipitação sempre se refere à precipitação efetiva, ou seja, à parcela da precipitação que não foi perdida por infiltração, interceptação ou retenção superficial e que gera, portanto, o escoamento superficial.

#### 4.1.3 Escoamento superficial

O movimento das águas na superfície terrestre, em função do efeito da gravidade, constitui o escoamento superficial, que está direta ou indiretamente relacionado com as precipitações (Figura 4.4). Tucci (1993) define escoamento superficial como a combinação dos fluxos de pequena profundidade na superfície que, ao se unirem, formam cursos d'água cada vez maiores, que constituem a rede de drenagem.



**Figura 4.4** – Escoamento superficial (BETTS, 1999)

Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre interferência pela cobertura e grande parte do mesmo é infiltrada. Já o escoamento em bacias em áreas urbanas é regido pela interferência do homem por meio de superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais (TUCCI, 1993).

Segundo Chow *et al.* (1988), a formação do escoamento superficial está condicionada a fatores que podem ser separados em dois grupos, os climáticos e os fisiográficos, cuja classificação é apresentada na Figura 4.5 a seguir.

Grupo	Tipo	Fator
Climáticos	Precipitação	Modalidade (chuva, neve, neblina, granizo, orvalho, geada), distribuição no tempo e no espaço, frequência de ocorrência, direção dominante das tempestades, precipitação antecedente e umidade do solo.
	Evaporação	Temperatura, vento, pressão atmosférica, natureza e superfície de evaporação.
	Transpiração	Temperatura, radiação solar, vento, umidade do ar e do solo e tipo de vegetação.
Fisiográficos	Características da bacia	Geométricas (forma, tamanho, declive, orientação, elevação) e físicas (cobertura e utilização do solo, tipo de solo, infiltração, permeabilidade, topografia, capacidade de formar escoamento subterrâneo).
	Características dos cursos d'água	Capacidade de escoamento (dimensão e forma da seção transversal, declive, rugosidade, características da rede hidrográfica e comprimento do curso d'água) e capacidade de armazenamento.

**Figura 4.5** – Quadro de fatores condicionantes do escoamento (adaptado de Chow *et al.*, 1988)

De acordo com Brandão *et al.* (2003) as condições de superfície que mais influenciam no escoamento superficial são:

- Tipo de solo: interfere diretamente na taxa de infiltração de água no solo e na capacidade de retenção de água sobre a superfície;
- Topografia: além de influenciar a capacidade de escoamento da água, interfere também na capacidade de armazenamento da água no solo. As áreas com maiores declives geralmente tem menor capacidade de armazenamento superficial;
- Rede de drenagem: uma rede de drenagem densa e ramificada permite a concentração rápida do escoamento superficial, favorecendo a ocorrência de maiores vazões;
- Obras hidráulicas presentes na bacia: as obras de drenagem provocam um aumento na velocidade de escoamento, enquanto as obras com finalidade de contenção do escoamento provocam redução na vazão máxima.

#### 4.1.4 Erosão hídrica pluvial

A erosão hídrica, caracterizada como a desagregação e posterior remoção das partículas do solo, é função de um conjunto de propriedades do mesmo (coesão, grau de estruturação, textura, capacidade de retenção de água, aeração), do grau de declividade da área considerada, da cobertura física do terreno, do regime de precipitações pluviométricas entre outros. No Brasil, os problemas de erosão hídrica são em grande parte de origem pluvial, onde a desagregação e o transporte de camadas do solo são provocados pela ação do escoamento superficial gerado pelas precipitações intensas, condicionados às propriedades mencionadas acima (SILVA, 1972).

De acordo com Santos *et al.* (2010), a caracterização de chuvas intensas é imprescindível para a resolução de problemas de engenharia, tanto em áreas urbanas como rurais. Como o solo é um recurso de renovação lenta e pode ser rapidamente degradado pela ação da erosão, o conhecimento de como a precipitação atua no ambiente é fundamental. O uso de técnicas e modelos hidrológicos permite a caracterização e quantificação do escoamento superficial oriundo de chuvas intensas. Na maioria dos casos, as perdas de solo causadas pela erosão hídrica reduzem a espessura do solo, diminuindo a capacidade de retenção e redistribuição da água no perfil, gerando maiores volumes de escoamento superficial e conseqüentemente, maiores taxas de erosão.

Segundo Silva (1972), a ação erosiva das chuvas se dá por meio do seguinte mecanismo: primeiramente, ocorre um processo de desagregação das partículas de solo, em virtude do impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do terreno. A desagregação da estrutura do solo é diretamente proporcional à energia aplicada à superfície, que é função do diâmetro da gota e da aceleração da gravidade.

Uma vez iniciado o processo de desagregação, inicia-se a fase secundária, de transporte ou carreamento da camada superior do solo, que teve sua organização estrutural modificada pelo impacto das gotas de chuva. Esta fase é bastante influenciada pela topografia do terreno, representada principalmente pela declividade e pelo comprimento de rampa. O volume de material transportado é função da velocidade da enxurrada e da quantidade de material terroso em suspensão, que promove o arrastamento do material desagregado, por meio do atrito entre as partículas.

A terceira e última fase do processo erosivo é a acumulação de camadas de solo em fundos dos talwegues naturais dos terrenos, ou mesmo para o fundo de corpos d'água, provocando o assoreamento de bacias.

Nota-se a importância da cobertura vegetal durante o processo, que protege o solo desde a primeira fase do fenômeno da erosão, pelo fato de reduzir a energia cinética de impacto da gota de chuva sobre a superfície do terreno, pois a mesma é interceptada antes

da colisão com o solo. De acordo com Bertol (1989 *apud* SANTOS *et al.*, 2010), as plantas de cobertura e o material orgânico do solo podem promover redução nas perdas de solo de até 90% e, na velocidade da enxurrada, de até 62%.

Nas construções de obras civis lineares, o simples fato de eliminar a cobertura vegetal e impermeabilizar o solo, seja pela compactação ou pela pavimentação asfáltica, constitui-se como um forte fator de indução de erosões. Segundo Acra (1988), a impermeabilização da faixa de estradas e a acumulação de águas pluviais nas margens das rodovias, direcionando-as terreno abaixo, concentram grandes forças distribuidoras e arrastadoras do solo (Figura 4.6).



**Figura 4.6** – Erosão hídrica às margens da rodovia SP-304 (GLOBO.COM, 2013)

São vários os fatores determinantes dos fenômenos de erosão nas estradas de rodagem e nas áreas adjacentes: o maior ou menor grau de deterioração dos solos das áreas integrantes do corpo estradal, características inerentes ao material (textura, estruturação e coesão das partículas), e as águas pluviais, cuja atuação é preponderante no processo erosivo, já que o curso normal das águas é alterado desde o início das obras de terraplenagem (SILVA, 1972). Contudo, o fator de maior influência são os projetos e execuções inadequados dos dispositivos de drenagem, que tem como consequência a degradação do corpo estradal e do meio ambiente.

Os projetos de drenagem devem estar embasados em estudos bem fundamentados, pois se as análises e especificações técnicas não estiverem adequadas, o sistema de drenagem pode tornar-se ineficiente e causar danos e perdas irreversíveis na

obra, inclusive aos usuários. Portanto, a elaboração do projeto de drenagem deve abranger as seguintes atividades: delimitação da área, levantamento topográfico, estudos dos regimes pluviométricos, do lençol freático e do solo e dimensionamento dos dispositivos drenantes.

Segundo Bacellar (2014), as principais causas de patologias e rupturas relacionadas à drenagem em obras são:

- Erros no projeto: ausência de drenagem subsuperficial, erros no dimensionamento de drenos e tubulações, falta de projeto de canalização de água superficial e falta de previsão de drenagem na transição entre corte e aterro nos projetos de terraplenagem, que pode provocar movimentações no terreno pela variação do nível do lençol freático.
- Erros na execução: utilização de tubos com diâmetro menor que o especificado em projeto, usos de materiais inadequados (agregados, mantas etc.) e execução incorreta de assentamento dos tubos, sem seguir as declividades especificadas no projeto.
- Falha na manutenção: falta de limpeza regular de grelhas, bocas de lobo e caixas de captação e falta da retirada da vegetação em calhas e valetas, que podem causar o entupimento das tubulações de drenagem.
- Agentes externos: escavações no terreno podem interceptar o sistema de drenagem e a passagem de veículos ou cargas pesadas pode provocar o deslocamento das tubulações.
- Vencimento da vida útil e desgaste pelo uso: as mantas perdem a capacidade de filtrar devido ao preenchimento de vazios pelos materiais carreados pela água e os tubos perdem a capacidade de drenagem pelo depósito de sedimentos que reduzem a seção de escoamento.

## **4.2 Equações de chuvas intensas**

Segundo Martinez Junior e Magni (1999), para certa intensidade de chuva, constante e igualmente distribuída sobre uma bacia, a máxima vazão a ser verificada numa seção corresponde à duração de uma chuva igual ao tempo de concentração da bacia, a partir do qual a vazão na seção torna-se constante. Assim, a estimativa de vazões exige o conhecimento da relação entre intensidade, duração e frequência da precipitação. Tal relação deve ser deduzida a partir da observação de chuvas ocorridas durante um longo



período de tempo, com dados suficientes para que seja possível considerar as ocorrências como probabilidades.

As equações elaboradas para o Estado de São Paulo utilizam três tipos de funções intensidade-duração-frequência (IDF), conforme apresentado a seguir:

#### 4.2.1 Equação geral

De forma geral, a relação intensidade-duração-frequência das precipitações é representada pela Equação 4.1:

$$i = C (t + t_0)^{-n} \quad (4.1)$$

onde:  $i$  = intensidade pluviométrica máxima para a duração  $t$  (mm/min);

$t$  = duração da chuva (min);

$C, n, t_0$  = parâmetros que variam de acordo com a localidade.

Os valores de  $C$  e  $n$  variam com o período  $T$  (em anos). As relações entre  $C-T$  e  $n-T$  são representadas por equações de dois tipos:

I)  $C = k T^m$ , onde  $n$  pode ser constante ou  $n = d T^{-p}$ ;

II)  $C = k + m \ln T$

$n = d + p T$  onde  $k, m, d$  e  $p$  são parâmetros variáveis conforme o local.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros das equações do tipo geral elaboradas para o Estado de São Paulo.

**Tabela 4.1** – Parâmetros das Equações do tipo geral (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

Local	Tipo	Autores	Parâmetros das Equações					
			$k$	$m$	$T_0$	$n$	$d$	$p$
Campinas	I	Vieira	42,081	0,1429	20,000	0,9483	-	-
Juquiá	I	Hidrobrasileira SA	23,333	0,150	18,000	0,750	-	-
Piracicaba	II	Vieira <i>et. al.</i>	54,972	10,856	24,000	-	1,043	0,00004
Presidente Prudente	I	Sudo <i>et al.</i>	13,9059	0,168	15,000	0,7247	-	-
São Carlos	I	Barbassa	25,330	0,236	16,000	0,935	-	-
São Paulo	I	Wiken	29,130	0,181	15,000	0,890	-	-
		Occhipinti	$t \leq 1$ h	27,960	0,112	15,000	-	0,860
			$t > 1$ h	20,210	0,150	-	0,820	-

#### 4.2.2 Equações Eng. Otto Pfafstetter

O Eng. Otto Pfafstetter publicou, em 1957 com reedição em 1982, as equações de chuvas baseadas nos resultados de pesquisas realizadas em 98 postos do Serviço de Meteorologia do Ministério de Agricultura, o atual INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (PFASFTETTER, 1982 *apud* MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999).

Para o Estado de São Paulo, foram elaboradas equações de precipitações intensas para 14 postos pluviográficos, localizados em 11 municípios: Avaré, Bauru, Campos do Jordão, Lins, Piracicaba, Santos, São Carlos, São Paulo, São Simão, Taubaté e Ubatuba.

As precipitações máximas são definidas pela seguinte fórmula empírica (Equação 4.2), em função da duração e do tempo de recorrência:

$$h_{t,T} = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^\gamma}} [ a t + b \log (1 + c t ) ] \quad (4.2)$$

onde:

$h_{t,T}$  = altura da precipitação, correspondente à duração  $t$  e período de retorno  $T$  (mm);

$T$  = tempo de recorrência (anos);

$t$  = duração da precipitação (horas);

$\alpha$  = coeficiente que depende da duração da precipitação;

$\beta$  = coeficiente que varia com o posto considerado e a duração da precipitação;

$\gamma$  = coeficiente que assume o valor 0,25 para todo o Brasil;

$a, b, c$  = coeficientes constantes para cada posto pluviográfico.

Os valores de  $\alpha$ , dados em função da duração da precipitação, são apresentados na Tabela 4.2 a seguir.

**Tabela 4.2** – Valores de  $\alpha$  (PFASFTETTER, 1982 *apud* MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

Duração	$\alpha$
5 minutos	0,108
15 minutos	0,122
30 minutos	0,138
1 hora	0,156
2 horas	0,166
4 horas	0,174
8 horas	0,176
14 horas	0,174
24 horas	0,170
48 horas	0,166
3 dias	0,160
4 dias	0,156
6 dias	0,152

Os valores de  $\beta$ , também dados em função da duração da precipitação, juntamente com os valores dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$ , estão indicados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** – Valores de  $\beta$  e dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  (adaptado de PFAFSTETTER, 1982 apud MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

Município	Posto/Entidade	$\beta$				$a$	$b$	$c$
		Duração						
		5 min	15 min	30 min	1 h a 6 d			
<b>Avaré</b>	Avaré 83773/ INMET	0,00	0,04	0,08	0,08	0,3	25	20
<b>Bauru</b>	Bauru 83625/ INMET	- 0,04	0,08	0,08	0,08	0,5	24	20
<b>Campos do Jordão</b>	Campos do Jordão 83705/ INMET	- 0,04	0,08	0,12	0,12	0,2	32	20
<b>Lins</b>	Lins 83674/ INMET	0,00	0,04	0,08	0,04	0,4	19	20
<b>Piracicaba</b>	Piracicaba 83720/ INMET	- 0,08	0,04	0,12	0,08	0,3	25	20
	Tupi 83859/ INMET	- 0,08	0,12	0,12	0,04	0,3	18	60
<b>Santos</b>	Santos 83782/ INMET	0,12	0,12	0,16	0,20	0,7	44	10
	Itapema 83823/ INMET	0,12	0,20	0,20	0,12	0,2	50	20
<b>São Carlos</b>	São Carlos 83726/ INMET	- 0,04	0,08	0,08	0,12	0,4	29	20
<b>São Paulo</b>	Congonhas/ DEPV	- 0,04	0,04	0,04	0,04	0,6	16	60
	Mirante de Santana 83781/ INMET	- 0,04	0,12	0,12	0,04	0,4	25	20
<b>São Simão</b>	São Simão 83669/ INMET	0,00	0,04	0,08	0,08	0,4	26	20
<b>Taubaté</b>	Taubaté 347/ INMET	0,12	0,12	0,12	0,16	0,3	24	20
<b>Ubatuba</b>	Ubatuba 83852/ INMET	0,04	0,16	0,16	0,16	0,6	46	10

#### 4.2.3 Equações do tipo $\ln \ln$

As equações do tipo  $\ln \ln$ , desenvolvidas entre 1979 e 1982 para o Estado de São Paulo, consideram séries anuais e parciais de intensidades de chuvas (MERO; MAGNI, 1982 apud MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999) e são definidas a partir da seguinte fórmula (Equação 4.3):

$$i_{t,T} = A_j (t + B_j)^{C_j} + (t + D_j)^{E_k} \times \{ F_k + G_k \ln \ln [T / (T-1)] \} + M_j (t + P_j)^{Q_j} \ln (T - 0,5) \quad (4.3)$$

sendo  $j = k = 1$  para  $10 \text{ min} \leq t \leq 60 \text{ min}$ ;

$j = k = 2$  para  $60 \text{ min} < t \leq 180 \text{ min}$ ;

$j = 2$  e  $k = 3$  para  $180 \text{ min} < t \leq 1440 \text{ min}$ ;

onde  $i$  = intensidade da chuva, correspondente à duração  $t$  e o período de retorno  $T$  (mm/min);

$t$  = duração da chuva (min);

$T$  = período de retorno (anos);

$A, B, C, D, E, F, G, M, P, Q$  = parâmetros que variam com o posto e a duração da chuva.

A Tabela 4.4 contém os parâmetros citados.

**Tabela 4.4** – Coeficientes das equações do tipo *ln ln*, elaboradas entre 1979 e 1982 (MERO; MAGNI *apud* MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

	Aparecida	Avaré	Barretos	Bauru	Lins	Piracicaba	Santos	São Paulo	São Simão	Tapiraí	Ubatuba
<b>A<sub>1</sub></b>	46,38	100	19,18	15,79	32,19	43,2	18,85	37,05	33,54	70,01	10,3
<b>B<sub>1</sub></b>	30	30	20	15	15	20	-	20	20	30	15
<b>C<sub>1</sub></b>	-0,912	-1,109	-0,849	-0,719	-0,916	-0,988	-0,76	-0,914	-0,903	-1,06	-0,583
<b>D<sub>1</sub></b>	30	30	-	15	15	-	20	20	10	-	-
<b>E<sub>1</sub></b>	-0,912	-0,792	-	-0,719	-0,916	-	-0,76	-0,914	-0,461	-	-0,236
<b>F<sub>1</sub></b>	-8,174	-4	-	-2,224	-4,951	-	-3,315	-5,966	-0,608	-	-0,33
<b>G<sub>1</sub></b>	-15,91	-7,70	-	4,17	-9,82	-	-6,08	-10,88	-1,121	-	-0,62
<b>M<sub>1</sub></b>	-	-	5,37	-	-	11,67	-	-	-	28,00	-
<b>P<sub>1</sub></b>	-	-	20	-	-	20	-	-	-	30	-
<b>Q<sub>1</sub></b>	-	-	-0,849	-	-	-0,988	-	-	-	-1,06	-
<b>A<sub>2</sub></b>	39,91	43,29	17,78	28,4	15,12	20,44	10,44	19,24	26,26	28,9	15,73
<b>B<sub>2</sub></b>	10	15	20	15	5	10	-	-	20	20	15
<b>C<sub>2</sub></b>	-0,923	-0,965	-0,834	-0,86	-0,768	-0,841	-0,662	-0,821	-0,851	-0,89	-0,682
<b>D<sub>2</sub></b>	10	15	-	15	5	-	-	-	10	-	-
<b>E<sub>2</sub></b>	-0,923	-0,951	-	-0,86	-0,768	-	-0,662	-0,821	-0,781	-	-0,236
<b>F<sub>2</sub></b>	-7,034	-6,995	-	-3,999	-2,325	-	-1,836	-3,098	-2,745	-	-0,33
<b>G<sub>2</sub></b>	-13,28	-13,47	-	-7,49	-4,61	-	-3,36	-5,65	-5,06	-	-0,62
<b>M<sub>2</sub></b>	-	-	4,98	-	-	5,52	-	-	-	11,56	-
<b>P<sub>2</sub></b>	-	-	20	-	-	10	-	-	-	20	-
<b>Q<sub>2</sub></b>	-	-	-0,834	-	-	-0,841	-	-	-	-0,89	-
<b>E<sub>3</sub></b>	-0,923	-0,951	-	-0,86	-0,768	-	-0,662	-0,821	-0,781	-	-0,724
<b>F<sub>3</sub></b>	-7,034	-6,995	-	-3,999	-2,325	-	-1,836	-3,098	-2,745	-	-4,302
<b>G<sub>3</sub></b>	-13,28	-13,47	-	-7,49	-4,61	-	-3,36	-5,65	-5,06	-	-8,04

#### 4.2.4 Novas equações de chuvas intensas para o Estado de São Paulo

Para a definição das equações de chuvas intensas, Martinez Junior e Magni (1999) optaram por seguir uma formulação matemática similar à adotada por técnicos da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (FCTH), entre 1979 e 1982, na elaboração das equações de precipitações intensas de 11 localidades do Estado de São Paulo. Assim, os autores decidiram trabalhar somente com séries históricas anuais de intensidades de chuva. As equações que relacionam intensidade, duração e frequência das precipitações para cada localidade incorporam a equação proposta por Ven-Te-Chow para análises hidrológicas (1951, *apud* MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999), admitindo-se que as precipitações intensas atendam à distribuição estatística de tipo I de Fisher-Tippet, também conhecida como distribuição de Gumbel.

As equações de chuvas intensas foram determinadas a partir da expressão dada pela Equação 4.4 e 4.5:

$$i_{t,T} = M_{(i)t} + \sigma_{(i)t} \times K_{n,T} \quad (4.4)$$

com:

$$K_{n,T} = (y - \bar{y}) / \sigma_y = - (y / \sigma_y) - (1 / \sigma_y) \times \ln \ln [T / (T-1)] \quad (4.5)$$

onde:

$i_{t,T}$  = intensidade da chuva (mm/min) para a duração  $t$  (min) e período de retorno  $T$  (anos);

$M_{(i)t}$  = média das intensidades médias das chuvas intensas correspondentes à duração  $t$ ;

$\sigma_{(i)t}$  = desvio padrão das intensidades médias das chuvas intensas correspondentes à duração  $t$ ;

$K_{n,T}$  = fator de frequência para a distribuição de Gumbel, função do número de anos da série de precipitações e do período de retorno  $T$ ;

$y$  = variável reduzida da distribuição de Gumbel;

$\bar{y}$  = média da variável reduzida da distribuição de Gumbel;

$\sigma_y$  = desvio padrão da variável reduzida da distribuição de Gumbel.

Admite-se a hipótese de que a média e o desvio padrão das intensidades médias das chuvas sofrem variação com a duração, por meio de expressões como a Equação 4.6 e 4.7:

$$M_{(i)t} = A (t + B)^C \quad (4.6)$$

$$\sigma_{(i)t} = D (t + E)^F \quad (4.7)$$

onde:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  são parâmetros a serem determinados para cada localidade.

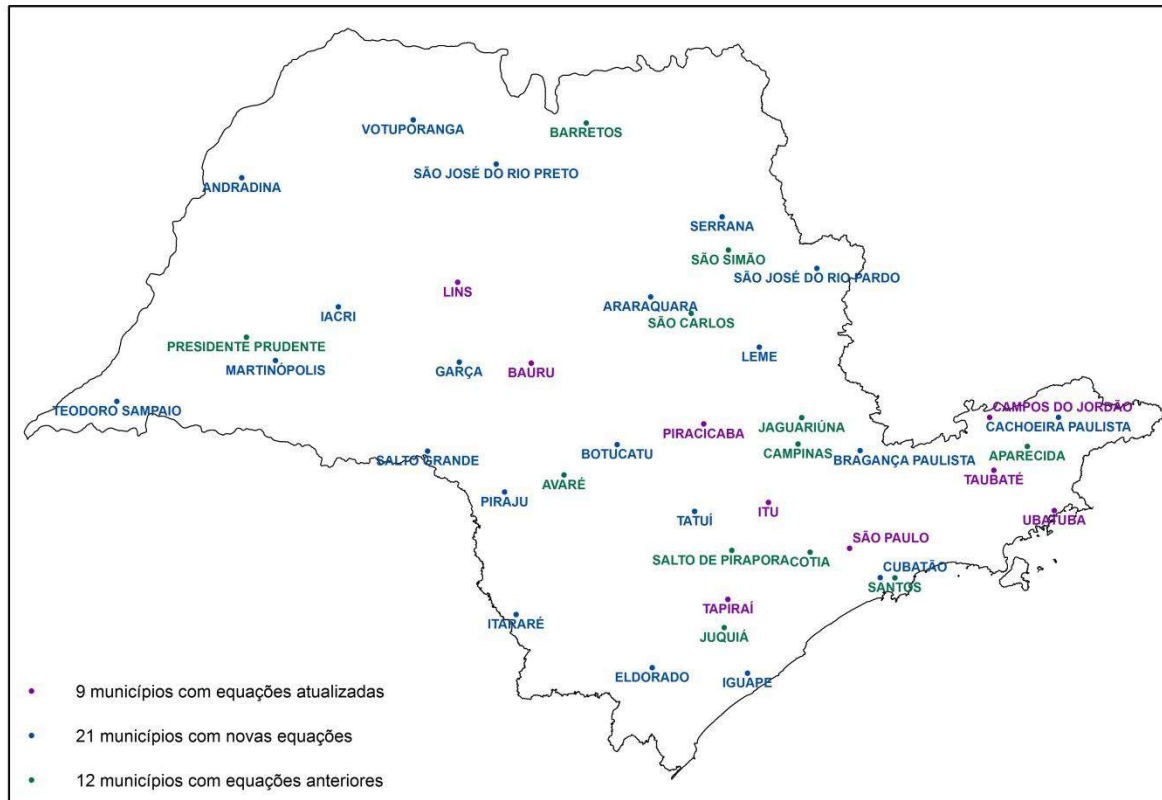
Substituindo-se as três expressões anteriores na Equação 4.4, temos a Equação 4.8:

$$i_{t,T} = A (t + B)^C + D (t + E)^F \times \{ G + H \ln \ln [T / (T-1)] \} \quad (4.8)$$

Para selecionar as 30 localidades do Estado de São Paulo para as quais foram efetivados os estudos e desenvolvidas as equações de chuvas intensas, foram considerados os seguintes critérios (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999):

- Distribuição espacial, de forma a atender satisfatoriamente todo o Estado de São Paulo (Figura 4.7);
- Variabilidade de altitude;

- População e importância econômica das localidades;
- Locais com dados disponíveis e que já possuíam equações anteriores elaboradas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), pela FCTH ou por outras entidades e autores;
- Número de anos de registro de chuvas dos poços;
- Qualidade dos dados de chuvas disponíveis.



**Figura 4.7** – Municípios com equações IDF no Estado de São Paulo (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

As etapas do procedimento de obtenção das equações de chuvas intensas das localidades selecionadas foram descritas por Martinez Junior e Magni (1999).

A primeira etapa é a leitura dos pluviogramas e digitação dos dados. A leitura dos pluviogramas foi realizada pelo Método do Ponto de Inflexão, preenchendo-se folhas de codificação que foram digitadas posteriormente. Tal método apresenta maior rapidez na leitura e codificação, maior facilidade para digitação e análise dos dados e maior precisão nas leituras das precipitações, reduzindo a margem de erros para intervalos de tempo da ordem de dez minutos.

A segunda etapa é a análise dos dados gravados e geração das séries históricas, na qual os dados digitados são recuperados e, utilizando-se um programa computacional, é

realizada a consistência dos dados, obtendo-se arquivos com valores de alturas de chuva a cada intervalo de 5 minutos. Outro programa fornece as séries históricas de intensidades máximas de chuvas anuais, padronizadas para durações de precipitações de 10, 20, 30 60, 120, 180, 360, 720, 1080 e 1440 minutos.

A terceira e última etapa é o equacionamento, na qual é realizada a verificação do ajuste das precipitações intensas à distribuição de Gumbel e a determinação da expressão genérica do fator de frequência ( $K_{n,T}$ ). Também é realizada a determinação, por regressão, das expressões matemáticas para a média e o desvio padrão.

A Tabela 4.5 mostra os coeficientes obtidos para as equações de chuvas intensas, referentes às estações pluviométricas analisadas, no formato da Equação 4.8.

**Tabela 4.5** – Coeficientes das equações de chuvas intensas para equações do tipo  $i_{t,T} = A (t + B)^C + D (t + E)^F \times \{ G + H \ln \ln [ T / (T-1) ] \}$  para  $10 \leq t \leq 1440$  com  $i_{t,T}$ : intensidade da chuva (mm/min) para duração  $t$  (min) e período de retorno  $T$  (anos) (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999)

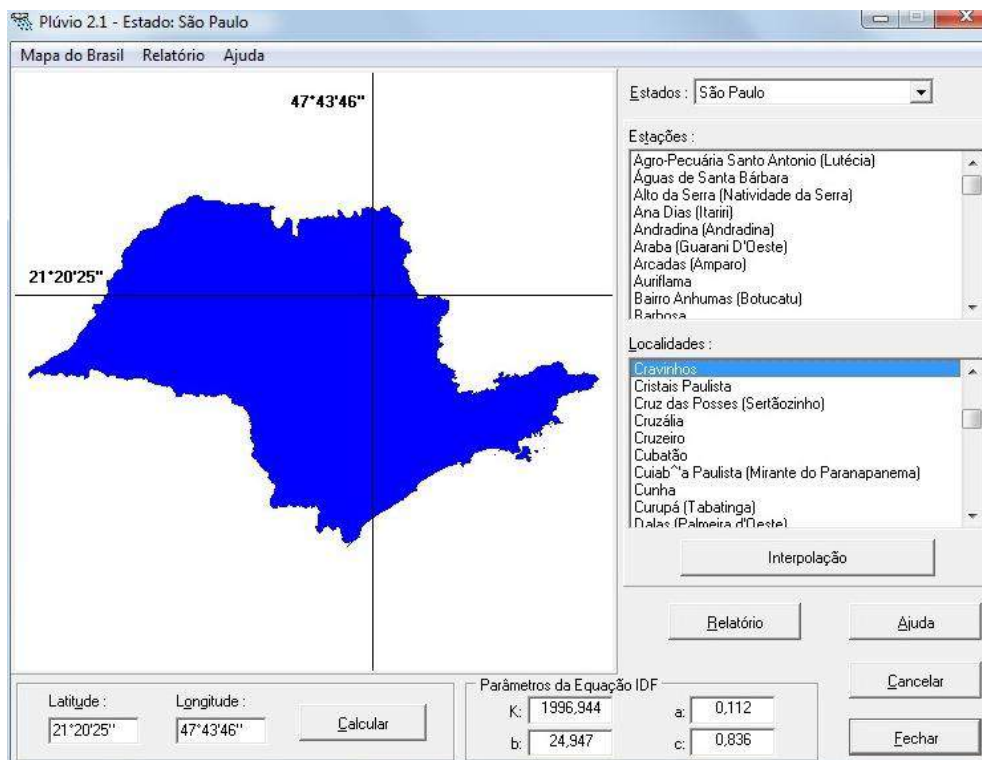
LOCALIDADES	COEFICIENTES								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
ANDRADINA	34,5743	20	-0,8809	2,6906	10	-0,6683	-0,4766	-0,8977	
ARARAQUARA	10≤t≤105	32,4618	15	-0,8684	2,1429	15	-0,5482	-0,4772	-0,901
	105<t≤1440	32,4618	15	-0,8684	18,4683	15	-0,9984	-0,4772	-0,901
BAURU	35,4487	20	-0,8894	5,9664	20	-0,7749	-0,4772	-0,901	
BOTUCATU	30,6853	20	-0,8563	3,966	10	-0,7566	-0,4754	-0,8917	
BRAGANÇA	33,7895	30	-0,8832	5,4415	10	-0,8442	-0,4885	-0,9635	
CACHOEIRA	57,1456	30	-0,9495	22,7285	30	-0,9986	-0,4716	-0,8716	
CAMPOS DO JORDÃO	19,1535	15	-0,7928	2,0341	5	-0,659	-0,4778	-0,9046	
CUBATÃO	25,1025	20	-0,7522	6,4266	20	-0,705	-0,4772	-0,901	
ELDORADO	38,4622	30	-0,8939	19,0899	30	-0,9296	-0,4688	-0,8573	
GARÇA	52,0793	30	-0,9365	12,1571	20	-0,9424	-0,4793	-0,9126	
IACRI	33,3984	20	-0,8486	2,2482	5	-0,6276	-0,5009	-1,0334	
IGUAPE	10≤t≤120	129,8902	77	-0,9373	1,7487	77	-0,2852	-0,4801	-0,9171
	120<t≤1440	129,8902	77	-0,9373	31,7694	77	-0,8328	-0,4801	-0,9171
ITARARÉ	20,0196	10	-0,7961	11,4493	10	-0,9224	-0,4778	-0,9046	
LEME	35,1348	20	-0,8823	7,9502	20	-0,8101	-0,476	-0,8946	
LINS	57,4647	30	-0,9386	16,5999	65	-0,9078	-0,4778	-0,9046	
MARTINÓPOLIS	51,3805	30	-0,9334	20,5323	40	-0,9671	-0,4754	-0,8917	
PIRACICABA	47,8273	30	-0,911	19,2043	30	-0,9256	-0,482	-0,9273	
PIRAJU	37,3614	30	-0,866	10,0167	60	-0,8427	-0,4766	-0,8977	
SALTO GRANDE	26,4615	20	-0,8479	5,1394	10	-0,8016	-0,4713	-0,8699	
SÃO JOSÉ DO RIO PARDO	24,1997	20	-0,8367	3,9564	10	-0,7504	-0,4681	-0,854	
SÃO JOSÉ DO RIO PRETO	57,6545	30	-0,948	13,1313	30	-0,9485	-0,4754	-0,8917	
SÃO PAULO	39,3015	20	-0,9228	10,1767	20	-0,8764	-0,4653	-0,8407	
SERRANA	39,8213	25	-0,8987	9,1245	15	-0,8658	-0,4786	-0,9085	
TAPIRAÍ	27,4379	20	-0,8447	4,3767	15	-0,7369	-0,4744	-0,8863	
TATUÍ	19,7523	20	-0,7872	5,5111	20	-0,7609	-0,4766	-0,8977	
TAUBATÉ	54,5294	30	-0,9637	11,0319	20	-0,9116	-0,474	-0,8839	
TEODORO SAMPAIO	47,2091	30	-0,915	7,0141	20	-0,8321	-0,4786	-0,9085	
UBATUBA	28,4495	40	-0,7564	17,2878	70	-0,8236	-0,47	-0,8637	
VOTUPORANGA	59,1192	30	-0,9566	7,5593	30	-0,825	-0,4744	-0,8863	

#### 4.2.5 Software Plúvio 2.1

O programa Plúvio 2.1 (Figura 4.8) foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (GPRH/UFV) e determina equações de chuvas intensas para diversas localidades do Brasil.

O programa espacializa dados de chuvas intensas pelo método do inverso da quinta potência. Segundo Cecílio e Pruski (2003), tal método foi escolhido por apresentar melhores resultados na estimativa da intensidade máxima média de precipitação, quando comparado a outras formas de interpolação. De acordo com os autores, os valores de erro médio percentual (19,37%) e erro máximo do *software* (88,34%) são aceitáveis para chuvas intensas.

Ainda, a utilização do inverso da quinta potência permite que as localidades mais próximas ao ponto de interesse tenham maior peso na interpolação dos parâmetros da equação, já que na interpolação são consideradas todas as localidades cujas equações são conhecidas nos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo e Tocantins (PRUSKI, 2006).



**Figura 4.8** – Tela do *software* Plúvio 2.1



Para obter as equações das localidades cuja equação de chuva intensa é desconhecida, foi desenvolvida uma metodologia adaptada de Pruski *et al.* (1997), que utiliza um interpolador para obtenção dos parâmetros da equação IDF a partir das informações disponíveis. A interpolação não considera o efeito da altitude do local ou de outros fatores condicionantes da precipitação, tais como presença de serras, proximidade com o oceano entre outros.

A equação expressa pelo Plúvio (Equação 4.9) segue o modelo abaixo:

$$i = \frac{k T^a}{(t + b)^c} \quad (4.9)$$

onde  $i$  = intensidade média da precipitação intensa (mm/h);

$t$  = duração da precipitação (min);

$T$  = período de retorno (anos);

$k, a, b, c$  = constantes de ajustes locais.

O programa realiza de maneira independente a interpolação de cada um dos parâmetros da equação ( $k, a, b, c$ ). O fator de ponderação utilizado para a localidade de interesse é o inverso da quinta potência da distância das localidades cuja equação é conhecida, bem como a latitude e longitude para qual a equação é pretendida.

### 4.3 Estimativa de vazões máximas pelo Método Racional

#### 4.3.1 Método Racional

Tucci (1993) cita que a vazão máxima pode ser estimada com base no ajuste de uma distribuição estatística, na regionalização de vazões ou na precipitação. Quando existem dados históricos de vazão na área de interesse e as condições da bacia não foram modificadas, é possível ajustar uma distribuição estatística. Quando não há dados ou a série é pouco extensa, pode-se utilizar a regionalização de vazões máximas. A regionalização permite a estimativa da vazão máxima em locais sem dados, com base em postos da região.

A vazão máxima também pode ser estimada com base na precipitação, por métodos que representam os principais processos da transformação da precipitação em vazão. No caso de bacias que não apresentam complexidade e com pequena área de drenagem, a vazão é usualmente determinada pelo Método Racional. Tal método foi introduzido em 1889 e é amplamente utilizado nos Estados Unidos e em outros países.

Embora seja uma metodologia bastante simples, nenhum outro método alcançou o mesmo nível de aceitação geral. A aplicação adequada do método pode conduzir resultados bastante satisfatórios em projetos de drenagem urbana ou em áreas rurais (DAEE, 1994).

O conceito de bacia pequena é bastante variável entre os hidrólogos. Não existe definição correta de bacia pequena, média ou grande (TOMAZ, 2013). O DAEE recomenda o método para bacias de até, no máximo, 2 km<sup>2</sup>. Para Porto *et. al.* (1993), o método é aplicável em bacias com área inferior a 3 km<sup>2</sup> ou quando o tempo de concentração for inferior a uma hora. Akan (1993) admite área de drenagem de até 13 km<sup>2</sup>. De acordo com Lencastre (1991), não há consenso relativo a um limite de área para aplicabilidade do método, ainda que o mesmo apresente resultados satisfatórios em bacias com áreas inferiores a 25 km<sup>2</sup>.

Os princípios básicos da metodologia, de acordo com Tucci (1993), são:

- I) Considera a duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração. Portanto, admite-se que a bacia é suficientemente pequena já que a duração é inversamente proporcional à intensidade. Em bacias pequenas, as condições mais críticas ocorrem devido a precipitações de pequena duração e grande intensidade;
- II) Adota-se um coeficiente único de perdas, denominado *C*, estimado com base nas características da bacia;
- III) O volume da cheia e a distribuição temporal das vazões não são avaliados.

O método pode ser colocado sob a seguinte fórmula (Equação 4.10), que utiliza um fator de correção para a distribuição da chuva na bacia:

$$Q = 166,67 C \times i \times A \times D \quad (4.10)$$

onde *Q* = vazão máxima (l/s);

*C* = coeficiente de escoamento superficial;

*i* = intensidade da chuva crítica (mm/min);

*A* = área da bacia de contribuição (ha);

*D* = coeficiente de distribuição da chuva.

Para:  $A < 50$  ha       $D = 1$

$A > 50$  ha       $D = 1 - 0,009 L/2$

onde *L* = comprimento do talvegue (km).

Algumas premissas básicas são adotadas quando se aplica o Método Racional (PMSP, 1999):

- O pico do ESD (Escoamento Superficial Direto) referente ao local de estudo é função do tempo de concentração, bem como da intensidade da chuva, cuja duração é supostamente igual ao tempo de concentração.
- As condições de permeabilidade superficiais da bacia permanecem constantes durante a ocorrência da chuva.
- O pico do ESD ocorre quando toda a área de drenagem, a montante do local em estudo, passa a contribuir no escoamento.

A aplicação do método depende dos seguintes dados e informações (PMSP, 1999):

- Planimetria da bacia para determinação da área;
- Existência de uma relação intensidade-duração-frequência representativa do regime de chuvas intensas na área;
- Escolha de um coeficiente de escoamento superficial representativo das condições da bacia;
- Determinação do tempo de concentração, ou seja, o tempo de percurso da água desde o ponto mais distante da bacia até a seção de interesse. Após o tempo de concentração, toda a área da bacia estará contribuindo para o escoamento, desde que a duração da chuva excedente seja, no mínimo, igual ao tempo de concentração.

#### 4.3.2 Tempo de concentração

O tempo de concentração é o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até a seção principal. É um parâmetro decisivo do Método Racional, assim como o coeficiente de escoamento superficial, e a determinação de ambos está sujeita a incertezas e imprecisões (TUCCI, 1993; PMSP, 1999).

Existem várias fórmulas empíricas e semi-empíricas para determinação do tempo de concentração (MATA LIMA *et al.*, 2007). Para a aplicação no Método Racional, utiliza-se com frequência a equação proposta por Kirpich (1940), que foi desenvolvida para áreas agrícolas nos Estados Unidos (AKAN, 1993). O tempo de concentração pela fórmula de Kirpich, adaptado pela FCTH, é dado pela Equação 4.11 a seguir.

$$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (4.11)$$

onde  $t_c$  = tempo de concentração (min);

$L$  = comprimento do talvegue (km);

$H$  = desnível entre cotas (m).

Segundo Studart (2002), o comprimento do talvegue é a medida em linha reta entre pontos inicial e final do curso d'água principal.

#### 4.3.3 Intensidade

A intensidade é definida como a quantidade de chuva que ocorre na unidade de tempo adotada, para uma dada frequência e duração igual ao tempo de concentração.

As relações entre intensidade, duração e frequência de chuvas intensas são deduzidas a partir de observações de precipitações ocorridas durante um período de tempo suficientemente grande para que seja possível considerar as frequências como probabilidades (MARTINEZ JUNIOR; MAGNI, 1999).

Para determinação das curvas IDF, utilizam-se os dados obtidos de pluviogramas, conforme o desenvolvimento apresentado a seguir (BERTONI; TUCCI, 1993):

1º Interpretação do pluviograma de cada chuva e cálculo da intensidade máxima de precipitação para cada duração;

2º Formação das séries de intensidades máximas de chuva e análise de frequência de cada uma das séries;

3º Construção de uma tabela ou de um gráfico, fornecendo a estimativa da intensidade máxima de chuva, em função de cada duração anteriormente definida e de períodos de retorno arbitrariamente estabelecidos;

4º Obtenção da equação que represente analiticamente a relação IDF, também denominadas equações de chuvas intensas.

As equações de chuvas intensas das cidades do Estado de São Paulo são apresentadas pelo DAEE e também podem ser obtidas pelo *software* Plúvio 2.1, conforme mencionado anteriormente.

#### 4.3.4 Coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de *runoff*)

O coeficiente de escoamento superficial (C) depende de diversos fatores: tipo de solo, ocupação da bacia, umidade antecedente, intensidade de chuva entre outros. Portanto, a adoção de um valor de C constante deve ser feita seguindo alguns critérios:

- O valor de C deve ser determinado para condições futuras previstas;
- Se as características da bacia forem muito heterogêneas, o valor de C deve ser estimado pelo método da média ponderada;

- O efeito da intensidade da chuva sobre C deve ser considerado com uma correção em função do período de retorno.

Normalmente, o coeficiente de escoamento superficial é determinado segundo a forma de ocupação do solo, conforme apresentado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Coeficiente de escoamento superficial (DAEE, 1994)

USO DO SOLO OU GRAU DE URBANIZAÇÃO	VALORES	
	MÍNIMOS	MÁXIMOS
Área totalmente urbanizada Urbanização futura	0,50	0,70
Área parcialmente urbanizada Urbanização moderada	0,35	0,50
Área predominantemente de plantações, pastos etc. Urbanização atual	0,20	0,35

#### 4.3.5 Método Racional Modificado

Segundo o DNIT (2005), o Método Racional tem sido utilizado preferencialmente em bacias com pequenas áreas de drenagem, mas não há indicações de que não possa ser adaptado para bacias maiores, prática comum em projetos rodoviários de outros países. Para tanto, é necessário corrigir a fórmula com um fator de redução da área, já que o Método Racional tende a superestimar as vazões no caso de bacias mais complexas (FCTH, 1999).

Portanto, diversas bibliografias apresentam a fórmula do Método Racional com um fator de redução da área, com a finalidade evitar um aumento linear e irreal das vazões em função das áreas de contribuição.

Algumas modificações do Método Racional são apresentadas a seguir:

##### 4.3.5.1 Método de McMath

O Método de McMath é expresso pela seguinte fórmula (Equação 4.12):

$$Q = 0,0091 C i A^{4/5} S^{1/5} \quad (4.12)$$

onde Q = vazão máxima (m<sup>3</sup>/s);

C = coeficiente de escoamento de McMath;

i = intensidade de chuva (mm/h);

A = área da bacia (ha);

S = declividade no talvegue principal (m/m).

Na Tabela 4.7 a seguir são apresentados os coeficientes de escoamento de McMath, sendo o valor resultante de C a soma dos três coeficientes que caracterizam a bacia.

**Tabela 4.7** – Valores para o cálculo do coeficiente de escoamento de McMath (BATISTA *et al.*, 2002)

Condições de escoamento	Tipo de cobertura vegetal		Tipo de solo		Condições topográficas da bacia	
Baixa	Área coberta de gramíneas	0,08	Areia	0,08	Área plana	0,04
Moderada	Cobertura vegetal intensa	0,12	Textura leve	0,12	Ligeiramente ondulada	0,06
Média	Cobertura razoável a rala	0,16	Textura média	0,16	Ondulada a montanhosa	0,08
Alta	Cobertura rala a esparsa	0,22	Textura pesada (argilosa)	0,22	Montanhosa a escarpada	0,11
Muito alta	Cobertura esparsa e solo descoberto	0,30	Textura pesada a área rochosa	0,30	Escarpada	0,15

A fórmula de McMath pode ser utilizada em bacias maiores que 50 ha, já que o fator de correção impede que a vazão aumente na mesma proporção que a área da bacia. Entretanto, a fórmula fornece valores relativamente baixos para bacias com área superior a 800 ha (BATISTA *et al.*, 2002).

#### 4.3.5.2 Método Racional com coeficiente de retardo ( $\varphi$ )

Para determinação da vazão máxima em bacias com área até 10 km<sup>2</sup>, pode-se utilizar o Método Racional com coeficiente de retardo (IGAM, 2010), conforme Equação 4.13 a seguir.

$$Q = 0,278 C i A \varphi \quad (4.13)$$

onde Q = vazão máxima (m<sup>3</sup>/s);

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade de chuva (mm/h);

A = área da bacia (km<sup>2</sup>);

$\varphi$  = coeficiente de retardo, dado pela seguinte expressão (Equação 4.14):

$$\varphi = \frac{1}{n \sqrt{100 A}} \quad (4.14)$$

onde  $n = 4$  para declividades inferiores a 0,5%;  
 $n = 5$  para declividades variando de 0,5 a 1,0 %;  
 $n = 6$  para declividades superiores a 1,0%.

#### 4.3.5.3 Método Racional com expoente redutor de área ( $D$ )

No Método Racional com expoente redutor de área é aplicado um expoente redutor  $D$  sobre a área de drenagem da bacia. O método apresenta a seguinte formulação (Equação 4.15) (CCN, 1991 *apud* STEFFEN; RONDON, 2000; VALEC, 2010).

$$Q = 2,778 C i A^D \quad (4.15)$$

onde  $Q$  = vazão máxima (l/s);

$C$  = coeficiente de escoamento superficial;

$i$  = intensidade de chuva (mm/h);

$A$  = área da bacia (ha);

$D$  = expoente redutor de área, igual a 1,0 para bacias com área até 50 ha e 0,9 para bacias com área superior a 50 ha.

Todas as modificações do Método Racional buscam amenizar o aumento da vazão proporcional ao aumento da área da bacia, com a inserção de fatores de redução nas fórmulas utilizadas. Assim, é possível estimar as vazões máximas para as fases iniciais de projeto sem recorrer a métodos muito elaborados, apenas adaptando o Método Racional para diferentes situações.

#### 4.3.6 Aplicações do Método Racional na estimativa de vazões

As cheias são fenômenos naturais decorrentes do caráter aleatório dos processos hidrológicos, cuja estimativa é muito importante para redução dos riscos consequentes. A seguir são apresentadas algumas das diversas aplicações do Método Racional para estimativa de vazões máximas de projeto.

Rocha *et al.* (2009) simularam a vazão superficial da microbacia do Rio Cascavel, para dar suporte ao planejamento estratégico da utilização da água do rio para abastecimento. O cálculo da vazão foi realizado pelo Método Racional. Para tanto, foram utilizadas imagens de satélite da região para determinação das variedades de cobertura superficial para obter o coeficiente de deflúvio, que foi dado por uma média ponderada considerando os vários tipos de cobrimento do solo e suas respectivas áreas. A intensidade de precipitação foi estimada por meio de dados históricos de 30 anos, considerando uma

probabilidade de ocorrência de 75%. Com a área considerada da microbacia de aproximadamente 50 km<sup>2</sup>, obtida pela digitalização de cartas topográficas do IBGE na escala 1:50.000, foi obtido um escoamento superficial médio de 0,2 m<sup>3</sup>/s.

Benini *et al.* (2004) associaram o uso de SIG ao Método Racional para previsão de vazões na bacia do córrego mineirinho em São Carlos, no estado de São Paulo, com o objetivo de estimar o aumento do escoamento superficial devido à impermeabilização do solo à montante da bacia. Foram utilizadas imagens de satélite LANSAT 7 para identificar as diferentes situações do uso atual do solo. Para o processamento dos dados, foi utilizado o *software* de SIG IDRISI 3.2. A bacia foi subdividida em sete sub-bacias, cujas vazões foram calculadas pelo Método Racional e o tempo de concentração foi obtido pelo Método *Soil Conservation Service* (SCS). Com os resultados obtidos para um tempo de retorno de 25 anos, foi verificado que o aumento das vazões poderia ser de até 140%.

Magalhães *et al.* (2010) utilizaram o Método Racional para calcular a vazão máxima da microbacia do córrego Atalaia, em Macaé (RJ). A captura das imagens de satélite para identificação da cobertura do solo foi realizada com auxílio do *software* Google Earth Pro. Para o estudo dos dados fisiográficos da bacia utilizou-se o *software* ArcGIS 9.2, obtendo-se uma área de 296 ha. O coeficiente de escoamento foi obtido pela média ponderada das áreas com diferentes usos do solo. A intensidade da precipitação foi obtida pelo *software* Plúvio 2.1, e o tempo de concentração foi calculado pela equação de Kirpich. A vazão máxima calculada foi de 53,46 m<sup>3</sup>/s.

No trabalho de Massimino *et al.* (2010) foi apresentada uma relação entre a vazão do córrego Sem Nome, em Ilha Solteira (SP), e o processo erosivo decorrente do aumento da vazão do córrego devido à impermeabilização das áreas no entorno, consequência da implantação de novos loteamentos. Foi utilizado o *software* Google Earth para obtenção das imagens de satélite, juntamente com o programa AutoCAD Civil 3D para geoprocessamento de imagens. O coeficiente de escoamento foi calculado por média ponderada das áreas. A intensidade pluviométrica foi obtida a partir da equação de chuva intensa tipo *In In* do município de Andradina. Para o cálculo da vazão foi utilizado o Método Racional Modificado, que inclui um fator de correção calculado em relação à área de drenagem da bacia. O resultado encontrado foi uma vazão de 32,87 m<sup>3</sup>/s para um tempo de retorno de 50 anos, considerada elevada para as propriedades do solo na bacia do córrego e que estaria causando, portanto, a erosão referida.

Teixeira *et al.* (2011) estabeleceram uma comparação entre os métodos de estimativa de vazão máxima de projeto de McMath e I-Pai-Wu, considerando a vazão calculada pelo Método Racional como referência. A área de aplicação foi o trecho de uma estrada vicinal no município de Rio Grande (RS), dividido em oito subáreas contribuintes com vazão drenada por oito bueiros. Para estabelecer a intensidade da precipitação de



projeto foram utilizadas duas equações IDF obtidas pela desagregação de séries diárias de precipitação e pela equação dada pelo *software* Plúvio para a localidade. Para o período de retorno considerado de 50 anos, as vazões resultantes do Método I-Pai-Wu superaram as do Método Racional em 73%, enquanto as do Método de McMath superaram o método considerado padrão em cerca de 5%, mostrando-se como o método que melhor representou a vazão para o dimensionamento dos dispositivos de drenagem.

Miranda *et al.* (2005) apresentaram uma comparação entre o dimensionamento hidráulico de estruturas de drenagem de um trecho da rodovia RST-471, que liga Encruzilhada do Sul a Canguçu (RS), pelo Método Racional e pelo método do Hidrograma Unitário Sintético (HUS). A chuva de projeto foi obtida a partir da equação IDF tipo Eng. Otto Pfafstetter para a localidade de Encruzilhada do Sul. Outros parâmetros foram obtidos por meio de mapeamentos e da classificação pedológica da região, considerando um tempo de retorno de 10 anos e o tempo de concentração utilizado no projeto da rodovia calculado pela equação do SCS. As vazões calculadas pelo método do HUS foram consideravelmente menores que as do Método Racional, resultando, portanto, em custos menores de obra de drenagem. Contudo, os autores ressaltam que o uso do método mais econômico está condicionado à existência de uma série longa de dados de precipitação e de vazão, o que nem sempre é possível nos dimensionamentos.

Kelm *et al.* (2014) compararam o cálculo de vazões e a aplicação em projetos de drenagem pelo Método Racional e pelo método do Hidrograma Unitário Triangular, para o arroio Pinheirinho no município de Curitiba (PR). A área de estudo possui 3,92 km<sup>2</sup>, para a qual foi adotado um coeficiente de escoamento superficial igual a 0,60, de acordo com o uso do solo na região. O tempo de concentração foi calculado pela Equação de Kirpich e para determinação da intensidade máxima de precipitação foi utilizada a equação de chuva intensa de Curitiba, determinada por Fendrich (2003). Foram calculadas as vazões para tempos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos, com as vazões variando de 43,88 m<sup>3</sup>/s (TR de 5 anos) a 70,65 m<sup>3</sup>/s (TR de 100 anos) pelo Método Racional e com variação de 28,35 m<sup>3</sup>/s (TR de 5 anos) a 73,50 m<sup>3</sup>/s (TR de 100 anos) pelo Método do Hidrograma Unitário Triangular.

O estudo desenvolvido por Seibt *et al.* (2012) comparou vazões calculadas para bacias urbanas do município de Goiânia, pelo Método Racional e pelo método tempo-área. O cálculo foi realizado em três bacias: córrego Ruivinho (0,94 km<sup>2</sup>), córrego Mingau (2,45 km<sup>2</sup>) e córrego da Cruz (0,66 km<sup>2</sup>). Os tempos de concentração foram obtidos pela fórmula de Kerby, de Ven-Te-Chow e do U.S. Corps Engineers. A equação de chuva intensa utilizada foi proposta por Costa (1999). As vazões foram calculadas para coeficientes de escoamento superficial variando de 0,30 a 0,90 e períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25 e

50 anos. As vazões obtidas pelo Método Racional superaram as do método tempo-área em aproximadamente 8%.

Magalhães *et al.* (2011) simularam a vazão máxima na bacia de Rio Novo do Sul, na região sul do estado do Espírito Santo, com área igual a 256,94 ha, comparando o Método Racional e o modelo computacional HidroBacia. A equação de chuva intensa para a localidade foi obtida no programa Plúvio, e o coeficiente de escoamento superficial foi calculado pela média ponderada das áreas. O tempo de concentração foi calculado pela equação Kirpich e Picking, obtendo-se vazões máximas de 30,53 e 30,77 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, pelo Método Racional. Já pelo modelo HidroBacia, a vazão máxima calculada foi igual a 14,04 m<sup>3</sup>/s, com tempo de concentração igual a média dos tempos encontrados pelas fórmulas de Kirpich e Picking.

De forma geral, o Método Racional é utilizado quando está disponível uma grande quantidade de dados de chuva e poucos dados de vazão, o que ocorre com frequência devido à grande quantidade de postos meteorológicos em funcionamento. Ainda, os modelos mais complexos de estimativa de vazões, que consideram a variabilidade espacial e temporal do evento, requerem um levantamento exaustivo de dados, o que representa uma de suas maiores limitações quando comparados ao Método Racional.

## 4.4 Sistemas de Informação Geográfica

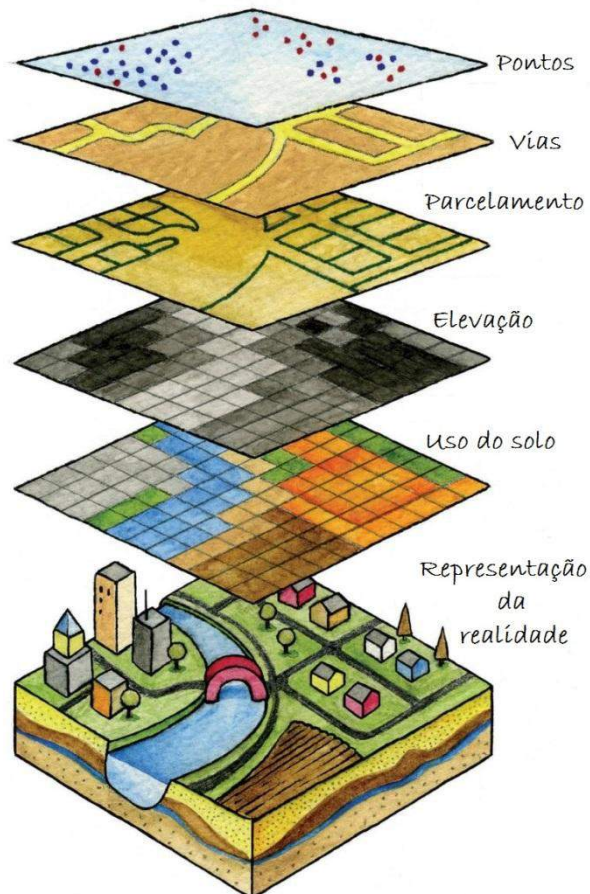
### 4.4.1 Conceituação

Enfrenta-se hoje uma grande complexidade de relações políticas, econômicas, sociais e ambientais e um crescente desafio de gerir tais conflitos. Diante de tal situação, busca-se o desenvolvimento de tecnologias para auxiliar o planejamento de ações, considerando que a produção, o acesso rápido e a capacidade de organização e análise da informação são condições fundamentais para a gestão em todos os setores. Assim, a capacidade de espacializar informações torna a tecnologia de geoprocessamento uma ferramenta fundamental no planejamento e gestão territorial. Tal tecnologia é constituída de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas, ou seja, que podem ser referenciadas por atributos espaciais (BRITTO *et al.*, 2011).

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um sistema utilizado para descrever e caracterizar espaços terrestres, com o objetivo de visualizar e analisar geograficamente informações referenciadas. O SIG é composto não somente pelo *software* em si, mas também pela aplicação de metodologias, coleta e análise de dados, *hardwares* específicos

como, por exemplo, *scanners* e coletores de dados GPS e também por recursos humanos (ESRI, 2010; MEDEIROS, 2012).

De acordo com Goodchild (1993), a tecnologia SIG permite a realização de várias tarefas, tais como: processamento de grandes quantidades de dados armazenados em locais adequados, análise e calibração de modelos, previsões e estimativas, pós-processamento de resultados e mapeamento dos dados. Assim, é possível armazenar localizações geográficas da superfície do globo em sistemas computacionais por meio de sistemas de coordenadas. O SIG permite a visualização simultânea de diferentes camadas de dados, bem como a análise e simulação de processos. Informações quantitativas podem ser relacionadas aos dados geográficos por meio do SIG, possibilitando a modelagem da realidade de forma mais aproximada (Figura 4.9).



**Figura 4.9** – Visualização simultânea das diferentes camadas de dados no SIG (adaptado de CAMPBELL; SHIN, 2012)

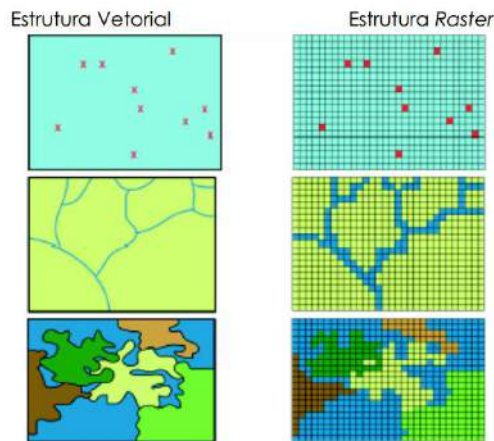
De forma geral, a estrutura de um SIG apresenta os seguintes componentes:

- Interface com o usuário, entrada e integração de dados;
- Funções de processamento gráfico e de imagens;

- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados.

A interação entre o usuário e o sistema pode ser por meio de uma interface gráfica ou por linguagem de comandos, na qual o usuário determina uma sequência de operações a ser executada (CÂMARA NETO, 1995).

Existem dois tipos de estrutura de dados gráficos no SIG: estrutura vetorial e estrutura *raster* (Figura 4.10). Na estrutura vetorial, os objetos são representados por pontos, linhas e polígonos, e a posição de cada objeto é definida para um sistema de coordenadas. Na estrutura *raster*, o espaço é dividido em células, e a posição geográfica do objeto é definida em linhas e colunas (ARONOFF, 1995; BURROUGH; MCDONNELL, 1998).



**Figura 4.10** – Representação das estruturas vetorial e *raster* (COELHO, 2006)

#### 4.4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

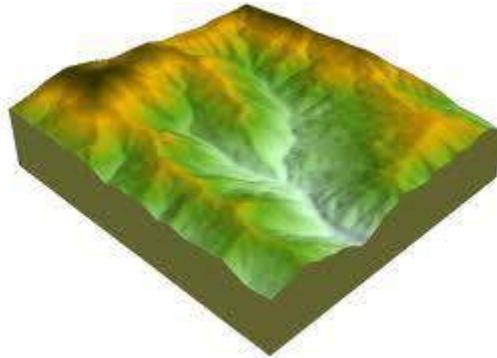
Primeiramente, é importante diferenciar os termos Modelos Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE refere-se a uma elevação dada pela distância vertical entre um *datum* de referência e a elevação absoluta dos pontos do terreno. Já o MDT é um termo mais genérico, pois enquanto o MDE contém apenas altimetria, o MDT pode conter outras feições, tais como rios e linhas de cume (ANDRADE, 1998).

O termo MDT foi definido por Miller e Laflamme (1958) como uma "simples representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados, com coordenadas x, y e z conhecidas, num sistema de coordenadas arbitrário".

Segundo Burrough (1986), o MDT é uma representação digital das variações da superfície terrestre. Mendes e Cirilo (2001) definem o MDT como um *grid* (matriz) de

números que representam a distribuição geográfica de elevação do terreno em relação ao nível médio dos mares.

Para aplicações de modelos hidrológicos, utiliza-se o MDE (Figura 4.11), uma vez que atributos hidrológicos geralmente são derivados da altimetria. De acordo com Quinn *et al.* (1995), o MDE é normalmente o primeiro dado a ser considerado para a realização da modelagem hidrológica. A partir do MDE são extraídos vários atributos hidrológicos, como declividade, índice topográfico, direções de fluxo, redes de drenagem entre outros.



**Figura 4.11** – Visualização 3D de um MDE (OBSERVASC, 2012)

O MDE pode ser considerado como um PI que é essencial para a maioria das análises espaciais em SIG, porque serve como base para elaboração de outros PIs e modelagens, possibilitando a extração rápida de perfis topográficos em diferentes direções, cálculos planimétricos, visualização tridimensional e realização de sobrevoos virtuais sobre a área de estudo (AUGUSTO FILHO, 2011).

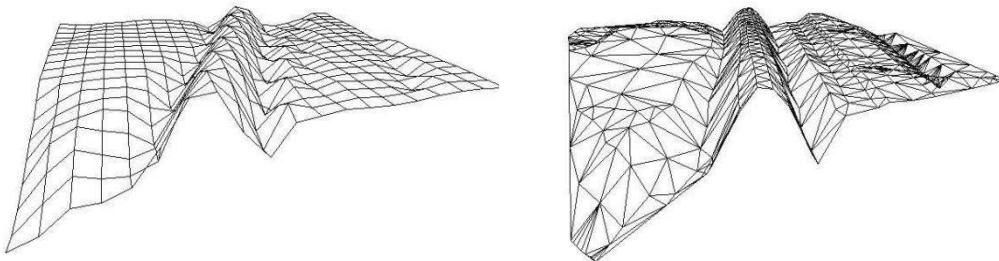
A criação de um MDE inicia-se com a captura de um conjunto de dados relacionados à altitude. Tais pontos, derivados da coleta de dados por levantamentos topográficos, fotogramétricos ou de mapas topográficos, são utilizados como base de dados de entrada para uma rotina de interpolação, que aproximará a amostra pontual à superfície original.

De acordo com Augusto Filho (2011), a declividade, a direção e a curvatura das vertentes, que influenciam diretamente na classificação dos terrenos como concentradores ou dispersores de fluxo, destacam-se como os principais PIs derivados diretamente do MDE. Assim, no ambiente de trabalho SIG, é fundamental ter um controle da qualidade do MDE elaborado, pois os erros podem ser propagados para os PIs e modelagens espaciais subsequentes.

Ainda, segundo o mesmo autor, os métodos de interpolação para a obtenção de um MDE podem ser agrupados em determinísticos e geoestatísticos. Os determinísticos apresentam valores para determinadas localizações com base nos valores medidos na

vizinhança, bem como fórmulas específicas para determinação da suavidade da superfície resultante. Entre os métodos determinísticos geralmente disponíveis nas tecnologias SIG estão: inverso ponderado da distância, vizinho natural, tendência e *spline*. Já os métodos geoestatísticos tem base em modelos estatísticos que utilizam autocorrelação, ou seja, uma relação estatística entre pontos medidos. Portanto, tais métodos tem a capacidade de gerar uma superfície de previsão e fornecer medidas da precisão das previsões. Como por exemplo, cita-se o método de *Krigagem*.

O processo de interpolação resulta tipicamente da estrutura de dados do MDE, que pode ser uma malha retangular, também denominada matriz de altitudes (formato *raster*), ou uma malha irregular subdividida em triângulos: TIN (*Triangulated Irregular Network*), conforme Figura 4.12 abaixo:



**Figura 4.12** – MDE com malha retangular (*raster*) e com malha triangular (TIN) (adaptado de BROSTUEN; COX, 2000)

A malha retangular fornece uma estrutura de dados elementar, a partir da qual os dados são interpolados para criar uma malha espaçada igualmente. As estruturas do tipo TIN baseiam-se em elementos triangulares nas quais os vértices são pontos de altitude conhecidas, e são derivadas por interpolações que assumem que a superfície entre três pontos é um plano. Contudo, a estrutura TIN é mais complexa que a malha retangular, e adapta-se para a modelagem de superfícies irregulares e manipulações de variações na densidade dos pontos amostrais.

O método de interpolação *Topo to raster*, disponível nas ferramentas de análise espacial do programa ArcGIS, que gera MDEs no formato *raster*, foi estruturado especificamente para a criação de MDEs hidrologicamente corretos. A ferramenta utiliza como dados de entrada as curvas de níveis, pontos cotados e linhas de drenagem, e os parâmetros que controlam o modelo de interpolação podem ser definidos individualmente ou por meio de um arquivo de texto. Em teoria, quanto menor for a malha de interpolação, os resultados tenderão a ser mais precisos (AUGUSTO FILHO, 2011).

#### 4.4.3 Modelos hidrológicos em SIG

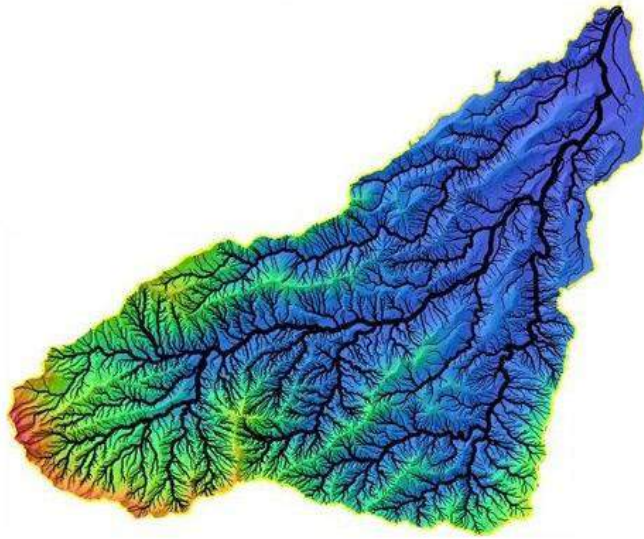
De acordo com Tucci (1998), a modelagem hidrológica é uma das ferramentas desenvolvidas pela ciência para melhor compreender e representar o comportamento da bacia e prever condições diferentes das observadas.

Assim, é importante definir os conceitos de sistemas e modelos para o entendimento da modelagem hidrológica. Segundo Dooge (1973, *apud* Tucci, 1998), um sistema pode ser definido como "qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência está inter-relacionado com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação".

Resumidamente, um sistema é qualquer engenho que forneça uma resposta a uma entrada com uma saída. Cada sistema possui suas próprias características e pode, portanto, ser dividido em subsistemas onde determinadas características são mais homogêneas. Por exemplo, uma bacia funciona como um sistema que, acionado por uma entrada, no caso a precipitação, pelos diversos processos do ciclo hidrológico, transforma a precipitação em vazão, que representa a saída. Já o modelo é a representação do comportamento do sistema, numa forma de fácil acesso, com o objetivo de compreendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas.

Os modelos hidrológicos dependem do MDE e de outros dados georreferenciados, como por exemplo, uso e cobertura do solo e dados meteorológicos. Tais dados são fornecidos por diferentes agências e instituições públicas, e geralmente estão em diferentes sistemas de coordenadas e escalas e, portanto, requerem alguns processamentos antes de serem utilizados na modelagem hidrológica. Para tanto, é utilizado o SIG, que apresenta ferramentas que possibilitam análises e simulações específicas para os processos hidrológicos.

Normalmente, o primeiro processamento realizado em um MDE é a obtenção automática da rede de drenagem (Figura 4.13). As redes de drenagem são sistemas naturais ou artificiais constituídos de canais conectados entre si e capazes de drenar água superficial.

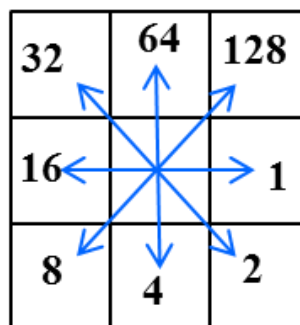


**Figura 4.13** – Exemplo de rede de drenagem extraída do MDE (COSTA; FONSECA, 2008)

O primeiro algoritmo de obtenção de redes de drenagem foi proposto por O'Callaghan e Mark (1984), e consiste em três principais passos:

- 1º Definir as direções de fluxo para cada célula do MDE;
- 2º Calcular a área de contribuição para cada célula;
- 3º Com base em uma entrada de área de contribuição, extrair a rede de drenagem.

No primeiro passo, cada célula deve drenar água para uma das oito células vizinhas: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste (Figura 4.14). O algoritmo é, portanto, denominado D8 (JENSON; DOMINGUE, 1988). No SIG, cada uma das possíveis direções é representada por um número no *raster* de direção de fluxo. Por exemplo, se numa célula a água escoar na direção leste, então é atribuído a essa célula o valor 1.



**Figura 4.14** – Oito possíveis direções de fluxo (adaptado de JENSON; DOMINGUE, 1988)



Cada célula deve ter somente uma direção de fluxo (caminho único). Para tanto, é necessário calcular a declividade entre a célula e a vizinhança. A direção é definida para a célula vizinha que possui a maior declividade. O resultado é uma matriz com as mesmas dimensões do MDE, denominada matriz de direções de fluxo. Cada célula da matriz tem um código correspondente à direção do fluxo (números 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128, para leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste, noroeste, norte e nordeste, respectivamente).

Em algumas células, pode não ser possível determinar a direção de fluxo, como em áreas planas onde a altimetria das células vizinhas são todas iguais, ou em locais que a altimetria da célula é menor que a altimetria da vizinhança. As células que não contêm nenhuma direção de fluxo são denominadas *sinks* ou depressões.

As depressões localizadas nas bordas do MDE não acarretam problemas para a modelagem hidrológica. Já as depressões internas devem ser corrigidas para que seja possível produzir um MDE hidrológicamente coerente. Para tanto, é necessário que um número mínimo de células seja alterado, pois quanto menos alterações houver no MDE original, mais características hidrológicas são preservadas.

Duas abordagens comumente utilizadas para correção de depressões do MDE são o preenchimento (JENSON; DOMINGUE, 1988) e cavar (JONES, 2002). Na técnica de preenchimento, a altimetria da depressão é elevada até que a célula não seja mais uma depressão e possa obter uma direção de fluxo definida. Na técnica de cavar é "cavado" um caminho da depressão até uma célula que possua a altimetria menor que a depressão, denominada então célula de saída.

Em ambas as abordagens, o produto final é a matriz de direções de fluxo sem depressões e, portanto, um MDE hidrológicamente coerente. A princípio, a técnica de preenchimento altera uma menor quantidade de células do MDE. Porém, ao corrigir uma depressão, a célula vizinha pode se tornar outra depressão, devendo também ser corrigida. Tal procedimento pode alterar muitas células do MDE, removendo feições e características que podem ser importantes para o estudo hidrológico. Por outro lado, a técnica de cavar pode ser mais complexa computacionalmente, devido ao algoritmo para encontrar a célula de saída. Portanto, a utilização de uma ferramenta que combine as duas técnicas pode ser mais eficiente.

Após a definição das direções de fluxo, é necessário calcular a área de contribuição de cada célula. A área de contribuição de uma célula é toda a área que drena para aquela célula, ou seja, é o número de células que seguem a direção de fluxo chegando até a célula respectiva do cálculo da área de contribuição. O resultado é uma matriz com as mesmas dimensões do MDE, chamada matriz de área de contribuição. A área de contribuição também pode ser calculada em unidades de área, por exemplo, km<sup>2</sup>. Para tanto, basta

somar a área das células drenadas até onde está sendo calculada a área de contribuição. A Figura 4.15 mostra o cálculo da área de contribuição em número de células.

1	1	1	1
1	4	3	1
1	9	1	1
1	14	17	20
1	1	1	1

**Figura 4.15** – Cálculo das áreas de contribuição

O último passo para obter a rede de drenagem é definir um limiar da área de contribuição. Assim, toda célula da matriz da área de contribuição que for superior ao limiar é considerado como parte da rede de drenagem. Como mostra o exemplo da Figura 4.16, as células com área de contribuição maiores que 5 foram marcadas como pertencentes à rede de drenagem.

1	1	1	1
1	4	3	1
1	9	1	1
1	14	17	20
1	1	1	1

**Figura 4.16** – Extração da rede de drenagem

As três etapas básicas supracitadas são comuns para os modelos hidrológicos: definir a direção de fluxo, calcular a área de contribuição e extrair a rede de drenagem. A partir de então, os processamentos do MDE são realizados de acordo a discretização da área da bacia. Uso do solo, vegetação e outras características são agrupados em unidades de resposta hidrológica que são atribuídas às células dos modelos.

#### 4.4.4 Usos dos modelos hidrológicos

Segundo Tucci (1998), os principais usos dos modelos hidrológicos são:

- Melhor compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia: o detalhamento do modelo permite a separação dos fenômenos e, portanto, torna possível o estudo da sensibilidade das variações para bacias com diferentes características.
- Análise de consistência e preenchimento de falhas: geralmente, as séries de precipitação são mais longas do que as de vazão, devido à facilidade de operação e custo. Portanto é possível ajustar a extensão da série de vazão com base na precipitação e verificar alterações na bacia.
- Previsão de vazão em tempo atual: diversas atividades, tais como o controle de cheias, operação de obras hidráulicas, entre outros, dependem do conhecimento antecipado da ocorrência da vazão. As estimativas de vazões podem ser obtidas com base no histórico de precipitações, na vazão de um posto a montante ou na combinação de ambos.
- Dimensionamento e previsão de cenários: é possível estimar a vazão resultante conhecendo a precipitação e o risco de ocorrência, o que pode ser de grande utilidade para cenários de uso e modificações da bacia. As estimativas podem ser utilizadas para dimensionamentos e em planejamentos.

Diversos trabalhos abordam o uso de modelos hidrológicos em ambiente SIG, com aplicação voltada para obras lineares, conforme apresentado a seguir.

Augusto Filho *et al.* (2010) apresentaram um sistema de suporte a decisões para gestão de risco de corrosão de oleodutos utilizando SIG (*software* ArcGIS), no qual foram definidos setores de análise de risco, considerando as bacias atravessadas pelo oleoduto OSBRA (São Paulo – Brasília), no trecho de São Simão a Ribeirão Preto, e a posição topográfica relativa do oleoduto. Tais setores refletem o comportamento dos fluxos de água superficial e subterrâneo, que controlam o desencadeamento e a dinâmica dos principais eventos de risco geológico-geotécnico, bem como o comportamento de eventuais vazamentos de óleo (volume, fluxo de direção preferencial e raio de alcance). Para estimar o processo de corrosão dos oleodutos, foram considerados o potencial corrosivo do solo, por meio de medidas de pH e eH de amostras coletadas ao longo do oleoduto, e a profundidade do lençol freático, que possui impacto direto no processo de corrosão do duto.

Pincinato e Riedel (2005) analisaram trechos dos oleodutos OSPLAN (Planalto), OSBAT (São Sebastião – Cubatão) e OSVAT (São Sebastião – Vale do Paraíba), que atravessam a região montanhosa da Serra do Mar no litoral norte do Estado de São Paulo.

Tal região é caracterizada como uma das localidades mais úmidas do Brasil, além de possuir um regime pluviométrico com episódios pluviais intensos no verão, que acentuam os processos relacionados à rede de drenagem superficial e subsuperficial, propiciando a alteração das rochas e o deslocamento das formações superficiais, que conforme a declividade pode provocar movimentos gravitacionais de massa. A avaliação de risco empregada no trabalho relaciona-se com a possibilidade de um processo gravitacional de massa causar um acidente no oleoduto. Foram obtidos mapas de cobertura da terra, declividade, geomorfologia e de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa, por meio do tratamento de informações espaciais com o *software* Spring. A síntese das informações gerou o mapa de risco de movimentos gravitacionais de massa aos dutos.

Gramani *et al.* (2005) apresentaram os resultados da análise de susceptibilidade a corridas de massa na região atravessada pelo duto OSBAT, no trecho entre Cubatão e São Sebastião, que fundamentou-se em parâmetros geológico-geotécnicos que controlam a deflagração de corridas de massa e em fórmulas hidráulicas empíricas de vazão de pico. Foram selecionadas oito bacias que apresentaram predisposição para ocorrência de corridas de massa que poderiam atingir o duto. Foram realizadas análises quantitativas e qualitativas apoiadas em modelagens realizadas em ambiente SIG (*software* ArcGIS). Para as análises quantitativas, foi realizada uma abordagem por meio de fórmulas hidráulicas empíricas para o cálculo das vazões máximas e uma abordagem geológico-geotécnica que considerou a porcentagem de áreas da bacia com declividade superior a 30° como fator condicionante do processo de corridas de massa. A análise qualitativa considerou fatores geomorfológicos, geológicos, climatológicos (pluviometria) e fatores advindos da atividade antrópica.

Ferraz *et al.* (2007) avaliaram indicadores hidrológicos de escoamento superficial em trechos de estradas florestais para fins de identificação de pontos críticos de erosão e acúmulo de água no solo. Para tanto, a malha viária de uma fazenda produtora de madeira foi dividida em 252 trechos de estradas, para os quais foram calculados quatro indicadores hidrológicos: declividade média do terreno, declividade da rampa, fator LS e índice topográfico. A modelagem foi desenvolvida em ambiente SIG (*software* ArcGIS), onde foi organizada uma base cartográfica, separados os trechos de estradas e calculados os indicadores hidrológicos. A partir dos indicadores foram realizadas análises estatísticas para identificar trechos com valores extremos, nos quais poderiam estar ocorrendo problemas hidrológicos. O estudo demonstrou a viabilidade da utilização dos indicadores hidrológicos baseados nas características topográficas para classificação dos trechos de estradas que influenciam os processos erosivos e de acúmulo de água no solo.

Pupim *et al.* (2007) apresentaram uma ferramenta para o planejamento e tomada de decisões de estudos de traçado de obras lineares, com o objetivo de reduzir os custos

totais de implantação e a manutenção das mesmas. No caso estudado, foi gerado um mapa de Potencial Natural de Erodibilidade (PNE), numa faixa do gasoduto Bolívia-Brasil inserida na quadrícula de São Carlos, na região centro-oeste do Estado de São Paulo. A relação observada entre as áreas mais apropriadas e a implantação efetiva da obra foi bastante satisfatória, exceto em alguns casos nos quais possíveis desvios seriam financeiramente inviáveis.

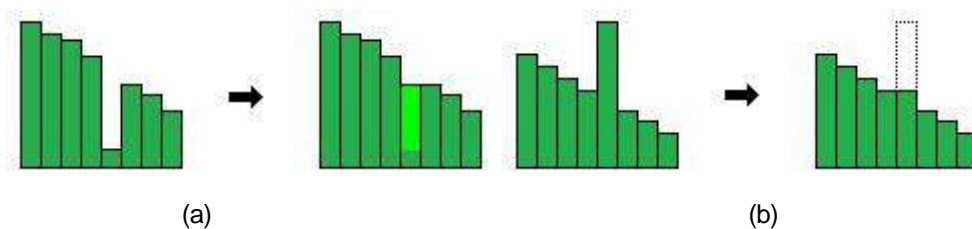
#### 4.4.5 Ferramentas hidrológicas em SIG

No programa ArcGIS, as ferramentas de análise de modelos de escoamento superficial estão agrupadas como ferramentas hidrológicas de análise do meio e são utilizadas para modelar o fluxo de água na superfície. A descrição das ferramentas é apresentada a seguir.

##### 4.4.5.1 Fill

Depressões e picos são erros frequentes devido à resolução dos dados de entrada para geração do MDE. As depressões devem ser preenchidas para assegurar a delimitação apropriada de bacias e canais. Se as depressões não forem preenchidas, o sistema de drenagem resultante pode ser descontínuo.

A ferramenta realiza iterações até que todas as depressões, dentro de um determinado limite  $Z$  especificado, sejam preenchidas (Figura 4.17). Conforme ocorre o preenchimento, outras depressões podem ser criadas nas fronteiras das áreas preenchidas, que serão removidas na próxima iteração.



**Figura 4.17** – (a) Perfil de uma depressão antes e depois da utilização da ferramenta *Fill*. (b) Perfil de um pico antes e depois da utilização da ferramenta *Fill* (ESRI, 2010)

#### 4.4.5.2 Flow direction

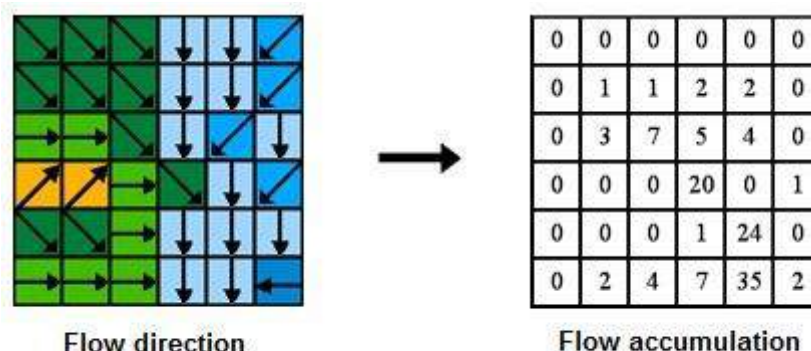
Um dos procedimentos para derivar características hidrológicas de uma superfície é a determinação da direção de fluxo de cada célula do *raster* (Figura 4.18). A ferramenta *Flow direction* utiliza uma superfície (MDE) como entrada e retorna um *raster* mostrando a direção de fluxo de cada célula. Para tanto, o programa utiliza o algoritmo D8, que considera que a água presente na célula pode fluir para uma das oito células vizinhas, ou seja, uma das oito direções possíveis. A direção é determinada de acordo com a elevação da célula em relação às células vizinhas, fluindo para a célula cuja diferença de elevação é maior, *i.e.*, a encosta mais íngreme.

#### 4.4.5.3 Flow accumulation

A ferramenta *Flow accumulation* cria a rede de drenagem de uma bacia pela determinação de locais de acumulação de fluxo d'água. Pode ser entendida como o número de células que fluem para dentro de cada célula (Figura 4.18). Pode-se aplicar um valor limite para os resultados da função *Flow direction*, e a rede de drenagem pode ser delineada utilizando o *Map Algebra*. Para tanto, é necessário inserir uma expressão na ferramenta *Map Algebra*. Por exemplo, se a área de contribuição mínima desejada for equivalente à área de 100 células, a expressão a ser inserida é:

$$\text{Streamnet} = \text{Con}(\text{floacc} > 100, 1) \text{ ou } \text{Streamnet} = \text{Setnull}(\text{floacc} < 100, 1)$$

Para ambos os casos, todas as células com mais de 100 células fluindo para dentro dela são marcadas com o número 1, e constituirão o sistema de drenagem, enquanto todas as outras células são omitidas.



**Figura 4.18** – Estrutura das ferramentas *Flow Direction* e *Flow Accumulation* (ESRI, 2010)

#### 4.4.5.4 Sink

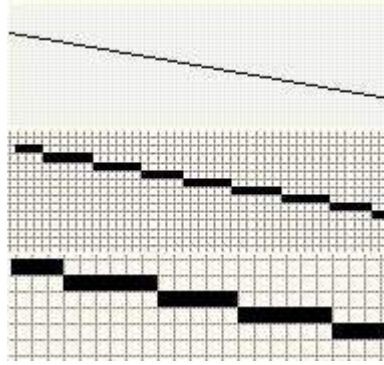
No MDE, pode haver uma célula ou um conjunto de células espacialmente conectadas cuja direção de fluxo não pode ser atribuída a um dos oito valores válidos num *raster* de direção de fluxo. Isso ocorre quando todas as células vizinhas tem valores de altimetria mais elevados que a célula de processamento ou quando duas células fluem uma para dentro da outra, criando um *loop* entre si. A ferramenta *Sink* cria uma malha identificando todas as depressões ou áreas de drenagem interna.

#### 4.4.5.5 Stream order

A ferramenta *Stream order* determina uma ordem numérica para os segmentos do *raster* que representa os canais de drenagem. A ordenação numérica dos canais de fluxo é um procedimento no qual é atribuída uma ordem numérica para as ligações de uma rede de fluxo. Tal ordem permite identificar e classificar os tipos de fluxo com base no número de afluentes. A ferramenta permite escolher entre os métodos propostos por Strahler (1957) ou Shreve (1966).

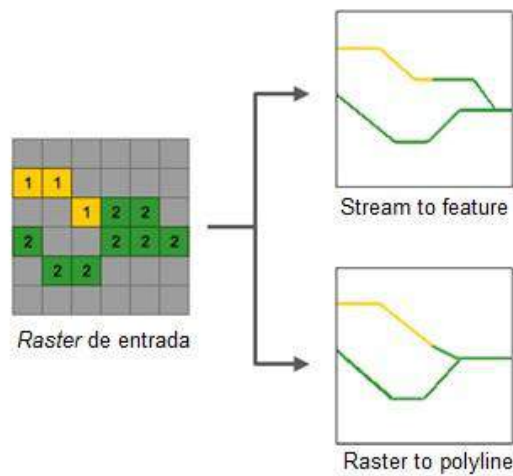
#### 4.4.5.6 Stream to feature

A ferramenta *Stream to feature* permite converter uma rede de drenagem da forma *raster* para a forma vetorial. O algoritmo utilizado pela ferramenta é projetado para vetorização de redes ou qualquer outro *raster* representando uma rede linear cuja direção é conhecida. A vetorização correta é muito importante, pois dados vetoriais são mais adequados para representar redes de drenagem e outras feições lineares conectadas, já que o modelo vetorial permite que os dados sejam relacionados diretamente por meio da visualização numa mesma superfície. Já o modelo matricial necessita de uma análise mais complexa inferida no banco de dados, além de que o formato *raster* geralmente apresenta o "efeito escada" quando representa feições discretas (Figura 4.19).



**Figura 4.19** – Aproximação gradual de uma linha no formato *raster* evidenciando o “efeito escada” (adaptado de SILVA, 2010)

Para tanto, a ferramenta utiliza o *raster* de direção de fluxo para ajudar na vetorização de interseções e células adjacentes. É possível que duas feições adjacentes com o mesmo valor sejam vetorizadas como duas linhas paralelas. Comparando com a ferramenta *Stream To Feature* com *Raster To Polyline*, a segunda é geralmente mais agressiva na junção de linhas, como pode ser observado na Figura 4.20.



**Figura 4.20** – Comparação entre métodos de vetorização de redes de fluxo (ESRI, 2010)

#### 4.4.5.7 Watershed

A ferramenta *Watershed* delimita bacias de drenagem para uma determinada região específica (Figura 4.21). A região é definida a partir de pontos de exutório que devem ser inseridos em locais de interesse. Para determinação da área de contribuição, primeiramente deve ser criado um *raster* representando a direção de fluxo com a ferramenta *Flow Direction*. Em seguida, é necessário fornecer os locais (pontos de exutório) para os quais se deseja determinar a área de captação.

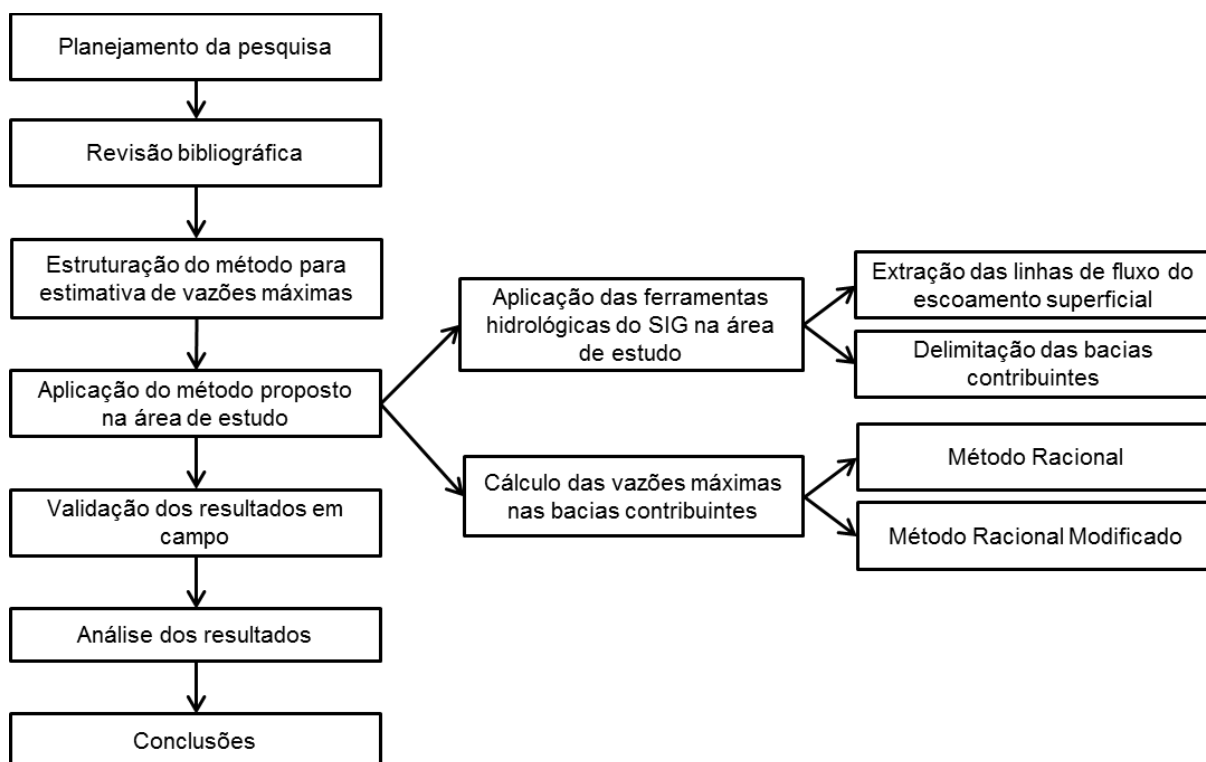




**Figura 4.21** – Ferramenta *Watershed*: delimitação de bacias de drenagem (ESRI, 2010)

## 5 MÉTODO E ETAPAS DE PESQUISA

O método adotado na presente pesquisa consiste nas etapas apresentadas no fluxograma abaixo (Figura 5.1) e descritas a seguir.



**Figura 5.1** – Fluxograma das etapas de pesquisa

- a) Planejamento da pesquisa: nesta etapa foram estabelecidos os objetivos da pesquisa, bem como foi realizado o delineamento das atividades a serem desenvolvidas, juntamente com estudos preliminares dos principais assuntos relacionados à proposta inicial, além de decisões a respeito da área de estudo, ambiente de desenvolvimento entre outros.
- b) Revisão bibliográfica: foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais temas técnico-científicos relacionados ao estudo, com a finalidade de prover embasamento teórico para aplicação do método, com ênfase nos estudos de hidrologia superficial, modelos hidrológicos em SIG e estimativa de vazões pelo Método Racional e pelo Método Racional Modificado.
- c) Estruturação do método para estimativa de vazões máximas: foi estruturada uma sequência de etapas para a estimativa das vazões máximas nas interseções das obras civis lineares com as linhas de drenagem, integrando as

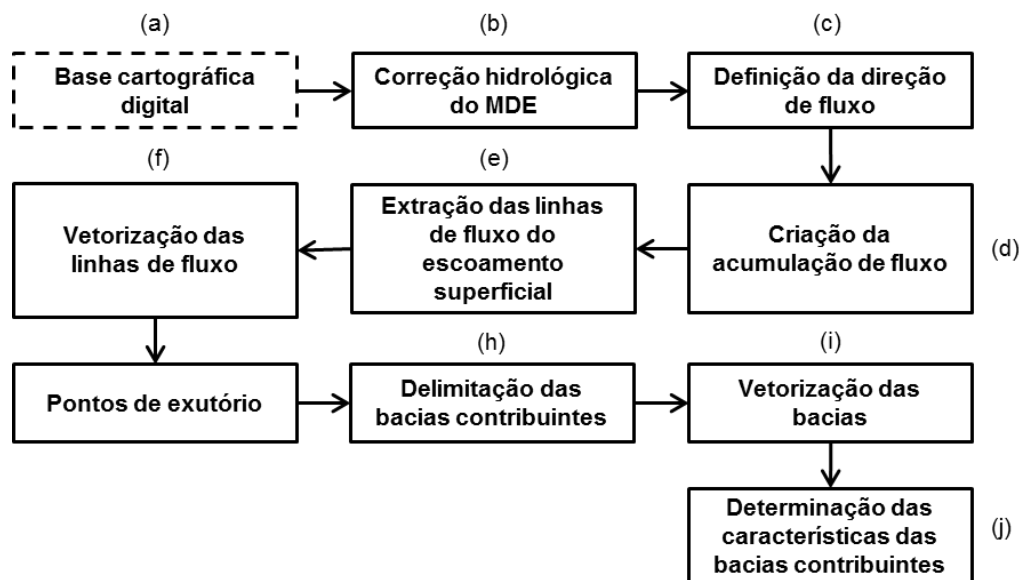
ferramentas hidrológicas de análise espacial do SIG e métodos usuais de cálculo de vazões de cheia. Os modelos hidrológicos em SIG permitiram a extração das linhas de fluxo do escoamento superficial e a delimitação das respectivas bacias contribuintes, a partir da definição de uma área mínima de contribuição. Outras ferramentas de análise espacial do SIG possibilitaram a obtenção dos pontos de interseção dos canais de drenagem com o traçado da obra civil linear, e de outros parâmetros fundamentais para o cálculo das vazões máximas (declividade do talvegue, área da bacia, ponderação dos coeficientes de escoamento etc.). O cálculo das vazões máximas foi realizado pelo Método Racional e pelo Método Racional Modificado, para períodos de retorno de 10 e 50 anos, definidos de acordo com os critérios do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2005).

- d) Aplicação do método proposto na área de estudo: a partir da base cartográfica digital de um trecho do oleoduto OSBRA previamente elaborada (AUGUSTO FILHO, 2008), foram executadas as etapas do procedimento proposto utilizando o programa ArcGIS 9.3 e planilhas de cálculo (Excel).
- e) Validação dos resultados em campo: após a obtenção dos resultados, foi realizada uma visita na área de estudo para verificar se o modelo representava satisfatoriamente o comportamento do escoamento superficial, observando se as bacias de contribuição foram delineadas coerentemente, além de relacionar as vazões calculadas com o risco de processos erosivos considerando as características do solo no local.
- f) Análise dos resultados: os principais resultados obtidos nas etapas anteriores foram analisados, visando à consolidação do método proposto e a adequabilidade do mesmo para aplicação em outros tipos de obras civis lineares e áreas com diferentes características ambientais.
- g) Conclusões: proposição de conclusões com base nos resultados obtidos na pesquisa, destacando as vantagens e limitações do método proposto para estimativa das vazões máximas nas travessias de drenagens em obras civis lineares.

As etapas do método proposto para estimar as vazões máximas de escoamento superficial nas interseções das linhas de fluxo do escoamento superficial com a obra civil linear podem ser subdivididas em duas fases: a primeira fase refere-se ao procedimento adotado para modelagem hidrológica em ambiente SIG, e a segunda fase consiste nos cálculos das vazões máximas em planilhas. Ambas as fases e suas respectivas subetapas estão detalhadas a seguir.

## 5.1 Modelagem hidrológica em SIG

Nesta fase foram realizados todos os procedimentos em ambiente SIG, com as ferramentas disponíveis no programa ArcGIS 9.3. As etapas são apresentadas no fluxograma abaixo (Figura 5.2).



**Figura 5.2** – Fluxograma das etapas da fase de modelagem hidrológica em SIG

### a) Base cartográfica digital

Todos os PIs da pesquisa foram obtidos a partir da base cartográfica digital elaborada por Augusto Filho (2008) a partir de folhas topográficas na escala 1:10.000 do Instituto Geográfico do Estado de São Paulo (IGC) e de fotografias digitais aéreas na escala 1:5.000.

Para tanto, adotou-se o sistema de Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), de coordenadas plano-retangulares métricas, *datum* Córrego Alegre, fuso 23°, correspondente ao sistema das folhas topográficas originais. As folhas foram digitalizadas em *scanner* com resolução de 300 *dpi* no formato *bmp*, georreferenciadas em coordenadas geográficas no ArcMap 9.1, que posteriormente foram convertidas em coordenadas UTM. Foi realizada a vetorização de curvas de nível, pontos cotados, drenagens, espelhos d'água, rodovias e linhas de transmissão.

As fotografias digitais aéreas consistem em 20 fotos coloridas no formato digital *TIFF* com resolução de 900 *dpi*, obtidas em voos realizados no ano de 2000 a 2003 pela empresa BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A.

O MDE da área de estudo foi desenvolvido por Augusto Filho (2008), a partir da ferramenta *Topo to raster* do módulo *Spatial Analyst* do ArcGIS. Como dados de entrada, foram utilizadas as curvas de nível, os pontos cotados e as linhas de drenagem, digitalizados a partir das folhas topográficas. A malha utilizada na interpolação (*grid*) possui 4 m, correspondente a um valor 20% inferior ao erro cartográfico admissível (0,5 mm na escala da base topográfica 1:10.000).

Outros dois PIs necessários foram os polígonos que delimitam os materiais inconsolidados e o uso e ocupação do solo da área de estudo. Ambos foram utilizados para a determinação do coeficiente de escoamento superficial no cálculo das vazões.

O *shapefile* que contém os polígonos de materiais inconsolidados foi gerado por Augusto Filho (2008), a partir do mapa geológico da área apresentado por Ferreira (1999), na escala 1:50.000.

O *shapefile* com os polígonos de uso e ocupação do solo foi desenvolvido por Augusto Filho (2008) e complementado e atualizado por Gimenes (2013). Para identificação dos diferentes usos do solo foram utilizadas fotos aéreas digitais coloridas de 2003, que posteriormente foram atualizadas com imagens de satélite obtidas no programa Google Earth (imagens Cnes/Spot de 2010 e 2011). Ainda, foi realizada uma vistoria de campo para verificação do uso e ocupação do solo atual.

#### b) Correção hidrológica do MDE

A correção hidrológica do MDE refere-se ao procedimento para remover as depressões e preencher os picos do modelo, com a finalidade de eliminar células com direção de fluxo indefinida, que resultam em incoerências no modelo hidrológico. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Fill*, do conjunto *Hidrology*, dentro da caixa de ferramentas *Spatial Analyst*.

Para executar a ferramenta, foi selecionado o *raster* do MDE a ser corrigido como superfície de entrada e escolhido o local para salvar a superfície de saída e o respectivo nome do arquivo.

A correção hidrológica difere-se da validação do MDE, que já havia sido realizada por Augusto Filho (2008). O procedimento utilizado para validar o modelo foi a interpolação de curvas de nível a partir do MDE produzido e a posterior comparação visual com as curvas de nível originais vetorizadas a partir das folhas topográficas. Também foi estabelecida uma malha de pontos de amostragem, da qual foram extraídos os valores de cota interpolados no MDE para o cálculo do erro médio quadrático.

c) Definição da direção de fluxo

A direção de fluxo de cada célula foi obtida com a ferramenta *Flow Direction*, do conjunto *Hidrology* da caixa de ferramentas *Spatial Analyst*. A ferramenta utilizou o *raster* do MDE corrigido como entrada, e forneceu um *raster* com a direção de fluxo de cada célula como saída.

d) Criação da acumulação de fluxo

Após a definição da direção do fluxo, foi utilizada a ferramenta *Flow Accumulation* para criar a acumulação de fluxo. Como dado de entrada, foi utilizado o *raster* de direção de fluxo. Para o tipo de dados do *raster* de saída, foi selecionado o tipo *Float*. O *raster* de saída apresentou o fluxo acumulado que foi utilizado para a extração da rede de drenagem, a partir da definição de um limiar, ou seja, uma área de contribuição mínima a partir da qual foram formadas as linhas de fluxo.

e) Extração das linhas de fluxo do escoamento superficial

O *raster* de acumulação de fluxo foi utilizado para extrair as linhas de fluxo do escoamento superficial, utilizando a ferramenta *Raster Calculator*, inserida no conjunto *Map Algebra* na caixa de ferramentas *Spatial Analyst Tools*.

Para extrair as linhas de fluxo do *raster* de fluxo acumulado, denominado *Flowacc*, primeiramente foi necessário determinar a área de contribuição a partir da qual o fluxo acumulado constitui o escoamento superficial. Tal área de captação mínima corresponde a um determinado número de células (limiar), de acordo com o *grid* do MDE.

Em seguida, foi necessário elaborar a expressão algébrica para determinar que todas as células com área de contribuição menor que o limiar recebessem valor nulo, enquanto as células com área de contribuição superior ao limiar recebessem valor unitário, delineando as linhas de fluxo no *raster* calculado.

Assim, a expressão inserida na ferramenta *Raster Calculator* foi uma operação condicional com o comando *Con*, que atribuiu valor unitário para as células com área de contribuição superior ao limiar, pela seguinte expressão:

$$\text{Con} ("Flowacc" > \text{limiar}, 1)$$

Também poderia ter sido inserida uma operação condicional com o comando *SetNull*, que atribuiu valor nulo para as células com área de contribuição inferior ao limiar, pela expressão abaixo:

$$\text{SetNull} ("Flowacc" < \text{limiar}, 1)$$

Assim, foi criado o *raster* que representa as linhas de fluxo do escoamento superficial, que neste caso foram definidas como as células cuja área de contribuição acumulada é superior ao limiar. Como o arquivo de saída foi em formato *raster*, foi necessário convertê-lo para o formato vetorial (linhas), conforme apresentado a seguir.

f) Vetorização das linhas de fluxo

Para a vetorização das linhas de fluxo do escoamento superficial, foi utilizada a ferramenta *Stream to feature* do conjunto *Hidrology* da caixa de ferramentas *Spatial Analyst*, que converteu o *raster* das linhas de fluxo em um *shapefile*. Para a vetorização, a ferramenta utilizou como dados de entrada o *raster* das linhas de fluxo e o *raster* de direção de fluxo, e forneceu como saída um *shapefile* com as linhas que constituem o fluxo do escoamento superficial.

g) Pontos de exutório

Para delimitar as bacias de contribuição, foi necessário primeiramente identificar em quais pontos havia travessias do escoamento superficial na obra civil linear, ou seja, onde ocorria a interseção das linhas de fluxo com o traçado do oleoduto. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Intersect (Analysis Tools → Overlay → Intersect)*. Como dados de entrada foram inseridos o *shapefile* do traçado do oleoduto e o *shapefile* das linhas de fluxo do escoamento superficial. O tipo de feição de saída foi selecionado como ponto.

Para o caso em estudo, foram consideradas todas as interseções, inclusive as incidentes em linhas de fluxo de primeira ordem. Conforme o objetivo de cada caso, também é possível adequar para que os exutórios sejam determinados apenas em linhas de fluxo de ordem superiores, de acordo com o detalhamento necessário.

Para tanto, foi determinada a ordem das linhas de fluxo com o auxílio da ferramenta *Stream Order (Spatial Analyst → Hydrology → Stream Order)*. A ferramenta utilizou como dados de entrada o *raster* das linhas de fluxo e o *raster* de direção de fluxo, e resultou num *raster* com o ordenamento das linhas de fluxo do escoamento superficial. O método de classificação selecionado foi o de Strahler (1957).

h) Delimitação das bacias contribuintes

Após a marcação dos pontos de exutório, as bacias contribuintes foram delimitadas pela ferramenta *Watershed (Spatial Analyst Tools → Hydrology → Watershed)*. A ferramenta utilizou como dados de entrada o *raster* de direção de fluxo e o *shapefile* com os pontos de exutório. Para garantir a delimitação de uma bacia para cada ponto de exutório, foi necessário selecionar o campo *FID* na opção *Pour Point Field (optional)*, já que cada ponto possui um *FID* diferente.

Ainda, foi preciso ajustar as configurações da ferramenta: na opção *Environments*, foi ajustada a extensão da ferramenta para a mesma extensão do *layer* de direção de fluxo (*Environments... → General Settings → Extent: same as ...*), o que garantiu a mesma abrangência na delimitação das bacias de contribuição.

O *raster* de saída gerado pela ferramenta apresentou as bacias delimitadas. Para a manipulação dos dados foi necessário converter o *raster* em um *shapefile* de polígonos, conforme descrito a seguir.

i) Vetorização das bacias

Para a vetorização das bacias contribuintes geradas foi utilizada a ferramenta *Raster to Polygon (Conversion Tools → From Raster → Raster to Polygon)*, que converteu o *raster* com as bacias delimitadas em um *shapefile* de polígonos. Para separar cada bacia em um *shapefile* diferente, foi utilizada a ferramenta *Split (Analysis Tools → Extract → Split)*. Para tanto, foi criado um campo do tipo *text* na tabela de atributos do *shapefile* e as bacias foram numeradas em um novo campo. Em seguida, na ferramenta *Split*, foi marcado o campo criado na opção *Split Field*.

A separação das bacias em diferentes polígonos foi necessária para a próxima etapa, na qual foram determinadas as características das bacias de contribuição.

j) Determinação das características das bacias contribuintes

A primeira característica obtida foi a área da bacia. Para tanto, foi adicionado um campo na tabela de atributo do *shapefile* (*Options → Add Field...*). Após a adição do campo, foi selecionada a opção *Calculate Geometry* (disponível ao clicar com o botão direito do *mouse* na nova coluna) e então a opção *Area*, selecionando a unidade de hectares. Assim o programa calculou a área de cada bacia e as inseriu na tabela de atributos.

As características de materiais inconsolidados e uso e ocupação do solo de cada bacia foram extraídas dos polígonos respectivos, conforme indicado no item (a). Para unir tais informações, foi utilizada a ferramenta *Intersect*.

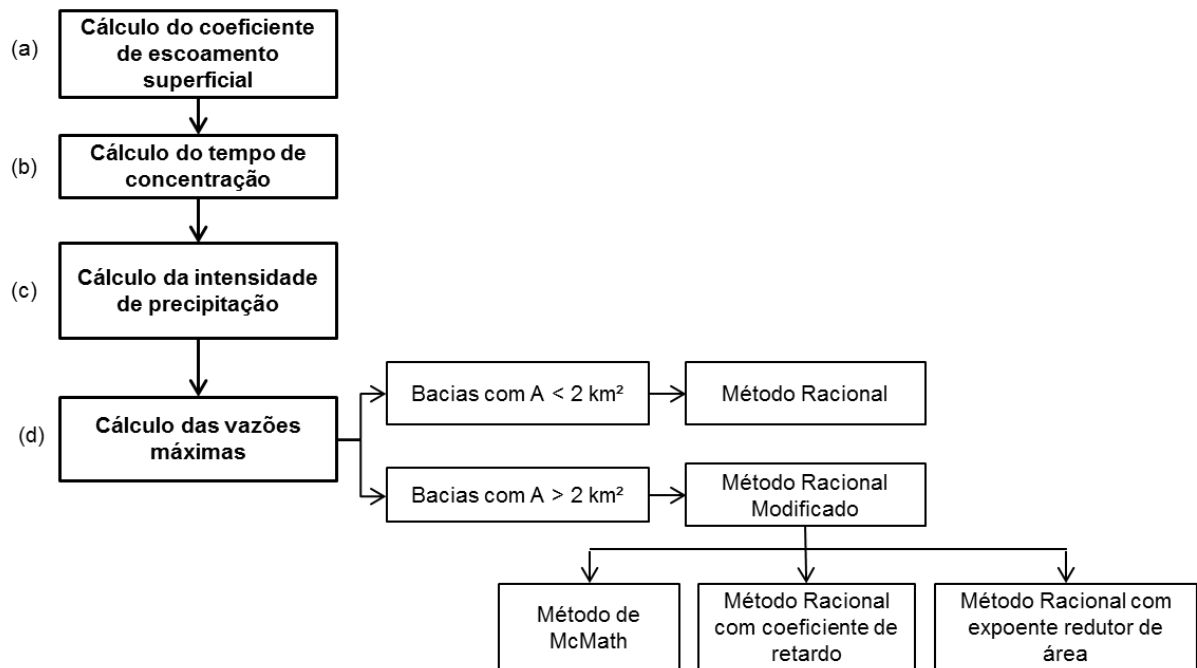
Na ferramenta *Intersect*, foram selecionados os *shapefiles* de cada bacia, dos materiais inconsolidados e do uso e ocupação do solo. Na opção *Output Type (optional)*, foi selecionado o mesmo tipo dos *shapefiles* de entrada (*input*), de forma que o *shapefile* gerado pela ferramenta também foi do tipo polígono. Também foram calculadas as áreas de cada tipo de material inconsolidado e uso e ocupação do solo das respectivas bacias. O cálculo das subáreas foi realizado do mesma forma que o cálculo da área da bacia (*Calculate Geometry*).

Com a base de dados adequadamente preparada, a próxima fase foi o cálculo das vazões máximas de cada bacia, conforme procedimento detalhado a seguir.



## 5.2 Cálculo das vazões máximas

A estimativa das vazões de cheia das bacias foi realizada em planilhas de cálculo (Microsoft Office – Excel 2010), seguindo as etapas apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 5.3).



**Figura 5.3** – Fluxograma das etapas da fase de cálculo das vazões máximas do método proposto

### a) Cálculo do coeficiente de escoamento superficial

O coeficiente de escoamento superficial foi calculado com base nas áreas percentuais de ocorrência dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo e tipos de materiais inconsolidados de cada bacia contribuinte.

A tabela de valores de coeficiente de escoamento superficial considerada nesta pesquisa foi a desenvolvida pelo DAEE (1994), apresentada na Tabela 4.6, exceto na aplicação da fórmula de McMath, que utiliza um coeficiente de escoamento próprio. Entretanto, como a tabela do DAEE considera apenas o grau de urbanização e o fim para o qual a área se destina, decidiu-se também considerar os materiais inconsolidados presentes na área, já que os mesmos tem forte contribuição na suscetibilidade ao escoamento superficial.

Assim, foram estabelecidos pesos iguais para cada característica considerada na bacia: 50% para o uso e ocupação do solo e 50% para os materiais inconsolidados, excluídas as áreas impermeabilizadas, nas quais o peso do uso e ocupação do solo é

100%, já que não há influência dos materiais inconsolidados presentes abaixo da camada impermeável.

Os pesos foram estipulados em função das características predominantes da área, na qual há incidência principalmente de áreas agrícolas e outras coberturas vegetais. Portanto, considerando que haverá influência parcial dos materiais inconsolidados, o peso de 50% para cada fator está adequado para a área de estudo. O método proposto permite adotar pesos de cada característica considerada de acordo com o local de aplicação. Por exemplo, em regiões com solo exposto, a influência dos materiais inconsolidados deve predominar. Em contrapartida, nas áreas mais urbanizadas o peso que deve prevalecer é o do uso e ocupação.

Para conhecer os graus de suscetibilidade ao escoamento superficial de cada material inconsolidado presente na área de estudo, foi utilizado como base o trabalho desenvolvido por Gimenes (2013), no qual o autor elaborou um mapa de suscetibilidade ao escoamento superficial da mesma área de estudo, considerando a declividade, o índice de circularidade, a ocupação e o tipo de solo, por meio do Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP). Para a análise, o autor agrupou as classes considerando fatores que influenciam na infiltração de água no solo, já que quanto menor a quantidade de água infiltrada, maior será o escoamento superficial.

Para calcular o valor de C resultante de cada bacia, utilizou-se a média ponderada dos coeficientes em relação às subáreas que compõe a bacia, conforme Equação 5.1 a seguir.

$$C = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + \dots + C_nA_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (5.1)$$

onde  $C_n$  = coeficiente de escoamento superficial da subdivisão da bacia;

$A_n$  = área da subdivisão da bacia.

#### b) Cálculo do tempo de concentração ( $T_c$ )

O tempo de concentração foi calculado pela equação de Kirpich (Equação 4.11). O comprimento do talvegue foi obtido no ArcGIS com a ferramenta *Generate near Table (Analysis Tools)*. A ferramenta calculou a distância entre os pontos inicial e final do curso d'água principal de cada bacia.

Para tanto, foi criado um *shapefile* de pontos contendo o ponto inicial do talvegue de cada bacia contribuinte, que foi utilizado como entrada, e a outra entrada foram os pontos de exutório criados anteriormente. Como saída, a ferramenta gerou a distância entre todos os pontos, portanto foi necessário marcar os pontos entre os quais se desejava obter a distância com a mesma identificação (FID). Assim, na tabela gerada pela ferramenta, foi

possível identificar os comprimentos dos talvegues entre os pontos dos objetos com o mesmo FID.

A diferença entre as cotas dos pontos inicial e final do curso d'água foi obtida a partir do *raster* do MDE, no qual cada célula que compõe o *raster* contém a informação da altimetria. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Extract Values to Points (Spatial Analyst Tools)*. Como entrada, foram utilizados os *shapefiles* dos pontos de exutório e dos pontos iniciais do talvegue, além do *raster* do MDE. A ferramenta extrai os valores de altimetria do *raster* nos pontos especificados. Finalmente, para obter a diferença de cotas, foi realizada a subtração entre a cota mais alta (ponto inicial do talvegue) e a mais baixa (ponto de exutório).

c) Cálculo da intensidade de precipitação

O cálculo da intensidade de precipitação foi realizado de diferentes formas para posterior comparação de resultados, considerando todos os meios disponíveis: equação tipo Eng. Otto Pfafstetter para o município de São Simão, equação tipo *In In* para o município de São Simão e equações obtidas pelo *software* Plúvio 2.1 para os municípios de São Simão e Cravinhos.

A intensidade máxima da chuva é calculada com base em um período de recorrência, dado em função do tipo de obra que se pretende construir, já que cada obra de drenagem está associada a um risco que considera o período de retorno da precipitação máxima dos dados históricos de chuva. O Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (2005) determina um tempo de recorrência de 10 anos para dispositivos de drenagem superficial, e de 50 anos para bueiros ou galerias. Portanto, o cálculo da intensidade da chuva foi realizado para os tempos de retorno de 10 e de 50 anos.

d) Cálculo das vazões máximas

Após a obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo da vazão de cheia, foi possível chegar aos valores de escoamento superficial nas travessias das linhas de fluxo na obra linear, para os períodos de retorno estabelecidos (10 e 50 anos). Tendo em vista que o Método Racional é recomendado para bacias menores, já que resulta num aumento linear irreal da vazão máxima com o aumento da área, o mesmo foi utilizado para o cálculo das vazões em bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>, e foram utilizados métodos alternativos para o cálculo em bacias com área superior.

Para manter a simplicidade do cálculo e facilidade de aplicação do método, foram selecionadas modificações do Método Racional, que utilizam fatores de redução da área: Método de McMath, Método Racional com coeficiente de retardo e Método Racional com expoente redutor de área.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados da aplicação do método proposto na área de estudo e as respectivas discussões. Primeiramente, são relatados os resultados da fase de modelagem hidrológica em ambiente SIG. Em seguida, são apresentados os cálculos das vazões máximas das bacias contribuintes, obtidas pelo Método Racional e pelo Método Racional Modificado para os períodos de retorno estabelecidos.

No Apêndice A é apresentado o Mapa de Documentação, que contém os planos de informação que compõe a base cartográfica digital. No Apêndice B é apresentado o Mapa de Vazões Máximas para período de retorno de 10 anos, e o Apêndice C contém o Mapa de Vazões Máximas para período de retorno de 50 anos.

### 6.1 Modelagem hidrológica em SIG

Todos os procedimentos referentes à modelagem hidrológica foram realizados no programa ArcGIS versão 9.3.

#### 6.1.1 Base cartográfica digital e correção hidrológica do MDE

A base cartográfica digital da área de estudo, apresentada no Mapa de Documentação (APÊNDICE A), representa um trecho do oleoduto OSBRA, entre os municípios de São Simão (estaca 157,8) e Cravinhos (estaca 176,3). O trecho possui aproximadamente 18,5 km de extensão, com uma faixa de 2 km para cada lado do oleoduto, totalizando uma área de 83,99 km<sup>2</sup>.

Os PIs que constituem a base cartográfica do presente estudo são provenientes do trabalho de Augusto Filho (2008), que desenvolveu uma base cartográfica digital que inicia na porção noroeste do município de São Simão, atravessa a área central do município de Cravinhos e se estende até o terminal da Transpetro, na região oeste de Ribeirão Preto. Posteriormente, Gimenes (2013) desenvolveu um estudo em uma porção de aproximadamente 40% da área inicial, que também corresponde à área de estudo considerada atualmente.

Antes de aplicar as ferramentas hidrológicas para obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo das vazões máximas, foi preciso deixar o MDE adequadamente preenchido, por meio da ferramenta *Fill*, para garantir um modelo hidrológicamente

coerente. Para tanto, foi utilizado como entrada o *raster* do MDE, e o *raster* de saída apresentou elevações variando de 565,57 a 840,43 m.

A comprovação de que o MDE está adequadamente preenchido foi dada pela ferramenta *Flow direction*, que determinou as direções de fluxo no MDE. Ao aplicar a ferramenta *Flow direction* no MDE não corrigido, o *raster* de saída apresentou catorze direções de fluxo diferentes, evidenciando a incoerência do MDE, já que conforme o algoritmo D8 utilizado pelo programa, a água pode fluir apenas para oito direções (leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste, noroeste, norte e nordeste). Após a utilização da ferramenta *Fill*, ao aplicar novamente a ferramenta *Flow direction*, o *raster* de saída apresentou água fluindo para oito direções, indicando que o MDE estava hidrológicamente correto.

### 6.1.2 Mapa de Materiais Inconsolidados e de Uso e Ocupação do Solo

O Mapa de Materiais Inconsolidados e o Mapa de Uso e Ocupação do Solo, elaborados previamente por Augusto Filho (2008), foram PIs muito importantes para a determinação do coeficiente de escoamento superficial, necessário para o cálculo das vazões máximas.

Para analisar a influência de cada tipo de material inconsolidado, foi considerado como tais unidades facilitam o escoamento superficial. Os materiais finos e coesivos (solos argilosos) possuem baixa permeabilidade e, portanto, elevada capacidade de gerar escoamento superficial. Já os materiais granulares não coesivos (solos arenosos) possuem elevada permeabilidade e, assim, são menos capazes de gerar escoamento. Analogamente, no caso do uso e ocupação do solo, as unidades foram consideradas como facilitadoras do escoamento (áreas impermeabilizadas) ou como barreiras (áreas com cobertura vegetal).

Na Tabela 6.1 é apresentada a distribuição em área das unidades de materiais inconsolidados presentes na área de estudo.

**Tabela 6.1** – Distribuição percentual das classes de materiais inconsolidados (GIMENES, 2013)

<b>Classe de material inconsolidado</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% da área</b>
Coberturas arenosas	2.191.568	2,6
Depósitos aluvionares	484.496	0,6
Solo residual de arenito Botucatu	26.285.840	31,3
Solo residual de arenito intertrapiano	210.240	0,2
Solo residual de basalto (jovem)	1.238.368	1,5
Solo residual de basalto (maduro)	53.532.512	63,8

Os materiais inconsolidados e os respectivos perfis de alteração foram identificados conforme a classificação de Vaz (1996). Os materiais encontrados na área de estudo são provenientes de solo transportado (coberturas arenosas dendríticas de topo de morro e depósitos aluvionares) ou de solo residual de basalto (jovem ou maduro) da Formação Serra Geral, de arenito intertrapiano e da Formação Botucatu (AUGUSTO FILHO, 2008).

Assim, conhecendo as propriedades dos materiais inconsolidados que compõe a região, presume-se que as unidades com maior capacidade de gerar escoamento superficial são os solos residuais de basalto, devido à textura argilosa com areia ou silte. As coberturas arenosas também podem facilitar o deflúvio, visto que possuem textura areno-argilosa e apresentam elevada coesão aparente. Já os depósitos aluvionares, constituídos por sedimentos desagregados areno-silto-argilosos, possuem menor capacidade de gerar escoamento. O mesmo ocorre para os solos residuais de arenito Botucatu e intertrapiano, que possuem textura arenosa com finos (argila e silte) e são pouco coesivos.

Um setor do Mapa de Materiais Inconsolidados é apresentado na Figura 6.1.

Quanto ao uso e ocupação do solo, foram definidas treze classes de uso do solo: área urbana, campo sujo, cana, cultura, faixa de linhas de transmissão, faixa de vias, instalações industriais, loteamento, mata, pastagens, propriedades rurais, reflorestamento e solo exposto (AUGUSTO FILHO, 2008; GIMENES, 2013). As áreas ocupadas por cada classe de uso e ocupação do solo são apresentadas na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2** – Distribuição percentual das classes de uso e ocupação do solo (GIMENES, 2013)

<b>Classe de uso e ocupação</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>% da área</b>
Área urbana	3.612.048	4,3
Campo sujo	4.153.984	4,9
Cana	60.730.672	72,4
Cultura	2.704.688	3,2
Faixa de vias	2.312.272	2,8
Faixa de linhas de transmissão	314.128	0,4
Instalações industriais	65.376	0,1
Loteamento	72.992	0,1
Mata	4.059.824	4,8
Pastagem	3.949.648	4,7
Propriedades rurais	627.200	0,7
Reflorestamento	1.153.648	1,4
Solo exposto	163.424	0,2

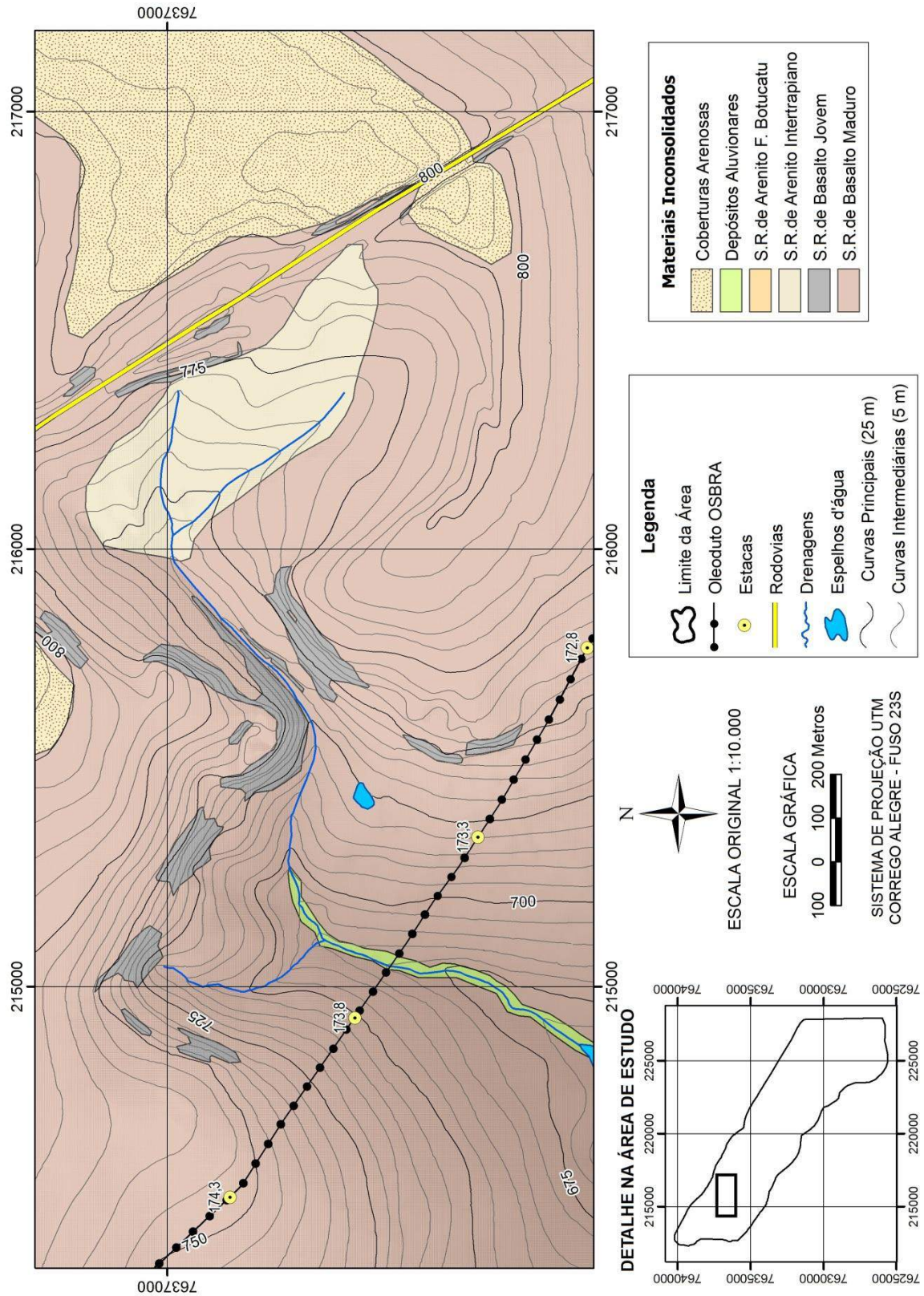


Figura 6.1 – Setor do mapa de materiais inconsolidados

No caso das áreas impermeabilizadas, como a área urbana, as faixas de vias e as instalações industriais, aumenta-se a capacidade de gerar escoamento superficial, o que também ocorre, apenas não tão intensamente, onde há solo exposto. Em contrapartida, nas áreas de mata, reflorestamento, cana e outras culturas, há baixa capacidade de gerar deflúvio, pois a cobertura vegetal funciona como barreira para contenção das águas pluviais. Os outros usos possuem características intermediárias, cuja capacidade de escoamento pode variar de baixa a média.

Um setor Mapa de Uso e Ocupação do Solo é apresentado na Figura 6.2.

### 6.1.3 Definição da direção e acumulação de fluxo

Após a correção hidrológica do MDE, foi aplicada a ferramenta *Flow direction* para obtenção das direções de fluxo da área de estudo. Como entrada foi utilizado o *raster* do MDE corrigido, e o *raster* de saída apresentou as direções de fluxo de água.

O *raster* de saída apresentou fluxo de água para as oito direções e, portanto, está coerente com o algoritmo utilizado, conforme mencionado anteriormente. É de extrema importância que a direção de fluxo esteja correta, pois a partir da mesma foram obtidos todos os atributos hidrológicos necessários para o cálculo das vazões máximas.

O Mapa de Direção de Fluxo é apresentado na Figura 6.3.

A partir do *raster* de direção de fluxo, foi aplicada a ferramenta *Flow accumulation*, que delineou o acúmulo do fluxo de água a partir da identificação das células que recebiam maiores quantidades de fluxo de outras células. Para tanto, foi utilizado o *raster* de direção de fluxo como entrada na ferramenta, e o *raster* de saída apresentou em quais células havia acumulação de fluxo.

Para verificar se o resultado da ferramenta estava coerente, comparou-se o fluxo acumulado do *raster* com as drenagens digitalizadas a partir das fotografias aéreas da base cartográfica digital elaborada previamente por Augusto Filho (2008). Pela comparação, foi verificada a total compatibilidade entre as drenagens existentes e o fluxo acumulado gerado pela ferramenta *Flow accumulation*. A diferença é que o *raster* resultante da aplicação da ferramenta mostrou a acumulação do fluxo com maior nível de detalhe, indicando as linhas de fluxo do escoamento superficial, que não implicam necessariamente na existência de drenagens perenes, mas sim representam o trajeto teoricamente percorrido pelas águas pluviais na superfície da área de estudo.



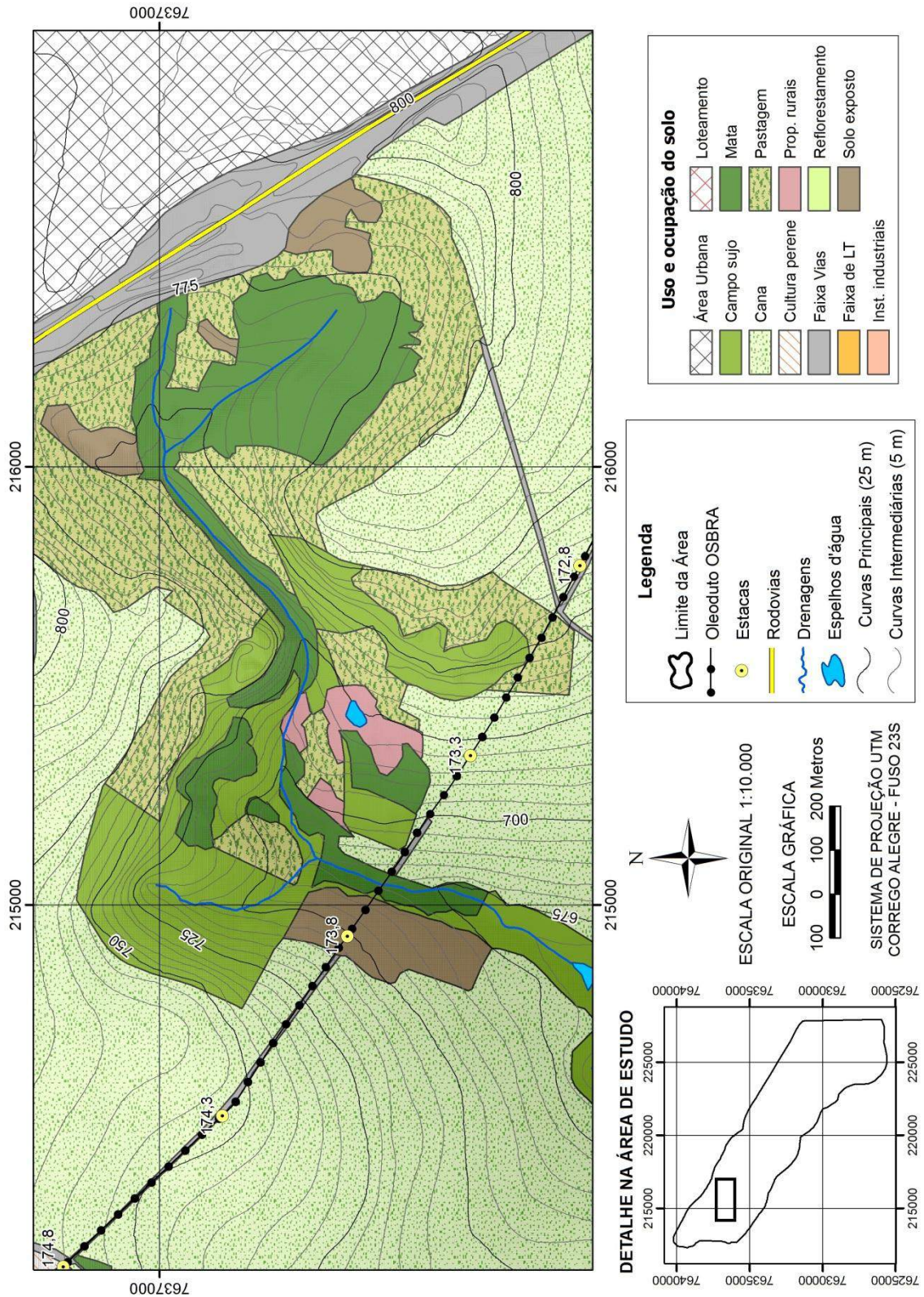


Figura 6.2 – Setor do mapa de uso e ocupação do solo

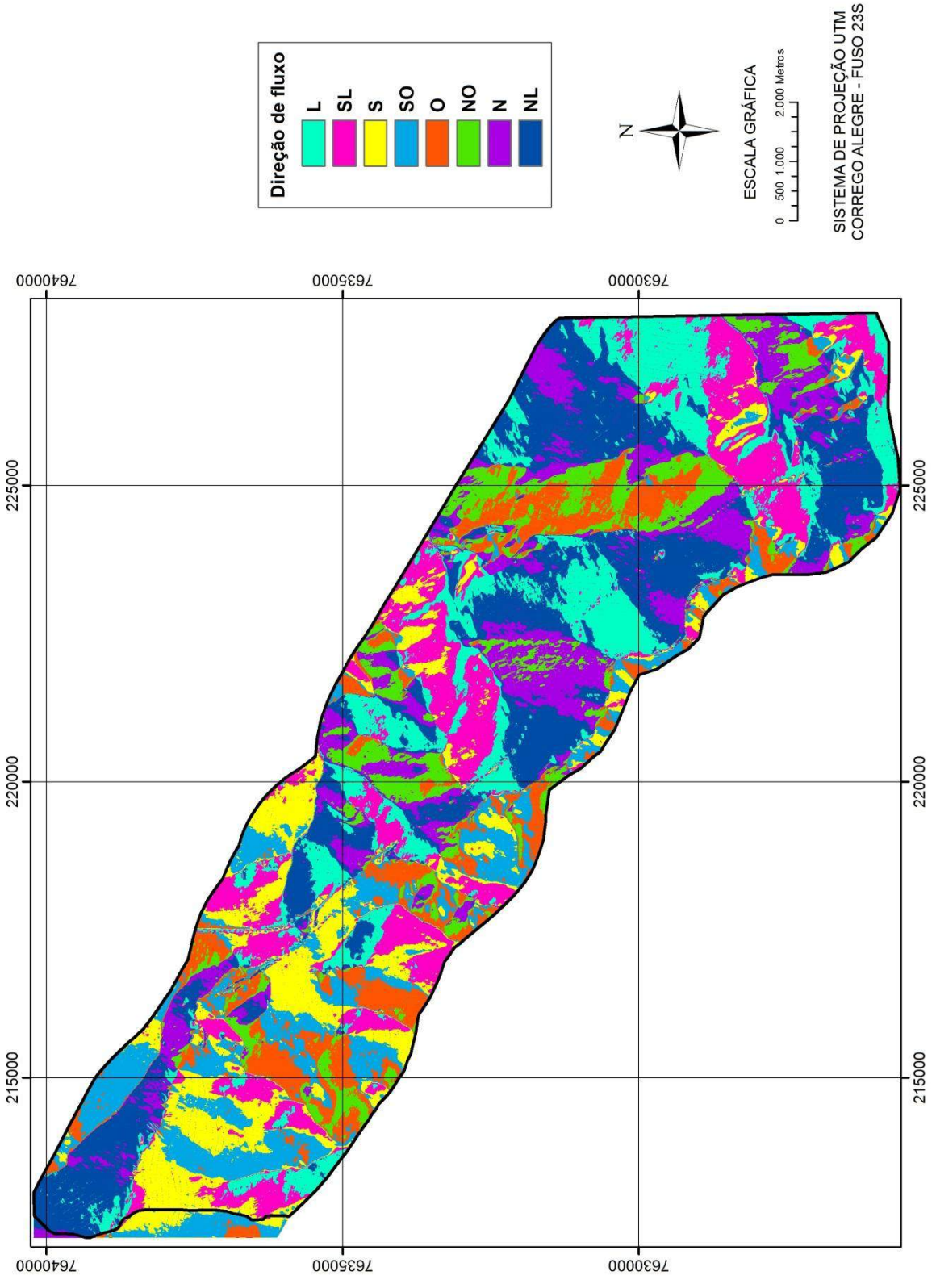


Figura 6.3 – Mapa de direção de fluxo

#### 6.1.4 Extração das linhas de fluxo do escoamento superficial

Para extrair as linhas de fluxo do escoamento superficial, foi necessário primeiramente definir uma área mínima de contribuição (limiar) a partir da qual a acumulação de fluxo das células representa o trajeto das águas pluviais na superfície. Para definir o limiar foram considerados os seguintes fatores:

- Finalidade de aplicação do método em fases iniciais de projeto, ou seja, não há necessidade de um nível elevado de detalhe;
- O traçado do oleoduto ocupa principalmente divisores de água;
- Extensão total do trecho;
- Escala de trabalho.

Após a realização de simulações no programa, concluiu-se que uma área de contribuição de 5 hectares era suficientemente representativa do escoamento superficial da área de estudo. Considerando que o MDE possui *grid* de 4 m, cada célula tem área equivalente a 16 m<sup>2</sup> e, portanto, uma área de 5 ha é representada por 3125 células, ou 5,0 cm<sup>2</sup> na escala de trabalho (1:10.000). Portanto, o limiar utilizado foi igual a 3125.

Para extrair a rede de drenagem a partir do limiar estabelecido, foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator*. Como o *raster* de acumulação de fluxo foi denominado *FlowAcc*, foi inserida a seguinte expressão na ferramenta:

*Con ("Flowacc" > 3125, 1)*

Que equivale à expressão:

*SetNull ("Flowacc" < 3125, 1)*

Tais expressões são operações condicionais que atribuem, respectivamente, valores unitários para células com área de contribuição superior a 5 ha e valores nulos para células com área de contribuição inferior a 5 ha.

O *raster* de saída da ferramenta *Raster Calculator* representou a acumulação do fluxo nas células cuja área de contribuição é superior a 5 ha.

Antes de dar sequência ao procedimento de modelagem hidrológica, foi necessário vetorizar as linhas de fluxo do escoamento superficial. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Stream to feature*.

O desenho das linhas de fluxo gerado pela ferramenta foi bastante satisfatório para a resolução do MDE, conforme pode ser observado na Figura 6.4, em comparação às drenagens digitalizadas na elaboração da base cartográfica digital.

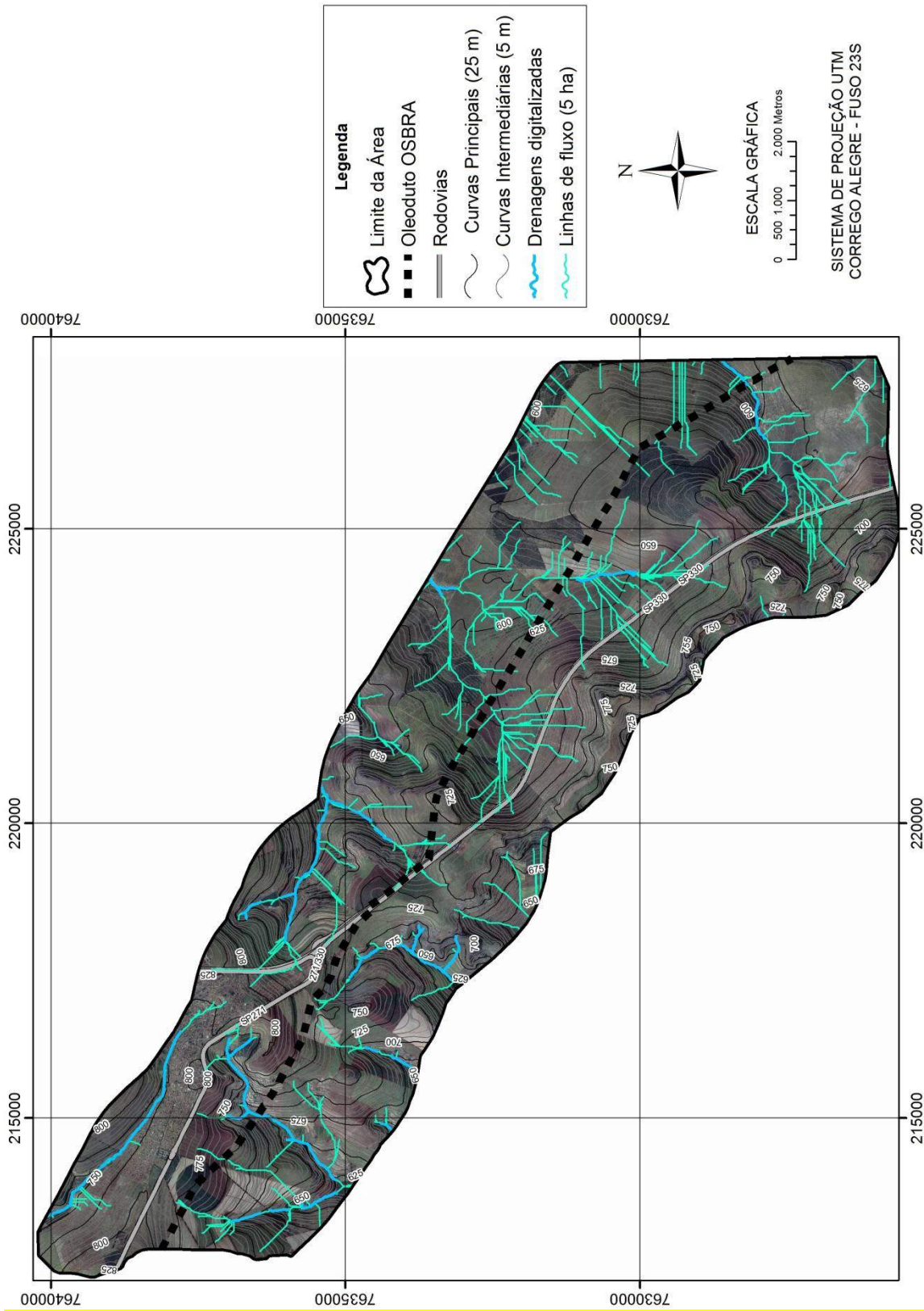


Figura 6.4 – Linhas de fluxo do escoamento superficial, considerando área mínima de contribuição de 5 ha

### 6.1.5 Definição dos pontos de exutório e delimitação das bacias contribuintes

Para obter as bacias de contribuição, primeiramente foram definidos os pontos de exutório a partir dos quais as bacias foram delimitadas. O exutório é o ponto de menor altitude de uma bacia, para o qual converge todo o escoamento superficial. Portanto, entende-se que o exutório é um ponto crítico, no qual ocorre a concentração dos fluxos do escoamento que acarretam na vazão máxima. Assim, o método proposto considerou o ponto crítico de escoamento (exutório) no local exato da interseção com a obra de interesse (oleoduto).

Primeiramente, foi necessário estabelecer a ordem das linhas de fluxo nas quais a interseção seria considerada como exutório, visto que, quanto maior o detalhe necessário, devem ser consideradas as linhas de fluxo desde as menores ordens. Contudo, se a rede constituída pelas linhas de fluxo do escoamento superficial for bastante densa, com várias ramificações, podem ser consideradas apenas as linhas de fluxo de ordens maiores, para evitar a criação de pontos de exutório em excesso.

Tal decisão está diretamente relacionada com a área mínima de contribuição definida no item *Extração das linhas de fluxo do escoamento superficial*. Os fatores que influenciam a escolha do limiar para extração das linhas de fluxo também foram considerados no ordenamento das linhas para criação dos pontos de exutórios.

Para determinar a ordem das linhas de fluxo, foi utilizada a ferramenta *Stream order*, que requer dois *rasters* de entrada: o *raster* das linhas de fluxo e o *raster* de direção de fluxo. O método de classificação escolhido foi o de Strahler (1957). Um setor do Mapa de ordenamento das linhas de fluxo é apresentado na Figura 6.5.

A ordem das linhas de fluxo na área de estudo variou de 1 até 5, sendo que a ordem das linhas que atravessam o traçado do oleoduto variou de 1 a 4. Assim, considerando os fatores utilizados na decisão da área mínima de contribuição, foi definido que os exutórios seriam criados em todas as interseções das linhas de fluxo com o traçado da obra, ou seja, considerou-se a travessia de linhas de ordem igual ou superior a 1.

A próxima etapa consistiu na criação dos exutórios, a partir da ferramenta *Intersect*. As feições de entrada foram o *shapefile* das linhas de fluxo e o *shapefile* do traçado do oleoduto. O *shapefile* de saída foi definido como do tipo ponto. A partir da identificação de 29 interseções entre as linhas de fluxo e o traçado do oleoduto, a ferramenta criou 29 pontos de exutórios. O resultado é apresentado na Figura 6.6.

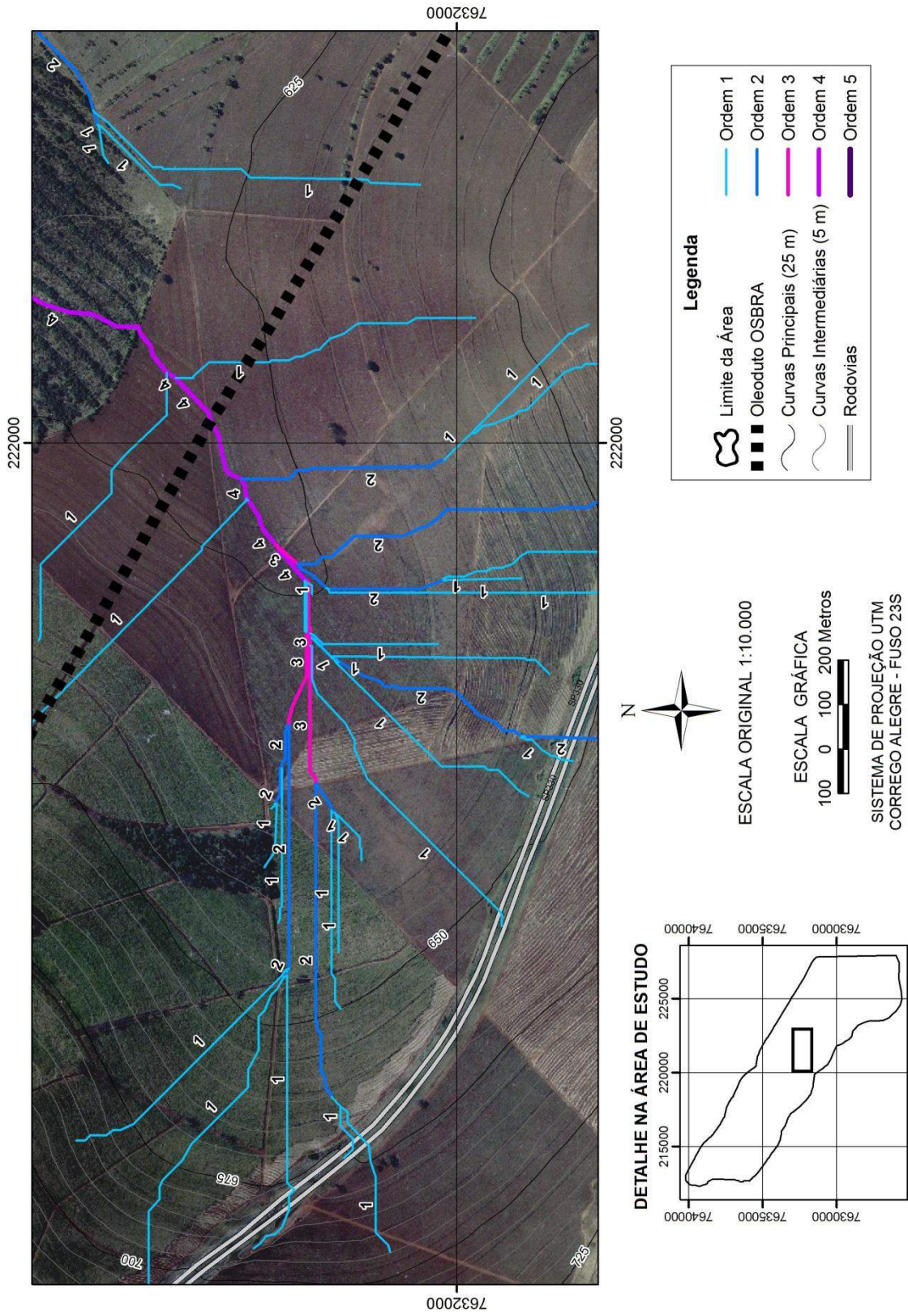


Figura 6.5 – Setor do mapa de ordenamento das linhas de fluxo do escoamento superficial, pela classificação de Strahler (1957)

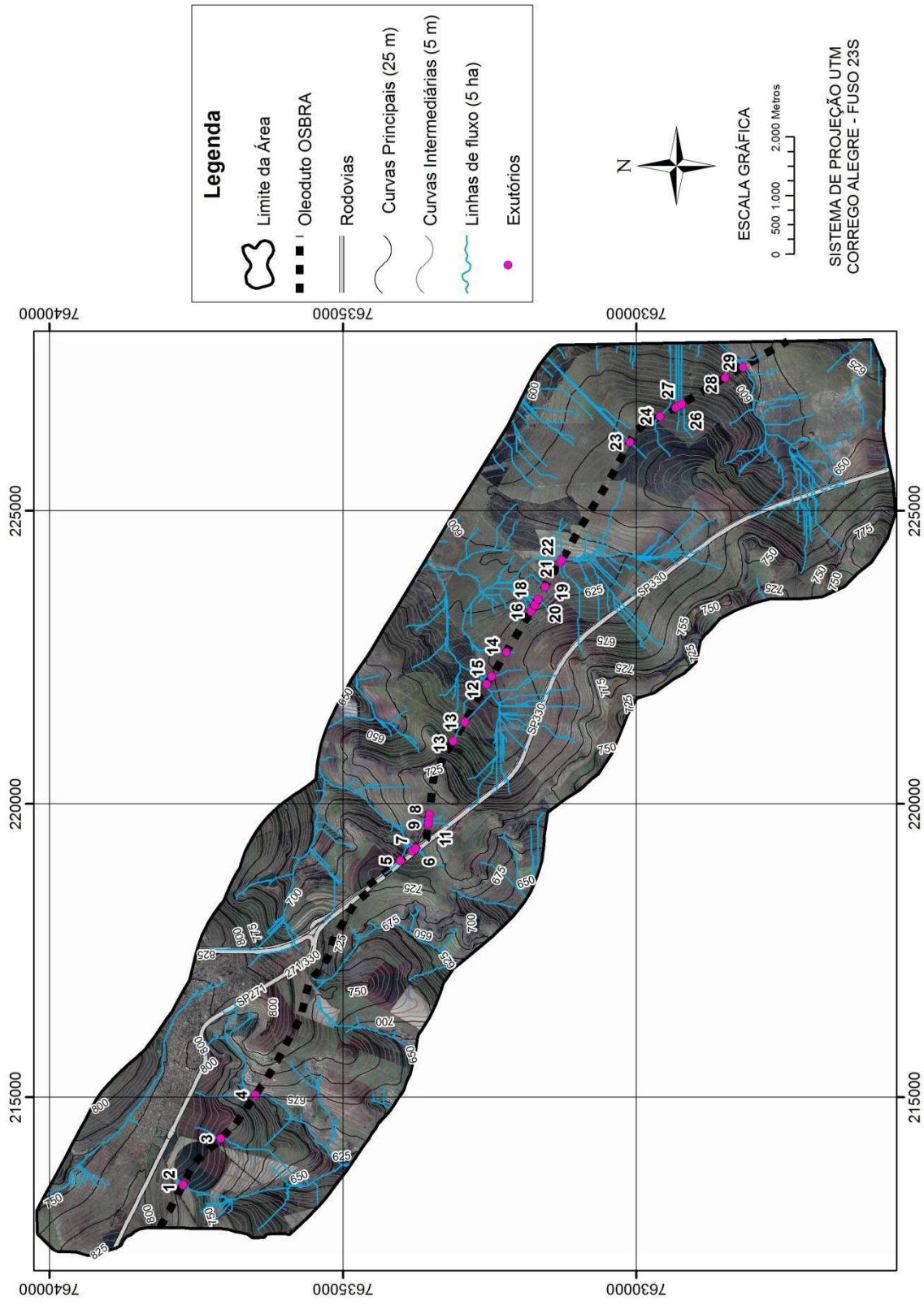


Figura 6.6 – Pontos de exutório

A partir dos pontos de exutórios criados na etapa anterior, foi possível obter as bacias de contribuição com a ferramenta *Watershed*, que utilizou como entrada o *raster* de direção de fluxo e o *shapefile* de pontos de exutório. O *raster* de saída apresentou as bacias delimitadas, em número igual ao número de exutórios. Assim, para cada ponto de exutório foi delineada uma bacia de contribuição.

Foram geradas, no total, 29 bacias contribuintes. Observou-se que algumas bacias eram consideravelmente menores. Isso ocorreu porque a ferramenta *Watershed* delimitou as bacias de acordo com a resolução do *raster* de direção de fluxo, e também porque o critério utilizado para marcação de exutórios não indicou apenas pontos com elevado fluxo acumulado. Conseqüentemente, alguns pontos foram inseridos em linhas de fluxo de primeira ordem, que não apresentavam uma acumulação de fluxo significativa e, portanto, as bacias respectivas foram delimitadas por apenas algumas células cujo fluxo se dá em direção ao exutório estabelecido.

No geral, a delimitação das bacias foi bastante coerente. Contudo, algumas bacias ficaram muito próximas e possivelmente foram divididas apenas porque a ferramenta gera, obrigatoriamente, uma bacia para cada exutório. Tal fato será discutido mais adiante no item *Validação dos resultados em campo*.

Antes de prosseguir com a etapa de modelagem hidrológica em SIG, foi necessário converter o *raster* das bacias para o formato de *shapefile* (polígonos). Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Raster to polygon*. O resultado é apresentado na Figura 6.7.

O procedimento foi realizado de forma de cada bacia fosse vetorizada separadamente. A individualização das bacias de contribuição foi fundamental para a determinação de duas importantes características das bacias: área e coeficiente de escoamento superficial.

Primeiramente, foram obtidas as áreas das bacias, com a opção *Calculate Geometry*, diretamente na tabela de atributos do *shapefile* com as bacias vetorizadas. As áreas são apresentadas na Tabela 6.3.

Para a determinação do coeficiente de escoamento superficial, foi necessário conhecer o uso e ocupação do solo em cada bacia. Também foi considerada a influência dos materiais inconsolidados presentes na área sobre o escoamento superficial. Para tanto, foram determinadas subáreas dentro de cada bacia, considerando as frações ocupadas por diferentes unidades de uso e ocupação do solo e de materiais inconsolidados.

Tal procedimento foi realizado com auxílio da ferramenta *Intersect*, que realizou a interseção dos *shapefiles* (polígonos) das bacias, de uso e ocupação do solo e de materiais inconsolidados. O resultado foi um *shapefile* (polígonos) com as informações combinadas para cada bacia. O cálculo das subáreas também foi realizado com a opção *Calculate Geometry*.



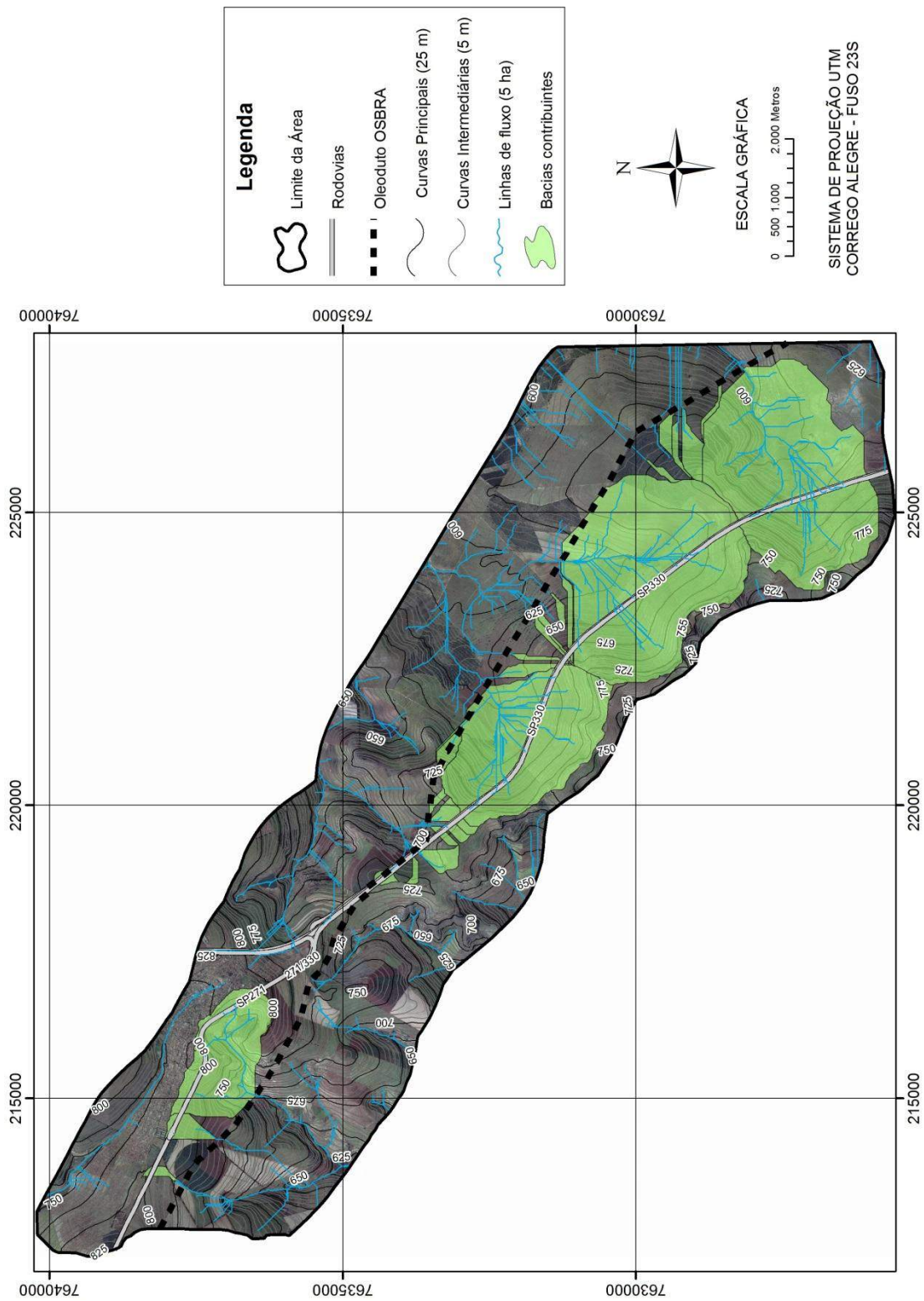


Figura 6.7 – Bacias contribuintes delimitadas pela ferramenta Watershed

**Tabela 6.3** – Áreas das bacias contribuintes

Bacia	Área (ha)
01	0,01
02	7,50
03	26,17
04	240,44
05	9,17
06	5,17
07	20,72
08	5,06
09	6,17
10	18,86
11	7,20
12	517,13
13	17,21
14	6,18
15	16,22
16	0,01
17	7,94
18	6,51
19	6,00
20	0,13
21	13,71
22	822,69
23	5,24
24	0,14
25	12,12
26	9,31
27	28,47
28	6,25
29	801,76

Ao observar as áreas obtidas, é possível notar que as Bacias 01, 16, 20 e 24 possuem uma área bastante inferior. A delimitação de tais bacias, que são constituídas por apenas algumas células, está condicionada à resolução dos dados topográficos utilizados para a geração do MDE, cuja escala de trabalho é 1:10.000. Quanto maior a resolução dos dados de entrada para a geração do MDE, mais refinada é a malha. Assim, à medida que se aumenta a resolução, o *raster* de direção de fluxo, que é o PI essencial para a modelagem hidrológica, torna-se mais semelhante à realidade.

Também é necessário levar em consideração o nível de detalhe proporcionado para a área de contribuição escolhida (5 ha). Ainda, as Bacias 01, 16, 20 e 24 foram delimitadas somente porque, na aplicação do método proposto, optou-se por incluir todas as interseções das linhas de fluxo do escoamento superficial com o traçado do oleoduto, inclusive as

incidentes em linhas de fluxo de primeira ordem. Neste caso, além das linhas serem de primeira ordem, a extensão das mesmas à montante do oleoduto é muito pequena, resultando em bacias apenas teóricas, ou seja, foram delimitadas pelo programa de acordo com os parâmetros estabelecidos, porém não apresentaram uma delimitação bem definida em campo. No entanto, todas as bacias contribuintes geradas pelo programa foram consideradas no procedimento de cálculo das vazões máximas, apresentado a seguir.

## **6.2 Cálculo das vazões máximas**

O procedimento de cálculo das vazões máximas foi realizado com base nos resultados da fase de modelagem hidrológica em SIG. Para tanto, foram utilizadas planilhas de cálculo, cujos resultados são apresentados a seguir.

### **6.2.1 Cálculo do coeficiente de escoamento**

Para obter o coeficiente de escoamento superficial, o Método Racional estabelece valores tabelados de acordo com o uso e ocupação do solo. Contudo, decidiu-se também considerar a influência dos materiais inconsolidados no escoamento superficial, exceto nas áreas impermeabilizadas, tais como áreas urbanas, faixas de vias e instalações industriais, nas quais os materiais inconsolidados abaixo da camada impermeável não influenciam o escoamento superficial.

Primeiramente, foram atribuídos coeficientes individuais para as unidades de uso e ocupação do solo e para as unidades de materiais inconsolidados. Para tanto, foi considerada a classificação do trabalho de Gimenes (2013), que atribuiu pesos aos fatores considerados na determinação da susceptibilidade ao escoamento superficial na mesma área de estudo.

Quanto aos resultados obtidos para o uso e ocupação do solo, os usos de área urbana, vias e indústrias receberam peso de 41%, o solo exposto de 29%, pastagens, loteamentos e linhas de transmissão de 19%, culturas de 7% e reflorestamento de 4%, sendo que, quanto maior o peso, maior a capacidade de produzir escoamento.

Já para os materiais inconsolidados, o solo residual de basalto teve maior peso (35%), seguido pelas coberturas arenosas (28%), que apresentaram peso próximo dos depósitos aluvionares (24%), e os solos menos suscetíveis ao escoamento superficial foram os arenitos intertrapiano (9%) e Botucatu (4%).

Considerando os pesos calculados por Gimenes (2013) para cada tipo de uso e ocupação do solo e de materiais inconsolidados, foram atribuídos valores de C para cada tipo, tomando como base a tabela do DAEE. Os valores são apresentados na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4** – Valores de C atribuídos para as unidades de uso e ocupação do solo e materiais inconsolidados

<b>Atributo</b>	<b>Tipo</b>	<b>C</b>
Uso e ocupação do solo	Área urbana	0,70
	Campo sujo	0,30
	Cana	0,25
	Cultura	0,25
	Faixa de linha de transmissão	0,25
	Faixa de vias	0,70
	Instalações industriais	0,70
	Loteamento	0,30
	Mata	0,20
	Pastagens	0,30
	Propriedades rurais	0,30
	Reflorestamento	0,20
	Solo exposto	0,40
	Materiais inconsolidados	Depósitos aluvionares
Coberturas Arenosas		0,25
S.R. Basalto (jovem)		0,30
S.R. Basalto (maduro)		0,30
Arenito Intertrapiano		0,20
Arenito Botucatu		0,20

Posteriormente, foi calculado o valor de C para cada subárea da bacia de acordo com a combinação das unidades presentes na mesma. Obtidos os valores de C de cada subárea, o C resultante da bacia foi calculado por média ponderada. Os resultados são apresentados na Tabela 6.5 a seguir.

**Tabela 6.5** – Valores de C calculados para cada bacia  
(continua)

<b>Bacia</b>	<b>C</b>
01	0,32
02	0,34
03	0,39
04	0,39
05	0,47
06	0,29
07	0,29
08	0,28
09	0,34
10	0,33
11	0,46
12	0,30
13	0,31
14	0,27
15	0,26

(conclusão)	
Bacia	C
16	0,24
17	0,28
18	0,28
19	0,25
20	0,23
21	0,28
22	0,27
23	0,23
24	0,26
25	0,24
26	0,23
27	0,23
28	0,25
29	0,27

O menor valor obtido foi de 0,23, para as Bacias 20, 23, 26 e 27, que apresentam predominância de uso e ocupação do solo por plantações de cana e outras culturas, e presença de materiais inconsolidados de arenito Botucatu, que são unidades com baixo potencial de escoamento superficial. O valor máximo obtido foi igual a 0,47, referente à Bacia 05, já que a mesma delimita uma região ocupada principalmente pela faixa da rodovia, que é impermeável e, portanto, tem maior capacidade de gerar escoamento. Assim, conclui-se que os valores calculados estão coerentes com as unidades de uso e ocupação e de materiais inconsolidados presentes nas bacias.

O valor do coeficiente de escoamento superficial depende da escolha do projetista, visto que o C é obtido diretamente em tabelas que indicam faixas de valores a serem adotados de acordo com o uso e ocupação da bacia. Portanto, pode haver variações dependendo da tabela utilizada, além da influência dos critérios de projeto adotados pelo profissional, que pode optar por um dimensionamento com maior segurança ou mais econômico. Ainda, sempre que possível, deve-se considerar outras características da bacia para o cálculo do coeficiente de escoamento, tais como a declividade, materiais inconsolidados entre outras. A incorporação de tais fatores no coeficiente de deflúvio aumenta a precisão do cálculo e reduz a incerteza da escolha baseada apenas na ocupação da bacia.

### 6.2.2 Cálculo do tempo de concentração

Conforme mencionado, o tempo de concentração foi calculado pela Equação de Kirpich (Equação 4.11). Para tanto, foi necessário obter o comprimento  $L$  do talvegue, bem como o desnível  $H$  entre o ponto inicial do talvegue principal e o ponto final (exutório).

Para determinação do comprimento do talvegue, optou-se por utilizar a ferramenta *Generate Near Table*, que determina as distâncias das feições de entrada (*input features*) em relação às feições próximas (*near features*) inseridas em um determinado raio de busca. Se não for especificado nenhum valor para o raio de busca, o programa utiliza um raio cuja abrangência incorpora todas as feições selecionadas.

Assim, como feições de entrada foram inseridos os pontos de exutório, e como feições próximas foram inseridos os pontos iniciais dos talvegues. A ferramenta gerou uma tabela com as distâncias entre tais pontos, que correspondem ao comprimento do talvegue de cada bacia. Não foi necessário especificar um valor para o raio de busca.

Os desníveis entre as cotas inicial e final dos talvegues foram obtidos diretamente do *raster* do MDE, no qual cada célula representa a altimetria daquele local. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Extract Values to Points*, que forneceu os valores das cotas dos pontos iniciais e finais dos talvegues, cuja diferença é o valor utilizado no cálculo do tempo de concentração.

Os valores obtidos no SIG e os tempos de concentração calculados são apresentados na Tabela 6.6 a seguir.

**Tabela 6.6** – Tempos de concentração calculados para cada bacia  
(continua)

Bacia	L (km)	H (m)	Tc (min)
01	0,15	6,45	3,15
02	0,14	5,32	3,08
03	0,46	26,05	6,58
04	1,59	105,55	16,25
05	0,35	9,47	7,06
06	0,07	4,10	1,47
07	0,57	24,21	8,72
08	0,02	0,84	0,59
09	0,05	2,19	1,35
10	0,24	11,30	4,39
11	0,34	16,87	5,57
12	2,14	96,22	23,60
13	0,41	22,69	6,10
14	0,14	5,93	2,96
15	0,52	20,71	8,43
16	0,04	2,78	0,80
17	0,05	4,05	1,06
18	0,06	4,53	1,30
19	0,12	2,71	3,38
20	0,43	28,65	5,88
21	0,28	8,38	5,67
22	2,74	93,33	31,90
23	0,39	9,75	8,07
24	0,70	23,58	11,27
25	0,06	2,59	1,48
26	0,43	14,93	7,56

(conclusão)			
Bacia	L (km)	H (m)	Tc (min)
27	0,60	21,94	9,70
28	0,01	0,51	0,28
29	3,65	150,50	36,93

Como pode ser observado, as bacias maiores, que possuem os talvegues com maiores comprimentos, resultaram em tempos de concentração maiores, já que há um intervalo maior de tempo até o escoamento superficial de toda a bacia passar a contribuir com a vazão no exutório.

Também é ressaltado que, quanto maior o desnível entre as cotas dos pontos iniciais e finais do talvegue, menor é o tempo de concentração, já que declividades mais acentuadas geram maiores velocidades de escoamento superficial.

### 6.2.3 Cálculo da intensidade de precipitação

A intensidade de precipitação foi calculada por meio de diferentes equações: equação tipo Eng. Otto Pfafstetter (São Simão), equação tipo  $\ln \ln$  (São Simão) e equações obtidas pelo software Plúvio 2.1 (São Simão e Cravinhos), considerando a precipitação máxima para períodos de retorno de 10 e 50 anos.

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos de cada tipo de equação utilizado, bem como uma comparação entre os mesmos.

#### 6.2.3.1 Equação Eng. Otto Pfafstetter (São Simão)

As intensidades de precipitação calculadas pela equação tipo Eng. Otto Pfafstetter para a localidade de São Simão encontram-se na Tabela 6.7, que apresenta os parâmetros utilizados e os resultados obtidos no cálculo. Ressalta-se que, para o Método Racional, a duração da precipitação é igual ao tempo de concentração (calculado no item anterior). Assim, os valores de  $\alpha$  e  $\beta$ , que variam conforme a duração da precipitação, foram associados aos tempos de concentração calculados, sem interpolação. Já os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes para cada posto pluviométrico e não variam conforme a duração da chuva.

A equação tipo Eng. Otto Pfafstetter forneceu como resultado final a altura  $h$  de precipitação. Assim, para obter a intensidade  $i$ , foi necessário dividir a altura pela duração da chuva.

**Tabela 6.7** – Intensidade de precipitação obtida pela equação Eng. Otto Pfafstetter para o município de São Simão

Bacia	Tc (h)	$\alpha$	$\beta$	a	b	c	h (mm)		i (mm/min)	
							10 anos	50 anos	10 anos	50 anos
01	0,05	0,108	0,00	0,4	26	20	10,43	12,41	3,31	3,94
02	0,05	0,108	0,00	0,4	26	20	10,26	12,21	3,33	3,96
03	0,11	0,108	0,00	0,4	26	20	16,87	20,07	2,56	3,05
04	0,27	0,122	0,04	0,4	26	20	29,42	36,06	1,81	2,22
05	0,12	0,108	0,00	0,4	26	20	17,58	20,91	2,49	2,96
06	0,02	0,108	0,00	0,4	26	20	5,78	6,88	3,94	4,68
07	0,15	0,108	0,00	0,4	26	20	19,80	23,56	2,27	2,70
08	0,01	0,108	0,00	0,4	26	20	2,61	3,11	4,41	5,25
09	0,02	0,108	0,00	0,4	26	20	5,38	6,40	4,00	4,75
10	0,07	0,108	0,00	0,4	26	20	13,09	15,57	2,98	3,55
11	0,09	0,108	0,00	0,4	26	20	15,25	18,15	2,74	3,26
12	0,39	0,138	0,08	0,4	26	20	37,80	47,87	1,60	2,03
13	0,10	0,108	0,00	0,4	26	20	16,12	19,18	2,64	3,14
14	0,05	0,108	0,00	0,4	26	20	9,97	11,87	3,37	4,00
15	0,14	0,108	0,00	0,4	26	20	19,44	23,13	2,31	2,74
16	0,01	0,108	0,00	0,4	26	20	3,44	4,10	4,28	5,10
17	0,02	0,108	0,00	0,4	26	20	4,39	5,22	4,14	4,93
18	0,02	0,108	0,00	0,4	26	20	5,24	6,23	4,02	4,78
19	0,06	0,108	0,00	0,4	26	20	10,95	13,02	3,24	3,86
20	0,10	0,108	0,00	0,4	26	20	15,76	18,75	2,68	3,19
21	0,09	0,108	0,00	0,4	26	20	15,42	18,35	2,72	3,23
22	0,53	0,138	0,08	0,4	26	20	42,55	53,89	1,33	1,69
23	0,13	0,108	0,00	0,4	26	20	18,98	22,58	2,35	2,80
24	0,19	0,122	0,04	0,4	26	20	24,66	30,22	2,19	2,68
25	0,02	0,108	0,00	0,4	26	20	5,81	6,91	3,93	4,68
26	0,13	0,108	0,00	0,4	26	20	18,29	21,76	2,42	2,88
27	0,16	0,108	0,00	0,4	26	20	20,97	24,96	2,16	2,57
28	0,005	0,108	0,00	0,4	26	20	1,32	1,56	4,62	5,50
29	0,62	0,138	0,08	0,4	26	20	44,92	56,89	1,22	1,54

### 6.2.3.2 Equação *ln ln* (São Simão)

No cálculo da intensidade de precipitação pela equação do tipo *ln ln* para a localidade de São Simão, os parâmetros variam de acordo com o município e a duração da precipitação, que foi considerada em intervalos. Portanto, foram utilizados os coeficientes referentes ao intervalo de duração de 10 a 60 minutos, já que o maior tempo de concentração calculado foi de aproximadamente 37 minutos, ainda que a maior parte das bacias (24 de um total de 29 bacias) apresentaram Tc inferior a 10 minutos.

Já que os coeficientes utilizados são iguais para todas as bacias, a seguir são apresentados os resultados das intensidades de precipitação calculadas pela equação tipo *ln ln* (Tabela 6.8).



**Tabela 6.8** – Intensidades de precipitação obtidas pela equação tipo  $\ln \ln$  para o município de São Simão

Bacia	i (mm/min)	
	10 anos	50 anos
01	2,55	3,11
02	2,56	3,12
03	2,26	2,77
04	1,74	2,15
05	2,22	2,73
06	2,73	3,33
07	2,11	2,59
08	2,83	3,45
09	2,74	3,34
10	2,43	2,98
11	2,34	2,86
12	1,49	1,85
13	2,30	2,81
14	2,57	3,14
15	2,13	2,62
16	2,80	3,42
17	2,77	3,38
18	2,74	3,35
19	2,53	3,09
20	2,31	2,83
21	2,33	2,85
22	1,29	1,62
23	2,16	2,64
24	1,97	2,42
25	2,72	3,33
26	2,19	2,68
27	2,05	2,52
28	2,87	3,50
29	1,20	1,51

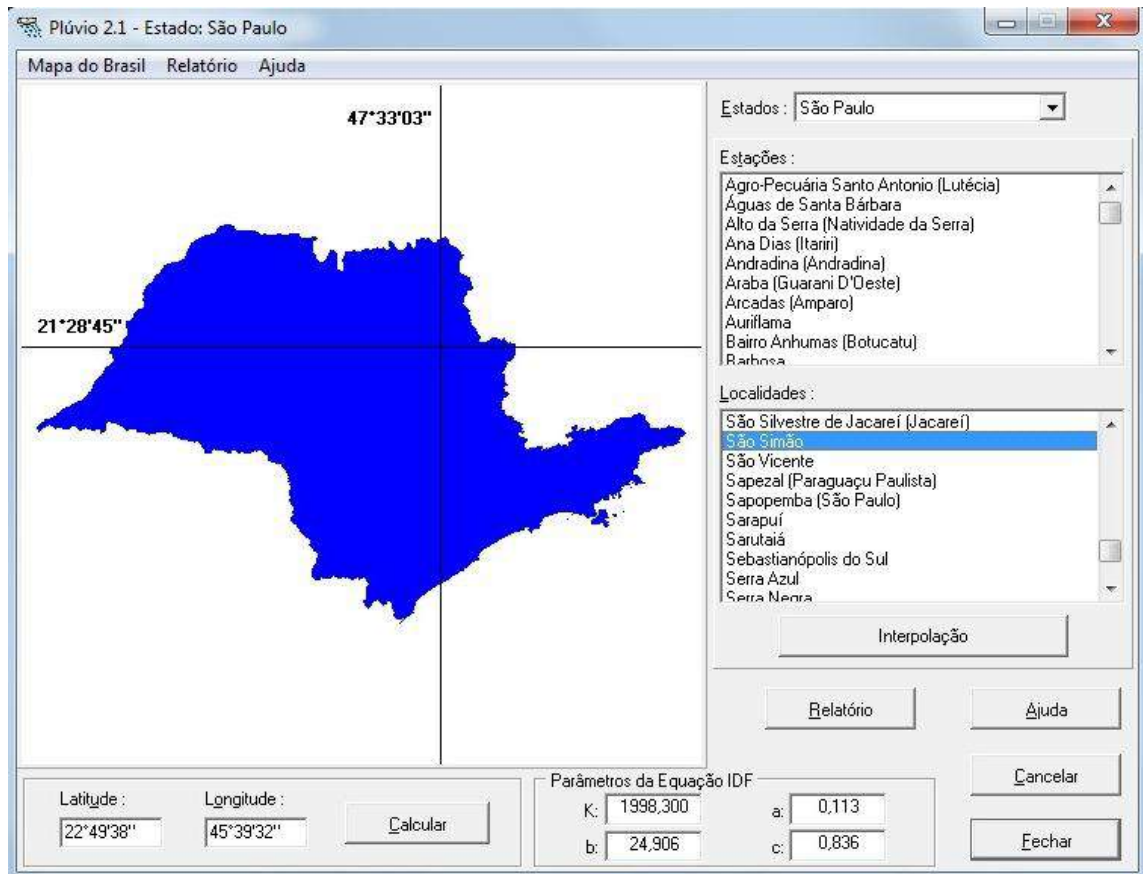
### 6.2.3.3 Software Plúvio 2.1 (São Simão e Cravinhos)

O *software* Plúvio 2.1 forneceu os parâmetros  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  para as localidades de São Simão e Cravinhos. Os parâmetros fornecidos pelo programa para a localidade de São Simão para  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são 1998,300, 0,113, 24,906 e 0,836, respectivamente (Figura 6.8):

Os resultados da equação de intensidade de precipitação do município de São Simão são apresentados na Tabela 6.9.

**Tabela 6.9** – Intensidades de precipitação obtidas pela equação dada pelo *software* Plúvio 2.1 para o município de São Simão

Bacia	i (mm/min)	
	10 anos	50 anos
01	2,66	3,19
02	2,67	3,20
03	2,42	2,90
04	1,93	2,32
05	2,39	2,86
06	2,80	3,36
07	2,29	2,74
08	2,88	3,46
09	2,81	3,37
10	2,57	3,08
11	2,48	2,98
12	1,68	2,02
13	2,45	2,94
14	2,68	3,21
15	2,30	2,76
16	2,86	3,43
17	2,84	3,40
18	2,82	3,38
19	2,64	3,17
20	2,46	2,95
21	2,48	2,97
22	1,48	1,77
23	2,32	2,79
24	2,15	2,58
25	2,80	3,36
26	2,35	2,82
27	2,23	2,68
28	2,91	3,49
29	1,37	1,65



**Figura 6.8** – Parâmetros do *software* Plúvio 2.1 para o município de São Simão

Para o município de Cravinhos, foram fornecidos os seguintes parâmetros (Figura 6.9) para  $K$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$ : 1996,944, 0,112, 24,947 e 0,836, respectivamente.

Os resultados da equação de intensidade de precipitação do município de Cravinhos são apresentados na Tabela 6.10.

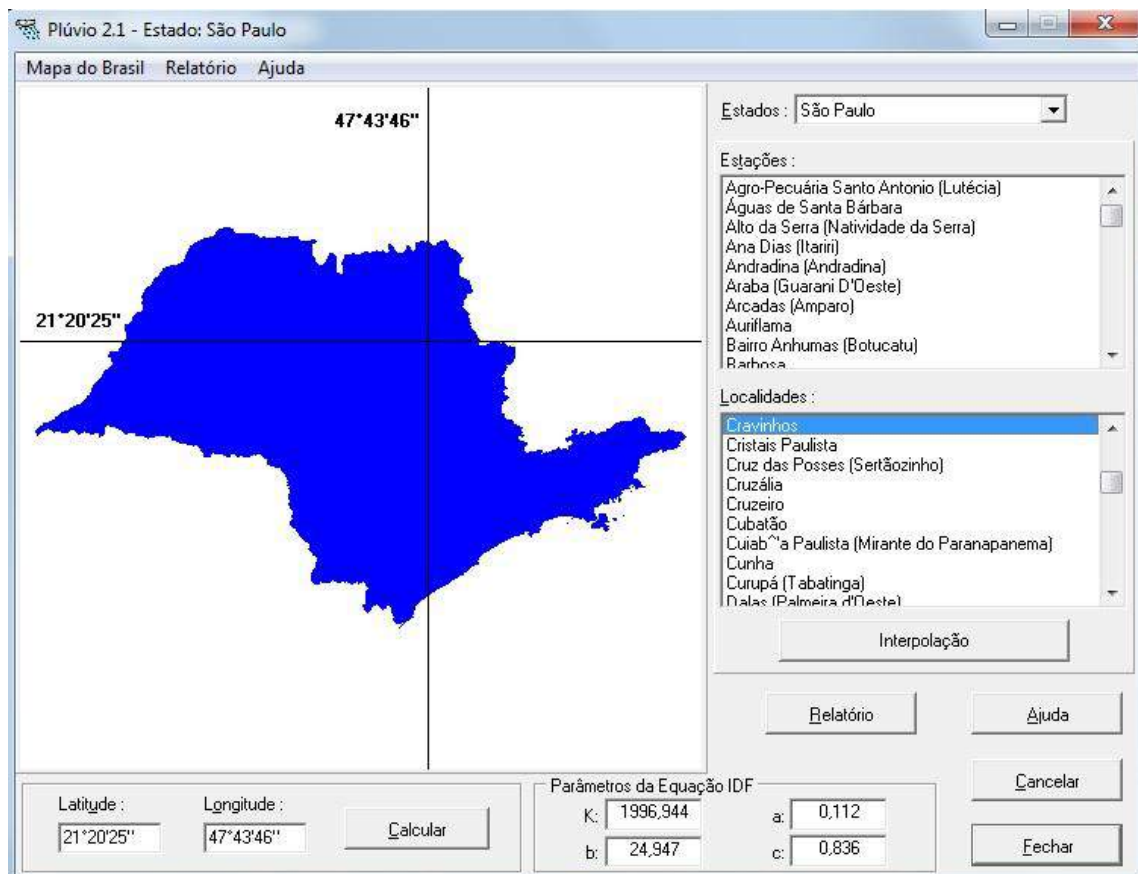


Figura 6.9 – Parâmetros do *software* Plúvio 2.1 para o município de Cravinhos

Tabela 6.10 – Intensidades de precipitação obtidas pela equação dada pelo *software* Plúvio 2.1 para o município de Cravinhos (continua)

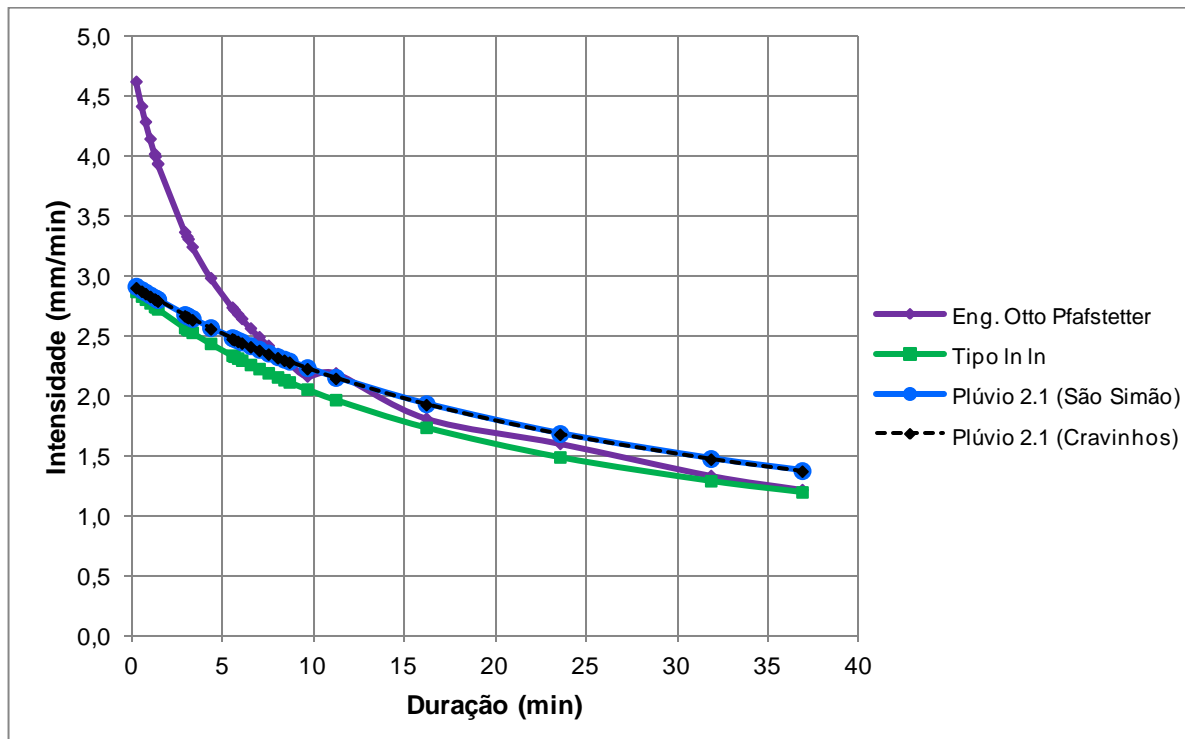
Bacia	i (mm/min)	
	10 anos	50 anos
01	2,65	3,17
02	2,65	3,18
03	2,41	2,88
04	1,92	2,30
05	2,38	2,85
06	2,79	3,34
07	2,28	2,73
08	2,87	3,44
09	2,80	3,35
10	2,56	3,06
11	2,47	2,96
12	1,68	2,01
13	2,44	2,92
14	2,66	3,19
15	2,29	2,75
16	2,85	3,41
17	2,83	3,38
18	2,80	3,36
19	2,63	3,15

(conclusão)

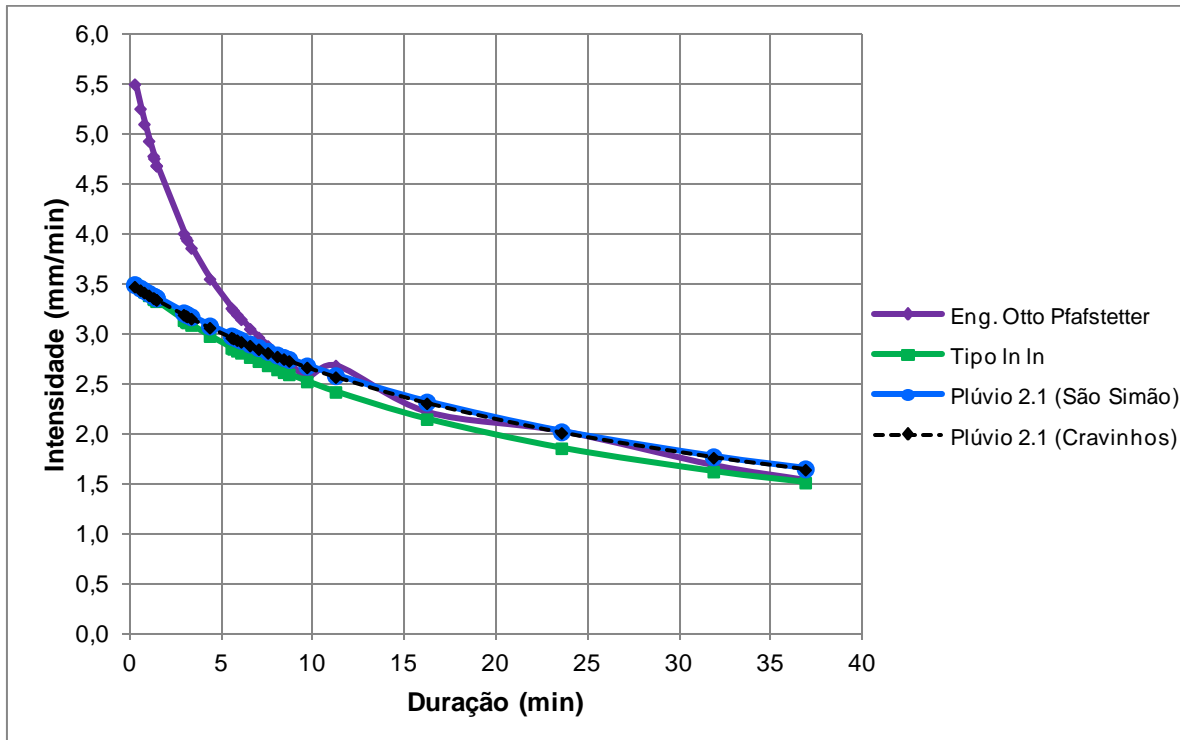
Bacia	i (mm/min)	
	10 anos	50 anos
20	2,45	2,94
21	2,47	2,95
22	1,47	1,76
23	2,31	2,77
24	2,14	2,57
25	2,79	3,34
26	2,35	2,81
27	2,22	2,66
28	2,90	3,47
29	1,37	1,64

#### 6.2.3.4 Comparação dos resultados de intensidade de precipitação

Foi realizada uma comparação para definir qual equação para obtenção da intensidade de precipitação máxima é a mais adequada dentre as que estavam disponíveis para a localidade em estudo. Para visualizar melhor as diferenças nos resultados, foram plotadas curvas de intensidade *versus* duração da precipitação, para os períodos de retorno de 10 e 50 anos. Os gráficos são apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11.



**Figura 6.10** – Gráfico intensidade x duração da precipitação. Período de retorno de 10 anos



**Figura 6.11** – Gráfico intensidade x duração da precipitação. Período de retorno de 50 anos

Observa-se que, em ambos os períodos de retorno, para chuvas com duração de até aproximadamente 7 minutos, as intensidades obtidas pela equação Eng. Otto Pfafstetter são bastante superiores às intensidades calculadas pelas outras equações. Para durações superiores a 7 minutos, os valores das intensidades calculadas pelas diferentes equações passam a se aproximar. No entanto, os valores dados pela equação tipo *ln ln* ainda mantêm-se um pouco inferiores quando comparados aos valores de intensidade obtidos pela equação Eng. Otto Pfafstetter e pelo *software* Plúvio 2.1.

Também nota-se que os resultados da equação do Plúvio 2.1 para os municípios de Cravinhos e São Simão são muito próximos, devido à interpolação utilizada pelo programa, que se baseia nas distâncias dos postos pluviométricos utilizados para o levantamento de dados. Assim, cidades vizinhas apresentam parâmetros muito semelhantes para serem utilizados na equação. Neste caso, as intensidades de São Simão são, em média, 0,4% superiores às de Cravinhos para o período de retorno de 10 anos, e 0,6% superiores para o período de retorno de 50 anos.

Para definir qual equação é mais representativa da intensidade de precipitação máxima na área de estudo, foram consideradas as extensões das séries de dados pluviométricos e pluviográficos utilizados na determinação das equações, bem como se o período observado é mais ou menos recente. Séries de dados mais longas permitem ajustes

de parâmetros mais precisos, enquanto a utilização de séries históricas reduzidas aumenta as chances de resultados tendenciosos (DOURADO NETO *et al.*, 2005).

A utilização de uma série com dados mais recentes também influencia, já que o desenvolvimento das áreas urbanas com o passar do tempo pode alterar a frequência das precipitações convectivas, devido à redução do albedo causada pela retirada da vegetação, além do aumento na emissão de gases na atmosfera (ZUFFO, 2004).

Assim, ao analisar as equações de chuvas intensas disponíveis para a localidade em estudo, observa-se que Pfafstetter (1982) utilizou períodos de dados muito curtos, de aproximadamente 10 anos. Ainda, os registros datam de até 1957, portanto são muito antigos, e a reedição em 1982 não sofreu alterações nos dados (GENOVEZ; ZUFFO, 2000).

A equação tipo *In In* elaborada por Magni e Mero (1982) utiliza série de dados mais longas, porém os dados também não são recentes, já que foram levantados até 1982. Ainda, os parâmetros foram definidos para precipitações com duração mínima de 10 minutos, e algumas durações obtidas neste trabalho são inferiores a 10 minutos.

Logo, a equação fornecida pelo *software* Plúvio 2.1 parece ser a mais adequada para utilização no cálculo das vazões máximas. Segundo Duarte *et al.* (2011), os dados utilizados para a base do programa Plúvio (SILVA *et al.*, 1999) não possuem séries tão longas quanto as utilizadas no trabalho e Martinez Junior e Magni (1999), mas como o segundo não contempla as localidades da área de estudo, optou-se por utilizar as intensidades de precipitação calculadas a partir dos parâmetros fornecidos pelo programa Plúvio 2.1.

Apesar da diferença nas intensidades de precipitação de São Simão e Cravinhos (Plúvio 2.1) não ser significativa, optou-se por utilizar os valores para cada bacia de acordo com o município onde a mesma está inserida. A Tabela 6.11 apresenta os valores de intensidade de precipitação selecionados para o cálculo das vazões máximas.

**Tabela 6.11** – Intensidades de precipitação utilizadas nos cálculos das vazões máximas

(continua)

Bacia	Município	i (mm/min)	
		10 anos	50 anos
01	Cravinhos	2,65	3,17
02	Cravinhos	2,65	3,18
03	Cravinhos	2,41	2,88
04	Cravinhos	1,92	2,30
05	Cravinhos	2,38	2,85
06	Cravinhos	2,79	3,34
07	Cravinhos	2,28	2,73
08	Cravinhos	2,87	3,44
09	Cravinhos	2,80	3,35
10	Cravinhos	2,56	3,06

(conclusão)

Bacia	Município	i (mm/min)	
		10 anos	50 anos
11	Cravinhos	2,47	2,96
12	São Simão	1,68	2,02
13	São Simão	2,45	2,94
14	São Simão	2,68	3,21
15	São Simão	2,30	2,76
16	São Simão	2,86	3,43
17	São Simão	2,84	3,40
18	São Simão	2,82	3,38
19	São Simão	2,64	3,17
20	São Simão	2,46	2,95
21	São Simão	2,48	2,97
22	São Simão	1,48	1,77
23	São Simão	2,32	2,79
24	São Simão	2,15	2,58
25	São Simão	2,80	3,36
26	São Simão	2,35	2,82
27	São Simão	2,23	2,68
28	São Simão	2,91	3,49
29	São Simão	1,37	1,65

#### 6.2.4 Cálculo das vazões máximas

A seguir são apresentados os resultados dos cálculos das vazões máximas, primeiramente das bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>, com utilização do Método Racional, e em seguida, das bacias maiores, com área superior a 2 km<sup>2</sup>, pelo Método Racional Modificado. As bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup> são: 4, 12, 22 e 29. O restante das bacias possui área inferior.

##### 6.2.4.1 Bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>

Para o cálculo das vazões máximas nas bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>, foi utilizado o Método Racional (Equação 4.10). Tais bacias também possuem área inferior a 50 ha, portanto, o coeficiente de distribuição de chuva  $D$  presente na fórmula recebeu valor unitário em todas as bacias.

Os valores utilizados nos cálculos e os resultados das vazões máximas são apresentados na Tabela 6.12.



**Tabela 6.12** – Cálculo das vazões máximas das bacias com  $A < 2\text{km}^2$ 

Bacia	Área (ha)	C	i (mm/min)		Q (m <sup>3</sup> /s)	
			10 anos	50 anos	10 anos	50 anos
01	0,01	0,32	2,65	3,17	0,001	0,002
02	7,50	0,34	2,65	3,18	1,125	1,348
03	26,17	0,39	2,41	2,88	4,121	4,935
05	9,17	0,47	2,38	2,85	1,690	2,024
06	5,17	0,29	2,79	3,34	0,707	0,846
07	20,72	0,29	2,28	2,73	2,266	2,714
08	5,06	0,28	2,87	3,44	0,686	0,822
09	6,17	0,34	2,80	3,35	0,987	1,182
10	18,86	0,33	2,56	3,06	2,614	3,130
11	7,20	0,46	2,47	2,96	1,359	1,627
13	17,21	0,31	2,45	2,94	2,157	2,587
14	6,18	0,27	2,68	3,21	0,757	0,908
15	16,22	0,26	2,30	2,76	1,650	1,979
16	0,01	0,24	2,86	3,43	0,001	0,001
17	7,94	0,28	2,84	3,40	1,042	1,250
18	6,51	0,28	2,82	3,38	0,851	1,021
19	6,00	0,25	2,64	3,17	0,654	0,784
20	0,13	0,23	2,46	2,95	0,012	0,015
21	13,71	0,28	2,48	2,97	1,555	1,866
23	5,24	0,23	2,32	2,79	0,457	0,548
24	0,14	0,26	2,15	2,58	0,013	0,015
25	12,12	0,24	2,80	3,36	1,333	1,598
26	9,31	0,23	2,35	2,82	0,825	0,989
27	28,47	0,23	2,23	2,68	2,473	2,966
28	6,25	0,25	2,91	3,49	0,751	0,901

Observa-se que os valores de vazão máxima variaram de 0,001 a 4,121 m<sup>3</sup>/s para um período de retorno de 10 anos e de 0,001 a 4,935 m<sup>3</sup>/s para um tempo de recorrência de 50 anos. Conforme mencionado anteriormente, todas as bacias geradas pelo programa foram consideradas nos cálculos de vazões de cheia, porém algumas bacias existem apenas teoricamente, ou seja, foram delimitadas pelo programa, mas não apresentaram uma configuração bem estabelecida em campo.

No entanto, mesmo sem uma delimitação visível, tais bacias são igualmente capazes de gerar escoamento superficial, condicionado, evidentemente, às características de uso e ocupação do solo, materiais inconsolidados, entre outras. Portanto, é necessário considerar todos os valores de vazão máxima calculados para as travessias, que foram incluídas no estudo pelos critérios estabelecidos na aplicação do método proposto.

#### 6.2.4.1 Bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup>

##### a) Método de McMath

O cálculo das vazões máximas pela fórmula de McMath baseia-se na Equação 4.12. Primeiramente, foi necessário estabelecer o coeficiente de escoamento de McMath, a partir da soma de três coeficientes parciais, de acordo com a Tabela 4.7.

Na Tabela 6.13 são apresentados os coeficientes de escoamento de McMath para as quatro bacias, cujos coeficientes parciais foram atribuídos conforme as características predominantes de cada bacia.

**Tabela 6.13** – Cálculo do coeficiente de escoamento de McMath

Bacia	Tipo de cobertura vegetal		Tipo de solo		Condições topográficas		Coeficiente de escoamento de McMath
04	Cobertura vegetal intensa	0,12	Textura média	0,16	Ligeiramente ondulada	0,06	<b>0,34</b>
12	Área coberta de gramíneas	0,08	Textura pesada (argilosa)	0,22	Ligeiramente ondulada	0,06	<b>0,36</b>
22	Área coberta de gramíneas	0,08	Textura média	0,16	Área plana	0,04	<b>0,28</b>
29	Área coberta de gramíneas	0,08	Textura média	0,16	Ligeiramente ondulada	0,06	<b>0,30</b>

Após a obtenção do coeficiente de escoamento de McMath, as vazões máximas nas bacias foram calculadas pela equação do respectivo método. Os resultados são apresentados na Tabela 6.14.

**Tabela 6.14** – Cálculo das vazões máximas pelo método de McMath

Bacia	Área (ha)	C	S (m/m)	i (mm/h)		Q (m <sup>3</sup> /s)	
				10 anos	50 anos	10 anos	50 anos
04	240,44	0,34	0,066	115,44	138,25	16,67	19,96
12	517,13	0,36	0,045	101,00	121,14	26,38	31,64
22	822,69	0,28	0,034	88,50	106,16	24,64	29,56
29	801,76	0,30	0,041	82,45	98,90	25,04	30,03

##### b) Método Racional com coeficiente de retardo ( $\varphi$ )

O cálculo das vazões máximas pelo Método Racional com coeficiente de retardo foi realizado a partir da Equação 4.13. Os resultados são apresentados na Tabela 6.15 a seguir.

**Tabela 6.15** – Cálculo das vazões máximas pelo método racional com coeficiente de retardo

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	C	i (mm/h)		φ	Q (m <sup>3</sup> /s)	
			10 anos	50 anos		10 anos	50 anos
04	2,40	0,39	115,44	138,25	0,401	12,15	14,55
12	5,17	0,30	101,00	121,14	0,353	15,16	18,18
22	8,23	0,27	88,50	106,16	0,327	18,14	21,76
29	8,02	0,27	82,45	98,90	0,328	16,09	19,30

c) Método Racional com expoente redutor de área (D)

Tal método baseia-se na Equação 4.15, que considera um expoente  $D$  aplicado à área da bacia, igual a 1 se a área for inferior a 50 ha, e igual a 0,9 se a área for superior. Como as bacias tem áreas maiores que 50 ha, o expoente aplicado foi igual a 0,9. Os resultados dos cálculos são apresentados na Tabela 6.16.

**Tabela 6.16** – Cálculo das vazões máximas pelo método racional com expoente redutor de área

Bacia	Área (ha)	C	i (mm/h)		D	Q (m <sup>3</sup> /s)	
			10 anos	50 anos		10 anos	50 anos
04	240,44	0,39	115,44	138,25	0,9	17,50	20,96
12	517,13	0,30	101,00	121,14	0,9	22,97	27,56
22	822,69	0,27	88,50	106,16	0,9	28,36	34,02
29	801,76	0,27	82,45	98,90	0,9	25,11	30,12

A partir dos cálculos das vazões de cheia realizados por diferentes métodos, é possível comparar os valores obtidos com cada equação, para os tempos de retorno de 10 anos (Tabela 6.17) e de 50 anos (Tabela 6.18).

**Tabela 6.17** – Comparação das vazões máximas calculadas para as bacias com  $A > 2$  km<sup>2</sup> (tempo de retorno de 10 anos)

Bacia	Q (m <sup>3</sup> /s)		
	Método de McMath	Método racional com coef. de retardo	Método racional com expoente redutor de área
4	16,67	12,15	17,50
12	26,38	15,16	22,97
22	24,64	18,14	28,36
29	25,04	16,09	25,11

**Tabela 6.18** – Comparação das vazões máximas calculadas para as bacias com  $A > 2 \text{ km}^2$  (tempo de retorno de 50 anos)

Bacia	Q (m <sup>3</sup> /s)		
	Método de McMath	Método racional com coef. de retardo	Método racional com expoente redutor de área
4	19,96	14,55	20,96
12	31,64	18,18	27,56
22	29,56	21,76	34,02
29	30,03	19,30	30,12

Observa-se que, em ambos os períodos de retorno, os menores valores de vazões máximas são dados pelo Método Racional com coeficiente de retardo. Quanto ao Método de McMath e o Método Racional com expoente redutor de área, o primeiro apresenta em sua equação o valor da área elevado a um expoente igual a 0,8. Já o segundo método apresenta o valor da área elevado a um expoente igual a 0,9. Quanto menor o expoente, maior será a redução da área. Assim, o Método de McMath resulta em uma redução mais significativa da área, além de considerar também a declividade no talvegue principal da bacia. Portanto, o Método de McMath tende a fornecer valores menores de vazões máximas quando comparado ao Método Racional com expoente redutor de área.

No entanto, como o coeficiente de escoamento superficial de McMath é calculado de forma diferente, o mesmo pode resultar em valores superiores ao coeficiente de *runoff* tabelado do Método Racional. Se o valor do coeficiente de McMath for maior, é possível que tal método resulte em valores de vazões máximas superiores. Logo, a comparação dos valores resultantes de cada método depende dos diversos fatores mencionados. É importante ressaltar que cada método utiliza diferentes recursos matemáticos para que a vazão não sofra um aumento linear com o aumento da área da bacia.

A escolha do cálculo das vazões de cheia pelo Método Racional e Racional Modificado foi devido à facilidade de emprego dos mesmos, e também porque são métodos bastante usuais e reconhecidos. Contudo, tais métodos, apesar de apresentar resultados bastante satisfatórios para bacias menores, podem superestimar os valores e vazões máximas no caso de bacias maiores, mesmo com a utilização de correções da fórmula. Para aplicação do método proposto em fases iniciais de projeto, nas quais é possível trabalhar apenas com estimativa de valores e não há necessidade de cálculos com elevada precisão, os resultados obtidos com os métodos citados podem ser adequados. Porém, no caso de dimensionamento de dispositivos de drenagem, para os quais são necessários resultados mais rigorosos, aponta-se a necessidade de utilizar métodos mais apropriados, a fim de evitar que as vazões de cheia sejam superestimadas, causando desperdícios de recursos do empreendimento.

### 6.3 Validação dos resultados em campo

Foi realizada uma vistoria na área de estudo para verificar se o modelo hidrológico elaborado no SIG representava adequadamente o comportamento do escoamento superficial. Também foram observadas as características das bacias e como as mesmas influenciam no deflúvio: área, uso e ocupação do solo, materiais inconsolidados, declividade, cobertura vegetal entre outras.

Foram levantados 21 pontos de controle de superfície (Tabela 6.19), que foram registrados e georreferenciados com auxílio do GPS portátil e da base cartográfica. A cada ponto, foram realizadas comparações do cenário observado com o modelo hidrológico. Em alguns pontos também foi realizado o registro fotográfico.

**Tabela 6.19** – Pontos de controle levantados na vistoria em campo

(continua)

Ponto	Coordenadas		Observações
	E	N	
01	213.135	7.637.818	Exutório da Bacia 01 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 175,8 do oleoduto OSBRA.
02	213.846	7.638.205	Rodovia SP-271, na Bacia 02.
03	214.503	7.637.865	Rodovia SP-271, na Bacia 03. Próximo à área urbana de Cravinhos.
04	215.089	7.637.581	Rodovia SP-271, na Bacia 04. Próximo à área urbana de Cravinhos.
05	216.648	7.636.557	Rodovia SP-271, na Bacia 04. Próximo à área urbana de Cravinhos.
06	214.185	7.637.213	Exutório da Bacia 03 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 174,8 do oleoduto OSBRA.
07	215.046	7.636.516	Exutório da Bacia 04 (acesso via estrada rural). Entre as estacas 173,3 e 173,8 do oleoduto OSBRA. Presença de drenagem perene no exutório.
08	218.943	7.634.069	Rodovia SP-330, na Bacia 05. Próximo à estaca 169,3 do oleoduto OSBRA.
09	219.183	7.633.538	Exutório da Bacia 07, na rodovia SP-330.
10	219.996	7.632.767	Rodovia SP-330, na Bacia 12.
11	219.749	7.633.538	Exutório da Bacia 10 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 167,8 do oleoduto OSBRA.
12	225.061	7.627.629	Rodovia SP-330, na Bacia 29.
13	227.476	7.628.205	Exutório da Bacia 29 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 158,3 do oleoduto OSBRA. Presença de drenagem perene no exutório.
14	224.636	7.628.637	Próximo à rodovia SP-330, na Bacia 22.
15	223.239	7.630.498	Rodovia SP-330, na Bacia 22.
16	224.261	7.630.712	Próximo ao exutório da Bacia 22 (acesso via estrada rural).

(conclusão)

Ponto	Coordenadas		Observações
	E	N	
17	223.774	7.631.529	Próximo ao exutório da Bacia 21 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 163,3 do oleoduto OSBRA.
18	223.215	7.631.861	Exutório das Bacias 17 e 18 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 163,8 do oleoduto OSBRA.
19	222.518	7.632.264	Acesso via estrada rural. Próximo à estaca 164,3 do oleoduto OSBRA.
20	222.038	7.632.550	Exutório da Bacia 14 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 164,8 do oleoduto OSBRA.
21	221.408	7.632.932	Exutório da Bacia 12 (acesso via estrada rural). Próximo à estaca 165,3 do oleoduto OSBRA.

Os pontos de controle de superfície foram inseridos no banco de dados do SIG, juntamente com os pontos levantados por Augusto Filho (2008) e Gimenes (2013). Assim, além das observações de superfície, o banco possui informações de localização de pontos de sondagens a trado, sondagem elétrica vertical (SEV) e dispositivos do oleoduto (válvulas de segurança, pontos de tomada e retificador).

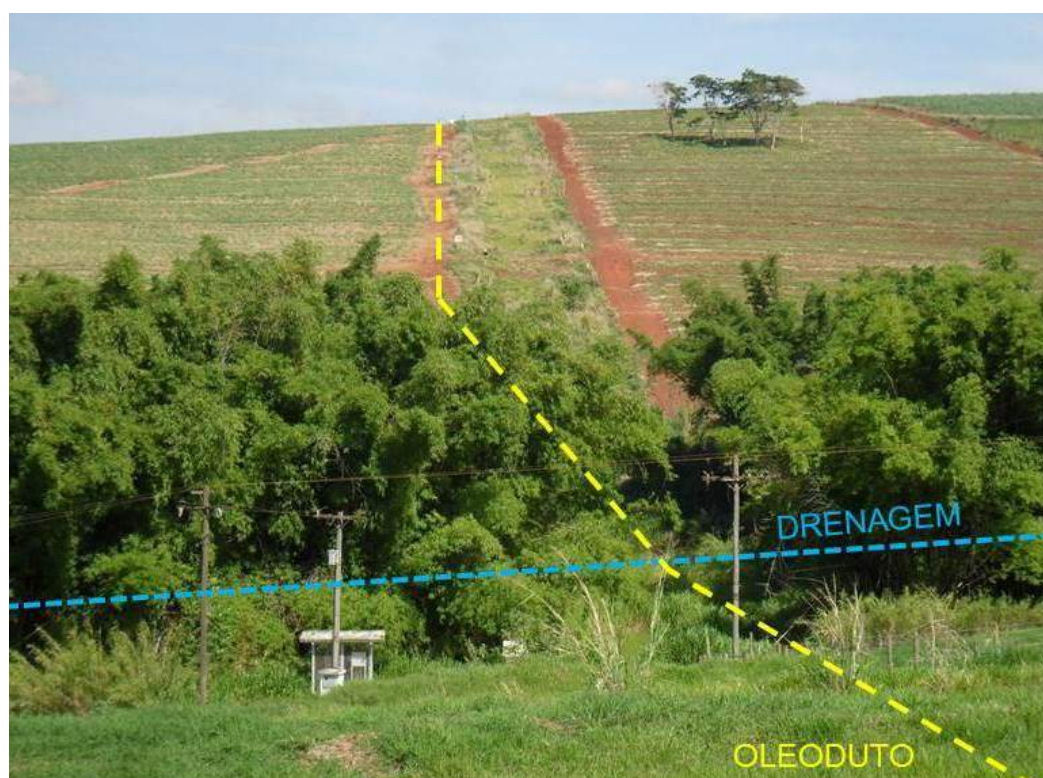
Os pontos de observação levantados na pesquisa, somados aos pontos dos levantamentos anteriores, totalizaram 105 locais de controle na área de estudo (83,99 km<sup>2</sup>), o que resulta em uma densidade média de amostragem de 1,25 pontos/km<sup>2</sup>. Segundo Zuquette (1987), tal densidade de amostragem é superior à mínima necessária para o mapeamento de detalhe na escala 1:25.000 (0,4 ponto/km<sup>2</sup>). Porém, é inferior à mínima definida para a escala 1:10.000 (10 pontos/km<sup>2</sup>), que é a escala original do trabalho.

As bacias de contribuição delimitadas pelo programa foram identificadas na área de estudo a partir dos desníveis do terreno. Nas bacias maiores (área de aproximadamente 10 ha ou superior), ficou evidenciada a maior profundidade da linha do talvegue principal, como é o caso da Bacia 02 (Figura 6.12). Já nas bacias com área inferior, a diferença de nível observada foi mais sutil.

A validação do modelo foi realizada pela identificação das bacias contribuintes delimitadas, já que as linhas de fluxo do escoamento superficial são visíveis apenas nos locais onde há drenagens perenes. Visto que a área de estudo é predominantemente formada por divisores de água, apenas duas bacias apresentaram drenagens perenes nos exutórios: a Bacia 04 (Figuras 6.13 e 6.14) e a Bacia 29 (Figuras 6.15 e 6.16). A presença das drenagens perenes está condicionada, principalmente, ao tipo de relevo, de solo e de uso e ocupação do terreno. No geral, nas bacias com baixa declividade e solos predominantemente arenosos, não houve ocorrência de drenagens perenes nos exutórios.



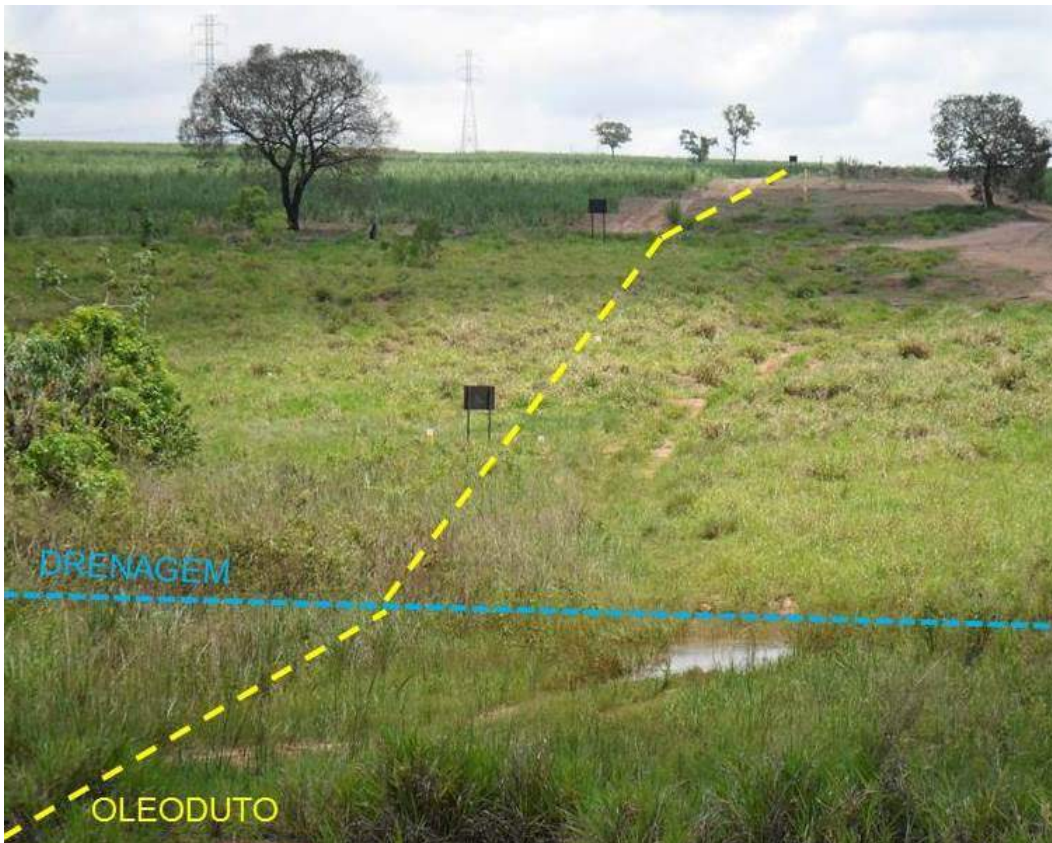
**Figura 6.12** – Exutório da Bacia 02



**Figura 6.13** – Exutório da Bacia 04



**Figura 6.14** – Drenagem perene no exutório da Bacia 04



**Figura 6.15** – Exutório da Bacia 29





**Figura 6.16** – Drenagem perene no exutório da Bacia 29

No geral, a validação em campo das bacias de contribuição delimitadas pelo programa ArcGIS foi bastante satisfatória, demonstrando compatibilidade com as bacias identificadas visualmente na localidade de estudo. Porém, em algumas bacias, com áreas menores (inferiores a 10 ha) e exutórios muito próximos, houve dificuldade na identificação. Tal conflito ocorreu porque todas as interseções das linhas de fluxo do escoamento superficial com o traçado do oleoduto foram consideradas como exutórios, e a ferramenta *Watershed* delimita, necessariamente, uma bacia para cada exutório. Contudo, foi observado em campo que tais bacias pertencem, na realidade, a uma mesma bacia de contribuição.

Outra limitação do método proposto observada em campo foi a influência de elementos que não constam na base cartográfica, mas que alteram, mesmo que sutilmente, a topografia do local. Os principais casos observados foram as rodovias, estradas rurais, pequenas barreiras de solo em plantações para contenção das águas pluviais e dispositivos de drenagem urbana e rodoviária. É o caso da Bacia 02, que possui interferência da rodovia SP-270 e de uma estrada rural (Figuras 6.17 e 6.18). Tais elementos podem não constar na base cartográfica devido à escala de trabalho, à resolução das fotografias digitais aéreas ou até mesmo porque surgiram após o levantamento topográfico.

A presença de tais elementos modifica o comportamento do escoamento superficial, pois desvia ou intercepta o deflúvio e, assim, a área a montante do elemento é

drenada para outro local e passa a não contribuir mais para a bacia na qual havia sido inserida pelo programa. Portanto, para evitar que tais ocorrências conduzam a erros no modelo hidrológico, é necessário realizar uma verificação em campo com a finalidade de identificar estruturas que possam alterar o escoamento superficial e que podem não constar na base cartográfica.



**Figura 6.17** – Estrada rural que intercepta a Bacia 02



**Figura 6.18** – Rodovia SP-270 interceptando a Bacia 02

#### 6.4 Mapas de Vazões Máximas

Os resultados obtidos da aplicação do método estruturado na presente pesquisa são apresentados no Mapa de Vazões Máximas para Período de Retorno de 10 anos (APÊNDICE B) e no Mapa de Vazões Máximas para Período de Retorno de 50 anos (APÊNDICE C).

Ambos os mapas contém as linhas de fluxo do escoamento superficial com área mínima de contribuição igual a 5 hectares e a delimitação das bacias contribuintes, obtidas por meio das ferramentas disponíveis no programa ArcGIS 9.3. As linhas de fluxo extraídas a partir da área mínima de contribuição estabelecida apresentam um nível de detalhe bastante elevado, que em alguns locais está demasiadamente minucioso, como no caso das linhas de fluxo que se constituem numa reta. A ocorrência de tais resultados está relacionada principalmente à resolução do MDE, que foi o PI inicial para a obtenção da direção e posterior acumulação de fluxo, da qual foram extraídas as referidas linhas.

Portanto, o detalhamento das linhas de fluxo do escoamento superficial do modelo hidrológico não representa necessariamente um fluxo acumulado que constitui um canal de drenagem, mas indica, teoricamente, qual trajeto seria percorrido pelas águas pluviais na superfície do terreno, considerando a resolução da base cartográfica digital, a escala de trabalho e outros critérios utilizados para determinação da área mínima de contribuição.

Analogamente, a delimitação das bacias contribuintes também é realizada a partir do *raster* de direção de fluxo e, portanto, apresentou-se excessivamente detalhada em algumas bacias, principalmente naquelas com área inferior a 10 ha. Destaca-se o caso das Bacias 01, 16, 20 e 24, que foram delimitadas pelo programa, no entanto são formadas apenas por algumas células cujo fluxo é direcionado aos respectivos exutórios, constituindo, assim, bacias apenas teóricas.

Os valores de vazões máximas calculados para as bacias, para os períodos de retorno de 10 e de 50 anos, são apresentados em intervalos, segundo a classificação pelo método *Natural Breaks (Jenks)*. O método realiza a classificação com a divisão dos dados em classes baseadas na distribuição de frequências, buscando identificar os pontos de quebra que melhor agrupam valores similares e, simultaneamente, maximizam a diferença entre as classes.

Os valores de vazões máximas foram divididos em cinco classes, e foram classificados em muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto, de acordo com o intervalo no qual estão inseridos, para cada período de retorno. Os valores de vazões de cheia apresentados nos mapas referem-se ao cálculo pelo Método Racional, nas bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>, e pelo Método Racional com coeficiente de retardo, para as bacias com

área superior, já que o mesmo apresentou os valores mais razoáveis para ambos os períodos de retorno. Possivelmente, o Método de McMath e o Método Racional com expoente redutor de área superestimaram as vazões máximas, já que resultaram em valores consideravelmente superiores, principalmente quando comparados ao método escolhido para ser representado no mapa.

Para o período de retorno de 10 anos, os intervalos obtidos na classificação foram: muito baixo (0,001 a 0,013 m<sup>3</sup>/s), baixo (0,014 a 1,359 m<sup>3</sup>/s), médio (1,360 a 2,614 m<sup>3</sup>/s), alto (2,615 a 4,121 m<sup>3</sup>/s) e muito alto (4,122 a 18,140 m<sup>3</sup>/s).

Já para o tempo de recorrência de 50 anos, os intervalos foram: muito baixo (0,001 a 0,015 m<sup>3</sup>/s), baixo (0,016 a 1,627 m<sup>3</sup>/s), médio (1,628 a 3,130 m<sup>3</sup>/s), alto (3,131 a 4,935 m<sup>3</sup>/s) e muito alto (4,936 a 21,270 m<sup>3</sup>/s).

É possível observar nos Mapas de Vazões Máximas de ambos os períodos de retorno que as vazões aumentam proporcionalmente conforme a área das bacias, principalmente porque as características (uso e ocupação e materiais inconsolidados) e o regime pluviométrico das bacias não sofrem grandes variações na extensão da área de estudo. Assim, como os valores do coeficiente de escoamento superficial e da intensidade de precipitação possuem pouca variação de uma bacia para outra, a diferença entre os valores de vazão máxima é dada principalmente em função da área da bacia de contribuição.

Para ambos os tempos de recorrência, as Bacias 04, 12, 22 e 29, que são as bacias com as maiores áreas, tiveram as vazões máximas classificadas como muito altas. Somente a Bacia 03 apresentou vazão máxima classificada como alta. As Bacias 05, 07, 10, 13, 15, 21 e 27 tiveram os valores de vazão máxima classificados como médio. As Bacias 02, 06, 08, 09, 11, 14, 17, 18, 19, 23, 25, 26 e 28 apresentaram vazões máximas classificadas como baixas. Por fim, as Bacias 01, 16, 20 e 24 tiveram as vazões máximas classificadas como muito baixas, já que suas áreas são extremamente pequenas.

Quanto às diferenças dos valores calculados para o período de retorno de 10 e de 50 anos, sabe-se que os mesmos estão relacionados a um risco de projeto, definido em função dos danos que podem ser provocados se a precipitação máxima for superada. Assim, as vazões máximas calculadas para o tempo de recorrência de 50 anos são superiores às calculadas para o período de retorno de 10 anos, já que indicam a necessidade de uma estrutura de maior capacidade em função de um risco menor de falha, e conseqüentemente, custos mais elevados.

#### 6.4.1 Riscos de processos geológico-geotécnicos na área do oleoduto OSBRA

As vazões do escoamento superficial estão diretamente relacionadas à deflagração de processos geológico-geotécnicos, juntamente com outros fatores como a presença de cobertura vegetal, o relevo, o tipo de solo e condicionantes antrópicos. O escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte pode desencadear processos erosivos, escorregamentos, assoreamento, colapsos entre outros.

Assim, os valores das vazões máximas das bacias de contribuição constituem um importante PI para a inferência de riscos de eventos perigosos de natureza geológico-geotécnica desencadeados pela ação das águas pluviais na região da obra linear em estudo.

Após a identificação das bacias com valores mais elevados de vazões máximas, é necessário verificar quais as condições de tais travessias, observando em campo como as características da bacia podem deflagrar processos geológico-geotécnicos e como os mesmos podem ser evitados.

A Bacia 03, que teve as vazões máximas de ambos os períodos de retorno classificadas como altas, não apresentou nenhum risco evidente, já que as áreas com maior capacidade de gerar escoamento devido à impermeabilização (área urbana e faixas de vias) são drenadas pelos dispositivos de drenagem urbana e da rodovia. Assim, grande parte das águas precipitadas na área de contribuição da Bacia 03 é interceptada e conduzida por estes dispositivos até outro local de deságue e, portanto, não passam pelo exutório.

Quanto às bacias cujos valores de vazões máximas foram classificados como muito altos em ambos os períodos de retorno, as Bacias 04 e 29 apresentaram drenagens perenes nas travessias, conforme mencionado anteriormente, e que poderiam, portanto, contribuir com processos erosivos hídricos. Porém, visto que o oleoduto OSBRA encontra-se em operação desde 1999, o mesmo já possui medidas e dispositivos de segurança para realizar as travessias das drenagens. Nas Bacias 12 e 22, as travessias não apresentaram drenagens perenes, devido à baixa declividade do terreno e predominância de solos arenosos. Portanto, não foi identificado nenhum risco devido à ação das águas pluviais.

O restante das bacias, cujas vazões máximas foram classificadas como médias, baixas e muito baixas, não representaram riscos ao empreendimento, devido ao traçado do oleoduto ter sido posicionado ao longo dos divisores longitudinais principais, reduzindo os riscos de processos geológico-geotécnicos desencadeados pela ação das chuvas, bem como a necessidade de intervenção com dispositivos de segurança e outras medidas de caráter preventivo.

#### 6.4.2 Aplicação do método proposto em projeto de drenagem

Visto que o método estruturado também pode ser utilizado para fins de projetos de drenagem de obras civis lineares, a seguir foi realizada uma simulação para verificar quais dispositivos de drenagem seriam necessários para realizar a travessia das águas pluviais em uma obra civil linear, considerando hipoteticamente o traçado do oleoduto em estudo como de uma rodovia.

O Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006) apresenta as ferramentas necessárias para a adoção de medidas para proteção do corpo estradal, face à ação prejudicial das águas que o atingem, com destaque para os sistemas de drenagem de transposição de talwegues e de drenagem superficial, que são utilizados para prevenir que o escoamento superficial atinja a estrutura do pavimento.

Na transposição de talwegues, as águas pluviais são acumuladas nas bacias de contribuição, e devem realizar a travessia sob a rodovia de forma que não comprometa a estrutura da mesma. Tal travessia pode ser realizada com bueiros, pontilhões ou pontes. No entanto, não há um consenso no âmbito técnico a respeito da utilização de cada obra para uma determinada situação. Tomaz (2015) afirma que isso se trata de uma decisão de custos e benefícios, já que os bueiros e pontes se distinguem em termos econômicos, hidráulicos, aspectos estruturais e manutenção.

A drenagem superficial tem por objetivo interceptar e captar as águas provenientes das áreas adjacentes à rodovia, conduzindo-as ao deságue seguro. Existem diversos tipos de dispositivos para a drenagem superficial: valetas, sarjetas, descidas d'água, saídas d'água, caixas coletoras, bueiros de greide, dissipadores de energia, entre outros.

É necessário conhecer o comportamento do escoamento superficial na área de implantação da obra linear, bem como as vazões máximas das bacias de contribuição, para determinar qual dispositivo é mais adequado para a condução das águas pluviais, de modo que o projeto de drenagem apresente uma boa relação entre custo e benefício.

É importante ressaltar que, para definir qual dispositivo de drenagem será utilizado, é necessário fazer um estudo de viabilidade técnico-econômica, pois é possível que os custos e dificuldades de execução tornem o projeto inexecutável.

De forma geral, as escolhas referentes a um projeto de drenagem devem considerar os custos de construção, os prejuízos evitados, o grau de prevenção de danos, o grau de utilização das várzeas, o grau de agressividade ao meio ambiente, o nível de atendimento a comunidade e o grau de atendimento geral dos objetivos (PMSP, 2012).

Assim, para realizar a aplicação do método proposto em um projeto de drenagem de rodovia, a partir dos resultados de vazões máximas obtidos para o traçado em estudo,

sugere-se que a definição dos dispositivos de drenagem necessários seja feita de acordo com a Tabela 6.20 a seguir.

**Tabela 6.20** – Tipo de obra de drenagem necessária de acordo com a classificação dos valores de vazões máximas

<b>Classificação da vazão máxima</b>	<b>Bacias</b>	<b>Tipo de obra de drenagem</b>
Muito baixa	01, 16, 20 e 24	-
Baixa	02, 06, 08, 09, 11, 14, 17, 18, 19, 23, 25, 26 e 28	Drenagem superficial
Média	05, 07, 10, 13, 15, 21 e 27	Drenagem superficial
Alta	03	Drenagem de transposição de talwegues
Muito alta	04, 12, 22 e 29	Drenagem de transposição de talwegues

As Bacias 01, 16, 20 e 24 tiveram os valores de vazões de cheia classificados como muito baixos e não representam, portanto, fluxos significativos que implicam na necessidade de instalação de dispositivos de drenagem. Tais bacias foram consideradas apenas como teóricas e não é necessária a inclusão das mesmas no projeto de drenagem.

No caso das bacias com valores de vazões máximas classificados como baixos e médios, sugere-se a utilização de sistemas de drenagem superficial, já que os baixos valores de vazão máxima não justificam o uso de dispositivos de drenagem de transposição de talwegues. Portanto, poderiam ser utilizadas sarjetas ou valetas para encaminhar as águas pluviais de tais bacias até os bueiros. Assim, o custo do projeto de drenagem é reduzido, evitando desperdício de recursos, sem comprometer a eficiência do sistema.

Já nas bacias com valores de vazões de pico classificados como altos e muito altos, observa-se a necessidade de dispositivos de drenagem de transposição de talwegues, que possuem maior capacidade de escoamento das vazões oriundas das águas pluviais. Para os valores de vazão máxima calculados, a utilização de bueiros é suficiente para atender às especificações do projeto de drenagem.

O dimensionamento das estruturas necessárias pode ser realizado de acordo com os critérios estabelecidos no Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2006).

## 7 CONCLUSÕES

As obras civis lineares requerem estudos específicos de drenagem para garantir que o escoamento superficial não aumente os riscos de processos geológico-geotécnicos ao longo do traçado: erosões, escorregamentos, assoreamentos entre outros. Tais eventos podem causar danos econômicos e ambientais irreversíveis na área do empreendimento. É necessário estabelecer mecanismos para prever o comportamento do deflúvio, identificar trechos críticos e adotar sistemas de drenagem adequados para garantir a integridade e a segurança da obra na ocorrência de precipitações intensas.

Neste contexto, a presente pesquisa propôs um método para estimar as vazões máximas nas travessias de drenagens em obras civis lineares. O método foi estruturado a partir das tecnologias disponíveis no SIG e de métodos usuais de cálculo de vazões de cheia. O SIG (programa ArcGIS versão 9.3) disponibilizou ferramentas para obtenção automatizada do modelo hidrológico da área do empreendimento, da qual foram obtidas as linhas de fluxo do escoamento superficial e delimitadas as bacias de contribuição. Para o cálculos das vazões máximas, foi utilizado o Método Racional nas bacias com área inferior a 2 km<sup>2</sup>, e o Método Racional Modificado nas bacias com área superior a 2 km<sup>2</sup>, para períodos de retorno de 10 e 50 anos.

O método foi aplicado em um trecho do oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), entre os municípios de São Simão e Cravinhos (SP), onde foram delimitadas 29 bacias contribuintes. A maioria das bacias delimitadas é pequena, com área variando de 0,01 a 28,47 ha, cujas vazões máximas foram calculadas pelo Método Racional. Em contrapartida, quatro bacias resultaram em áreas consideravelmente maiores, entre 240,44 a 822,69 ha, que tiveram as vazões calculadas por três variações do Método Racional Modificado: Método de McMath, Método Racional com coeficiente de retardo e Método Racional com expoente redutor de área.

O cálculo das vazões de pico foi realizado com base nas características das bacias obtidas no SIG: área, declividade, uso e ocupação do solo, materiais inconsolidados, comprimento do talvegue entre outras. Os resultados foram, para as bacias menores (área inferior a 2 km<sup>2</sup>), vazões variando de 0,001 a 4,121 m<sup>3</sup>/s para o período de retorno de 10 anos e com variação de 0,001 a 4,935 m<sup>3</sup>/s para o período de retorno de 50 anos. Já nas bacias maiores (área superior a 2 km<sup>2</sup>), os valores variaram bastante conforme o método de cálculo. Para um tempo de recorrência de 10 anos, as vazões variaram de 12,15 a 28,36 m<sup>3</sup>/s. Para um tempo de recorrência de 50 anos, a variação foi entre 14,55 e 34,02 m<sup>3</sup>/s.



A validação do modelo hidrológico em campo foi bastante satisfatória, na qual foi verificada a compatibilidade das bacias contribuintes delimitadas pelo programa e as bacias identificadas visualmente no terreno. Porém, em algumas bacias com áreas muito pequenas e exutórios bastante próximos, houve maior dificuldade na identificação. Tal conflito foi causado porque, na definição dos pontos de exutórios, foram consideradas todas as interseções da rede de drenagem com o traçado da obra (oleoduto), inclusive as incidentes em linhas de fluxo de primeira ordem. Assim, a ferramenta *Watershed* gerou, necessariamente, uma bacia para cada exutório, quando o cenário observado em campo foi que tais bacias pertenciam a uma mesma bacia de contribuição.

Outra limitação observada na vistoria de campo foi a interferência de elementos na área de contribuição das bacias. Foram identificadas rodovias, estradas rurais, pequenas barreiras de contenção de águas pluviais nas plantações e dispositivos de drenagem urbana e rodoviária que alteravam o trajeto do escoamento superficial estabelecido pelo programa. Tais objetos não foram identificados na base cartográfica digital, possivelmente devido à resolução dos dados utilizados na criação do MDE ou à qualidade das fotografias aéreas digitais e imagens de satélite da área, ou ainda porque os objetos mencionados surgiram após o levantamento topográfico. Assim, foi verificado que a área de drenagem a montante do elemento (rodovia, estrada rural etc.) não contribuía com a bacia na qual havia sido inserida pelo programa.

A partir do PI obtido na pesquisa com os Mapas de Vazões Máximas, foi possível inferir sobre os riscos de eventos perigosos de natureza geológico-geotécnica deflagrados pela ação das águas pluviais na região do oleoduto. Verificou-se que, entre as bacias com os maiores valores de vazões máximas, classificados como muito altos, apenas as Bacias 04 e 29 apresentaram drenagens perenes, devido ao relevo e ao tipo de solo presente no local. Tais drenagens poderiam representar risco à obra, no entanto, o oleoduto possui dispositivos e medidas de segurança que permitem realizar as travessias sem ser afetado pela ação das águas pluviais. O restante das bacias não apresentou riscos inerentes à obra civil linear, devido ao relevo favorável da região do empreendimento e aos baixos valores de vazões máximas.

De forma geral, o objetivo da pesquisa foi alcançado, com a ressalva das limitações encontradas na aplicação do método, verificadas na vistoria em campo. Porém, tais limitações podem ser contornadas utilizando diferentes parâmetros na modelagem, como, por exemplo, considerando áreas mínimas de contribuição maiores ou linhas de fluxo com ordens superiores para definição dos exutórios, além de visitas na área do empreendimento a fim de verificar a presença de elementos que podem interferir no comportamento do escoamento superficial.

A sequência de etapas estabelecida para a modelagem das linhas de fluxo do escoamento superficial e a delimitação das bacias contribuintes, realizada a partir da definição de pontos de exutório ao longo do traçado da obra linear, permite a automatização do procedimento de obtenção do modelo hidrológico, que pode ser aplicado de forma genérica em diferentes tipos de obras lineares. Para tanto, basta adequar os parâmetros utilizados no método proposto, de acordo com as características da área e o nível de detalhe necessário.

A princípio, foram escolhidos o Método Racional e o Método Racional Modificado para o cálculo das vazões máximas devido à simplicidade de aplicação e também por serem métodos já consagrados e bastante difundidos no meio. Ainda, o método proposto neste trabalho tem aplicação direcionada para fases iniciais de projeto, nas quais é possível trabalhar apenas com estimativas de valores e não há necessidade de resultados com maior precisão. Os resultados obtidos no cálculo das vazões de cheia para as bacias menores apresentaram valores coerentes, porém os valores nas bacias maiores foram bastante elevados. Aponta-se, portanto, a necessidade de utilizar métodos mais adequados para bacias com áreas maiores, no caso de dimensionamento de dispositivos de drenagem, a fim de evitar que os valores de vazão de cheia sejam superestimados, causando desperdício de recursos na obra de drenagem.

A aplicação do método estruturado neste trabalho mostrou-se viável e de grande utilidade para outras obras civis lineares, tais como rodovias, ferrovias etc. O método proposto pode ser aplicado em diferentes localidades, para estudos de traçado, anteprojetos, estudos ambientais, estudos geológico-geotécnicos entre outros, desde que os parâmetros sejam adequados para as características da região e estejam de acordo com a base de dados disponível e com a necessidade de detalhamento.

É importante ressaltar que a facilidade de aplicação do método não exclui a importância de acompanhar minuciosamente cada etapa do procedimento, a fim de garantir que a estimativa das vazões máximas seja coerente. É necessário utilizar, na fase de modelagem hidrológica em SIG, um MDE hidrológicamente correto, de forma que, quanto menor a malha utilizada na interpolação, mais precisos serão os resultados. Na fase de cálculo das vazões máximas, é necessário ponderar o uso e ocupação do solo da região, bem como os materiais inconsolidados, considerando também como tais características podem ser alteradas no futuro. Ainda, é necessário critério na escolha da equação de intensidade de precipitação máxima para a localidade em estudo, considerando se a mesma foi baseada em uma série de dados suficientemente longa e se é recente. Aliando o uso de dados corretos e de escolhas de parâmetros bem fundamentadas, aumenta-se a chance do modelo hidrológico se aproximar da realidade observada em campo, e dos valores de vazão de cheia corresponderem aos valores efetivos.

## REFERÊNCIAS

- ACRA, A. M. **Captação e Aproveitamento de Águas Pluviais das Estradas**. Boletim Técnico. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo. Campinas, 1988.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Ciclo hidrológico e águas subterrâneas**. Brasília: ANA, 2007. Disponível em <[www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)>. Acesso em 29 nov. 2013.
- AKAN, A. O. **Urban Stormwater Hydrology: A Guide to Engineering Calculations**. Lancaster, PA: Technomic, 1993.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.
- ARONOFF, S.; **Geographic Information Systems: A Management Perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1995.
- AUGUSTO FILHO, O. Análise de Métodos de Interpolação de Modelo Digital do Terreno e Aplicação em SIG de Gestão de Riscos Geotécnicos e Ambientais em Oleodutos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA AMBIENTAL, 13, São Paulo, nov. 2011. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP)**. Relatório Científico Final. Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia. São Carlos, 2008.
- AUGUSTO FILHO, O.; HIRAI, J.N. OLIVEIRA, A. S.; LIOTTI, E. S. GIS applied to pipe corrosion hazard management for a Brazilian oil pipeline. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 69, p. 631-641, 2010.
- BACELLAR, J. **Patologias: a drenagem**. 2014. Disponível em <http://vistoriaelaudo.blogspot.com.br/2014/06/patologias-drenagem.html>. Acesso em 15 mar 2014.
- BATISTA, M. J.; NOVAES, F.; SANTOS, D.G.; SUGUINO, H.H.. **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização de solos**. Ed. 2. Brasília: CODEVASF, 2002. 216 p.
- BENINI, R. M.; MARTIOLI, C.; MENDIONDO, E. M. Uso de SIG associado ao Método Racional para Previsão de Vazões na Bacia do Córrego do Mineirinho, São Carlos, SP. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, 3, 2004, Goiânia, GO. **Anais...** Porto Alegre-São Paulo : ABRH-Acquacon, 2004. v. 1. p. 1-10.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p. 177-241.
- BRANDÃO, V.S.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. Viçosa: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 2003. 98 p.
- BRITTO, F. G. A. Considerações Conceituais sobre o uso da Tecnologia SIG no suporte à tomada de decisão no Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, Maceió, 2011. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011. v. 1. p. 1-20.

BROOKS, K. N. et al. **Hydrology and the management of watersheds**. 2.ed. Iowa: Iowa State University Press, 1991.

BROSTUEN, D.; COX, S. **Minimizing Subjectivity in Digital Orthophoto Imagery**. 2000. Esri International User Conference. Disponível em <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc00/professional/papers/PAP306/p306.htm>>. Acesso em 08 dez 2013.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Oxford University Press, 1986. 194 p.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1998. 311 p.

CÂMARA NETO, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos**. 1995. 282 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

CAMPBELL, J.E.; SHIN, M. **Geographic Information System Basics**. 2012. 252 p.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.501-504, 2003.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York, McGraw-Hill, 1988. 572p.

COELHO, G. B. **Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

COSTA, F.L.; FONSECA, A.P. **Morfometria e controle estrutural na rede de drenagem da Bacia da Ribeira Seca (Santiago, Cabo Verde)**. 2008. Disponível em <[www2.iict.pt](http://www2.iict.pt)>. Acesso em 08 dez 2013.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de cálculos das vazões máximas, médias e mínimas nas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1994. 64p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. DE 01/HID-001. **Estudos Hidrológicos**. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Manual de Instruções Ambientais para Obras Rodoviárias**. Curitiba: SETR/DER e UFPR/FUPEF, 2000. 246 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 133 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Drenagem de Rodovias**. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 333 p.

DOURADO NETO, D.; ASSIS, J.P.; MAFROM, P.A.; SPAVOREK, P.; BARRETO, A.G.O.P.; MARTIN, T.N. Simulação estocástica de valores médios diários de temperatura do ar e de radiação solar global para Piracicaba - SP, utilizando a distribuição normal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v.13, n.2, p.225-235, 2005.

DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.; SILVA, E.M.; LIMA, C.J.G.S. Comparação de equações de chuvas intensas para localidades do estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, 2011, Maceió, AL. **Anais...** ABRH, 2011.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Professional GIS for the desktop**. Software. 2010, versão 10.

FCTH. Manual do Modelo Hidrológico CABIC, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, FCTH, São Paulo, 1999.

FERRAZ, S. F. B.; MARSON, J. C.; FONTANA, C. R.; LIMA, W. P. Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 75, p. 39-49, set. 2007.

FERREIRA, J. **Avaliação dos problemas ambientais relacionados aos aspectos geológico-geotécnicos e dutos enterrados, Poliduto OSBRA: trecho Porto Ferreira – Ribeirão Preto**. Dissertação. Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, 1999.

GENOVEZ, A. M., ZUFFO, A. C. Chuvas Intensas no Estado de São Paulo: Estudos Existentes e Análise Comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Brasil. v.5, n.3, p.45 - 57, 2000.

GIMENES, F.B. Q. **Mapa de fragilidade ambiental: conceituação e aplicação no oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA)**. Dissertação. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. 2013. 165 p.

GOODCHILD, M. F. The State of GIS for Environmental Problem-Solving. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed). **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 8-15.

GRAMANI, M. F.; OLIVITO, J. P. R.; AUGUSTO FILHO, O.; MAGALHÃES, F. S. Análise da Potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 11, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 2005, v. 1, p. 1350-1365.

HORTON, R. E. Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Colorado, v. 56, p. 275- 370, 1945.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais**. Governo do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. 113 p.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering And Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, nov. 1988.

JONES, R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 9, p. 1051-1060, 2002.

KELM, E.F.; SILVA, J.;SCHILLING, G.E. Hidrologia e drenagem urbana: comparativo de métodos de vazão e aplicação em projeto de drenagem. **Revista Eletrônica Multidisciplinar FACEAR**, Araucária, v. 1, n.3, p.1-15, 2014.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration in small agricultural watersheds. **Civil Engineering**, v. 10, n.6, p.362-, 1940.

KOCHEN, R. **Dutos e obras lineares**: condicionantes geológicas-geotécnicas. 2006. Disponível em <[www.gasnet.com.br](http://www.gasnet.com.br)>. Acesso em 07 abr. 2014.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**. 2 ed. Luso-Brasileira, Lisboa, 1991.

MAGALHÃES, I.A.L.; GARDIMAN JUNIOR, B.S.; FREITAS, C.A.A. Comparação entre métodos de estimativa de escoamento superficial e de vazão máxima na bacia de Rio Novo do Sul, região sul do estado do Espírito Santo, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. Mossoró, v. 6, n. 4, p. 263-273, 2011.

MAGALHÃES, S. F. C.; VASCONCELOS, T. T.; FRANCELINO, M. R.; SILVA, L. D. B.; SALAMENE, S. Uso de geoprocessamento na estimativa da vazão da microbacia do córrego Atalaia em Macaé, RJ. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3, 2010, Recife, **Anais...** Recife: UFPE, 2010.

MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N.L.G. **Equações de chuvas intensas do estado de São Paulo**. DAEE (Departamento de águas e Energia Elétrica). São Paulo, 1999. 141 p.

MASSIMINO, B.; DONATO, J. M. F.; OLIVEIRA, J. N. Córrego sem nome: O Desafio. In: Congresso de Iniciação Científica, 2010, Ilha Solteira, **Anais...** Ilha Solteira: UNESP, 2010.

MATA-LIMA, H.; VARGAS, H.; CARVALHO, J.; GONÇALVES, M.; CAETANO, H.; MARQUES, A.; RAMINHOS, C. (2007). Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Rev. Esc. Minas**, 60 (3), pp. 525-536.

MEDEIROS, A. M. L. **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**. E-book. 2012. Disponível em <<http://andersonmedeiros.com/>>. Acesso em 30 set. 2013.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos**: Princípios, Integração e Aplicação. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre, 2001. 536 p.

MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The digital terrain model - Theory and application. **Photogrammetric Engineering**, , n. 24, p. 433-442, 1958.

MIRANDA, T. C.; TASSI, R.; BASTOS, C. A. B. Comparação de custos de estruturas de drenagem rodoviária: dimensionamento a partir do método Racional e HUS-SCS. Estudo de caso: RST 471. In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 16, 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2005.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, , 1984, v. 28, n. 3, p. 323-344,.

OBSERVATÓRIO TECNOLÓGICO DE SANTA CATARINA. **Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos**. 2012. Disponível em <[www.observasc.net.br](http://www.observasc.net.br)>. Acesso em 08 dez 2013.

PINCINATO, F. L.; RIEDEL, P. S. Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Riscos aos Oleodutos no Município de São Sebastião, São Paulo, Utilizando Técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 2005, v. 1, p.1262-1271.

PORTO, R. et al (1993). **Drenagem Urbana**. In: TUCCI, C. (org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Edusp / ABRH / Editora da Universidade UFRGS.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Diretrizes Básicas para os Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. São Paulo, 1999. 289 p.

\_\_\_\_\_. **Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Equações de chuvas**. São Paulo, 1999. 34 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; diretrizes para projetos**. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. São Paulo: SMDU, 2012. 128 p.

PRUSKI, F.F.; CALIJURI, M.L.; BHERING, E.M.; SILVA, J.M.A. Metodologia baseada no uso de sistemas de informações geográficas para obtenção de equações de chuvas intensas em qualquer localidade do Estado do Paraná. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.5, n.3, p.254-265, 1997.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; TEIXEIRA, A.F.; CECÍLIO, R.A.; SILVA, J.M.A.; GRIEBELER, N.P. **Hídros**. Dimensionamento de sistemas hidroagrícolas. Editora UFV. Viçosa. 2006. 259 p.

PUPIM, F.N. **Zoneamento Geoambiental como subsídio a implantação e gestão de obras lineares: quadrícula de São Carlos – SP, escala 1:100.000**. 2007. 111f. Trabalho de Graduação (Graduação em Geografia) – Inst. de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

QUINN, P.F.; BEVEN, K.J.; LAMB, R. The  $\ln(a/\tan\beta)$  index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. **Hydrological Processes**, Chichester, v.9, p. 161-182, 1995.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J.V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, abr. 2001. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Técnica Oral. p. 485-492.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: Ed. EESC-USP, 1998. 840p.

ROCHA, S. C.; SAMPAIO, S. C.; SUSZEK, M. Simulação da vazão superficial da microbacia do Rio Cascavel. **Varia Scientia**, Cascavel, v. 7, p. 87-93, 2007.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SEIBT, A.C.; BARBOSA, D.I.; SALGADO, A.A.; FORMIGA, K.T.M. Comparação das vazões de projeto pelo método racional e método tempo área para bacias urbanas do município de Goiânia-GO. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Goiânia, v. 4, n. 2, p. 59-68, 2012.

SILVA, D.D. *et al.* Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência para o Estado de São Paulo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.7, n.2, p.70-87, 1999.

SILVA, J. R. Contribuição ao Estudo das Erosões do Corpo Estradal e Meios de Controle. In: REUNIÃO DAS ORGANIZAÇÕES RODOVIÁRIAS, 2, 1972, Brasília. set. 1972.

SILVA, J.E.F. **Imagens no computador**. 2010. Disponível em <[www.projetozk.com](http://www.projetozk.com)>. Acesso em 15 dez 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p. 35-51.

STEFFEN, J.L.; RONDON, M.A.C. Determinação da vazão de projeto em bacias urbanas. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2000, Porto Alegre, RS. **Anais...** ABES, 2000.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. Am. Geophys. Union**, New Haven, v. 38, p. 913-920, 1957.

STUDART, T. M. C. **Hidrologia aplicada**. Apostila. Capítulo 2: Bacia hidrográfica. 2002. Disponível em <[www.barramentos.ufc.br/](http://www.barramentos.ufc.br/)>. Acesso em 19 set. 2014.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. C. F.; SIQUEIRA, G. do A.; BACELAR, L. C. S. D. Vazão máxima de projeto: Metodologia para dimensionamento de bueiros em áreas agrícolas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n.17, p.49-56, 2011.

TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**. Apostila. Capítulo 2: Método Racional. 2013. Disponível em <[www.pliniotomaz.com.br/](http://www.pliniotomaz.com.br/)>. Acesso em 07 set. 2014.

TOMAZ, P. **Curso de manejo de águas pluviais**. Apostila. Capítulo 7: Bueiros ou travessias. 2015. Disponível em <[www.pliniotomaz.com.br/](http://www.pliniotomaz.com.br/)>. Acesso em 12 mai. 2015.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. Vazão máxima e Hidrograma de Projeto. In: TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p. 527-572.

VALEC ENGENHARIA, CONTRUÇÕES E FERROVIAS S.A. Drenagem superficial e proteção contra erosão. Norma Técnica Ambiental n. 19. Brasília. 2010.

VAZ, L. F. Classificação genética do solo e de perfis de alteração de rocha em regiões tropicais. **Revista Solos e Rochas**. ABGE-ABMS. São Paulo, n.19, v.2, 1996.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. Ed. McGraw-Hill do Brasil. 1975.

ZUFFO, A.C. Equações de chuvas são eternas? In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 21, 2004, São Pedro. **Anais...** IAHR; AIPH, 2004.



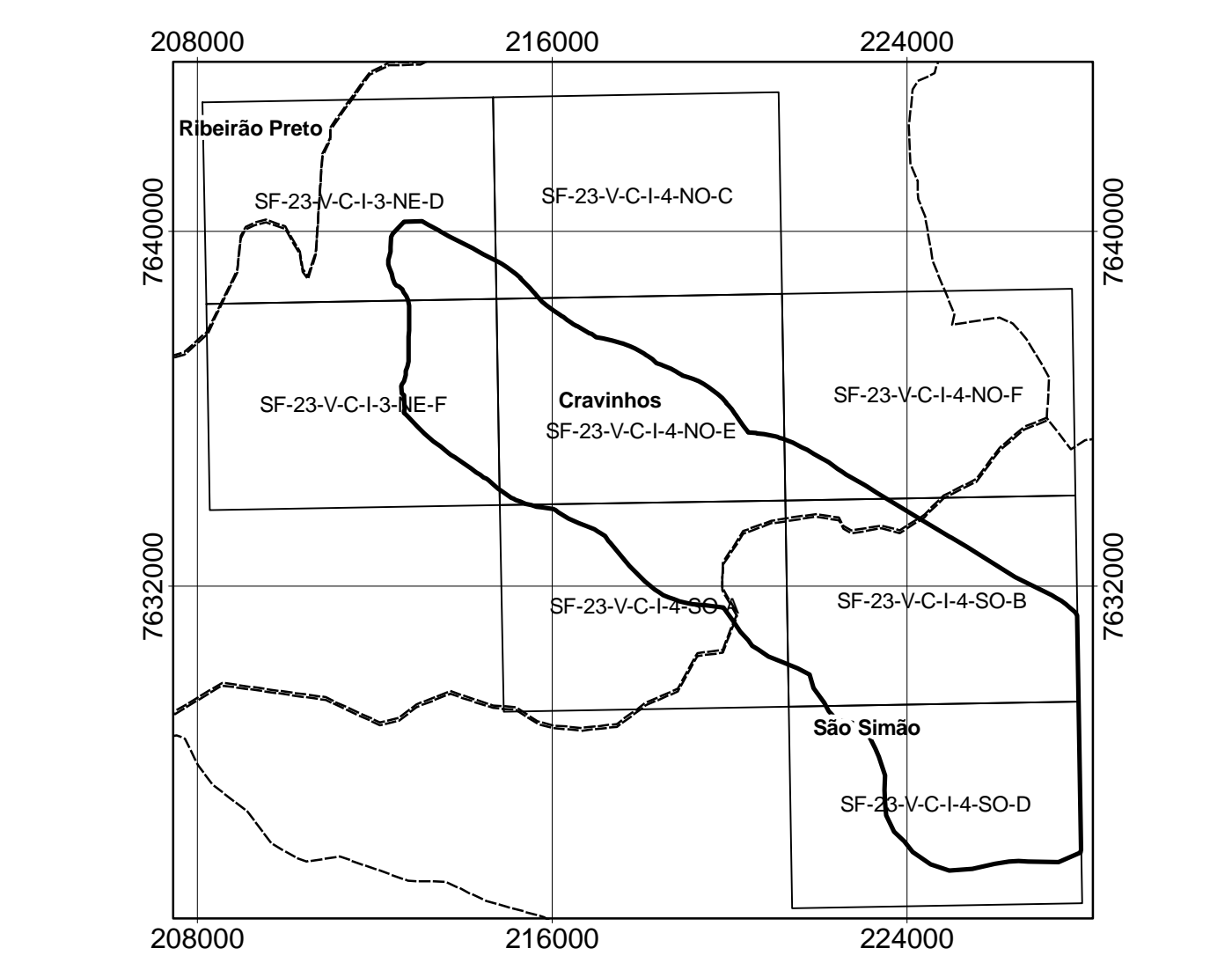
ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1987. 673 p.

## APÊNDICES

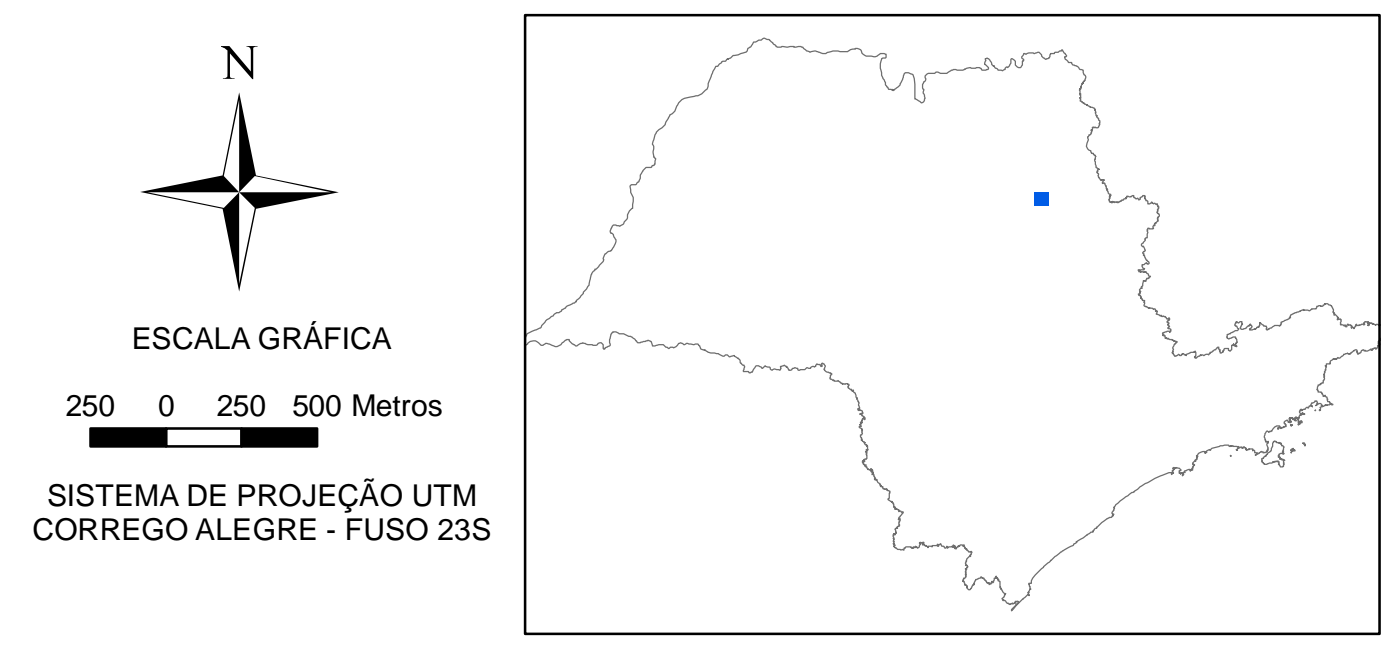
## **APÊNDICE A – Mapa de documentação**



**FOLHAS TOPOGRÁFICAS (1:10.000) DA BASE CARTOGRÁFICA**



**LOCALIZAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO**



**Legenda**

- Limite da área de estudo
- Pontos Cotados (m)
- Estacas
- Pontos de controle de superfície
- Oleoduto OSBRA
- Rodovias
- Linhas de transmissão
- Drenagens perenes
- Espelhos d'água
- Curvas principais (25 m)
- Curvas intermediárias (5 m)
- Limite da área urbana

**Documentação das pesquisas anteriores**

- Observação de superfície
- Sondagem a trado
- Sondagem elétrica vertical
- Dispositivo válvulas
- Dispositivo retificador
- Dispositivo PT

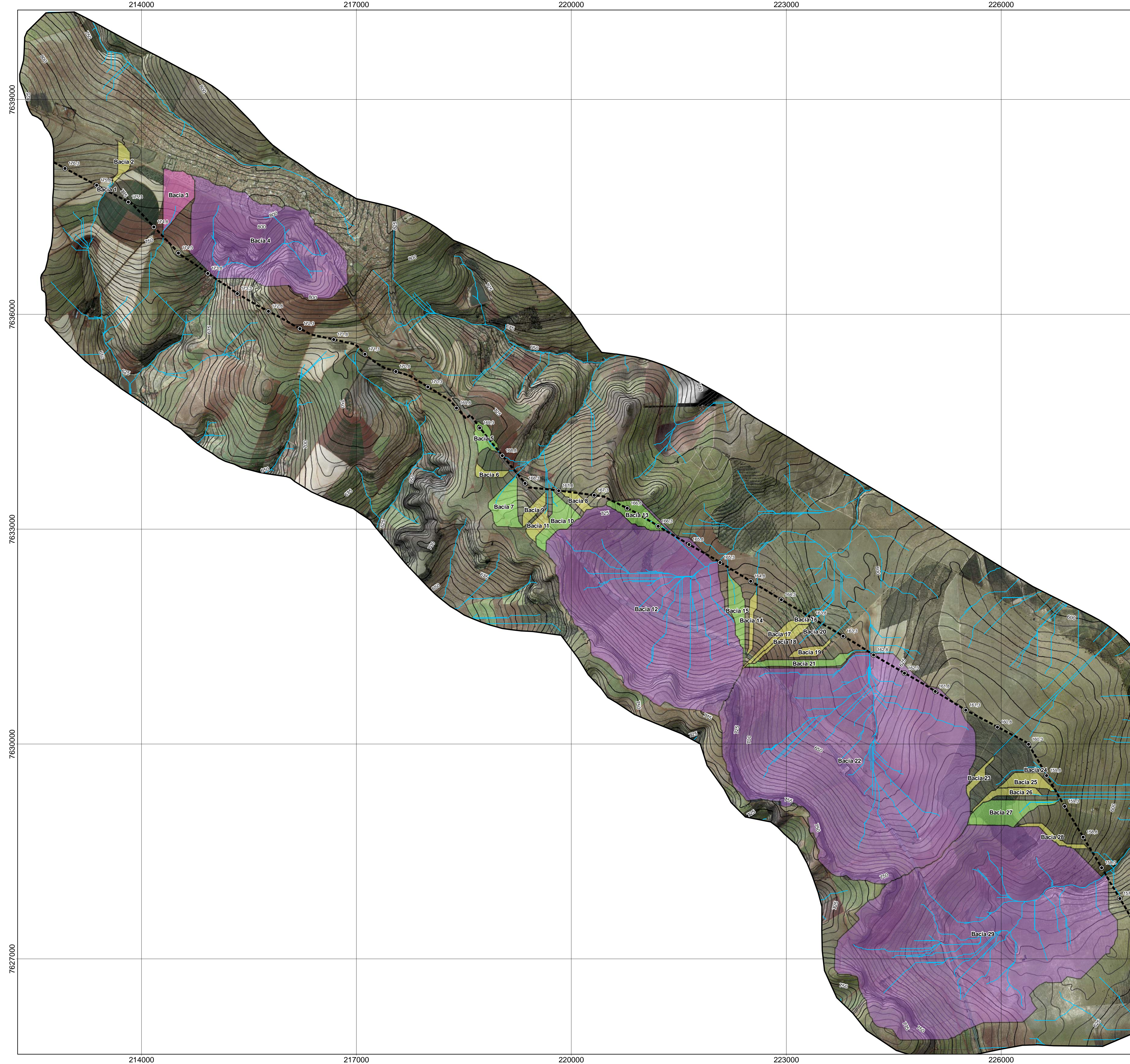
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

Dissertação: Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares

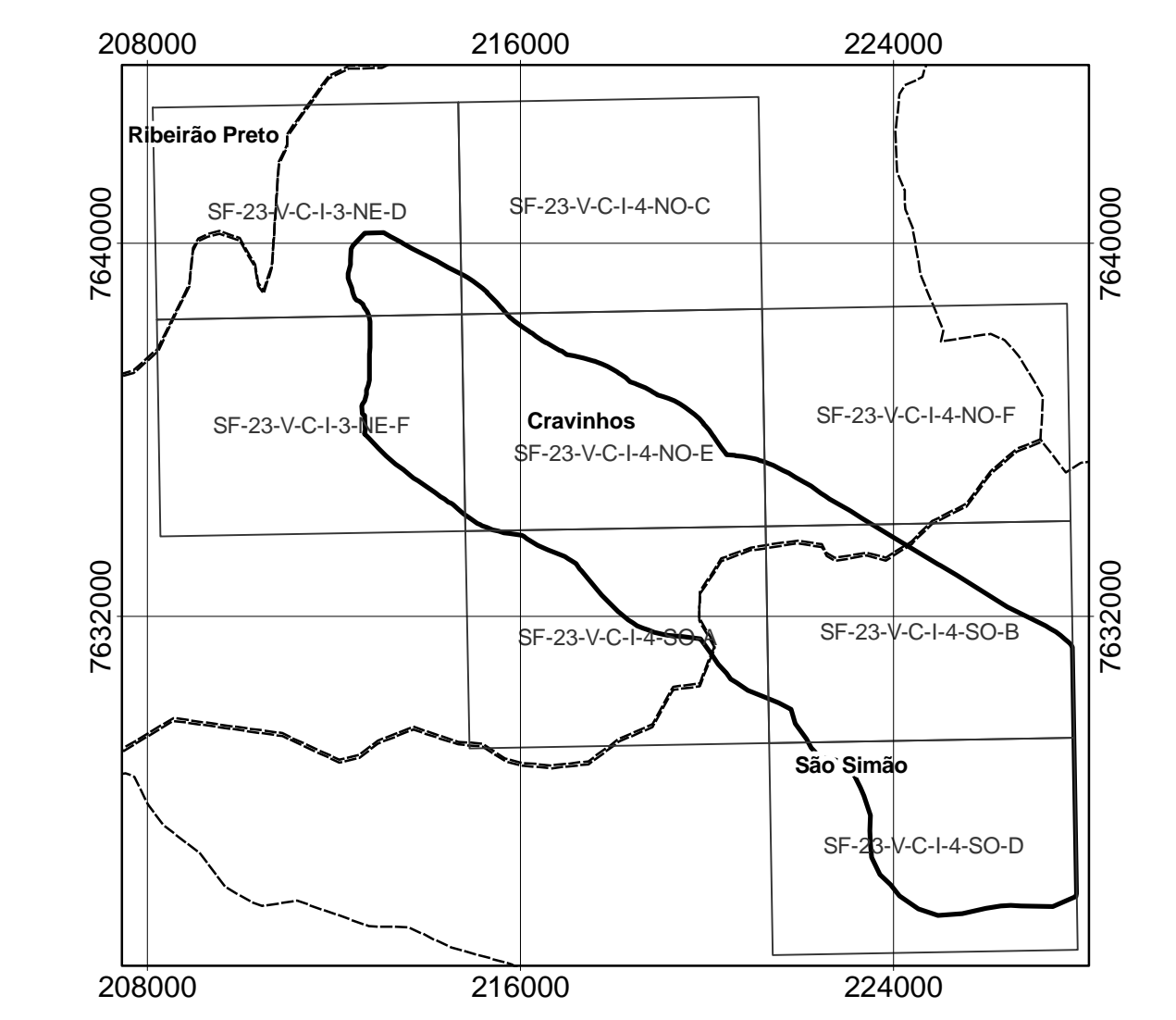
**MAPA DE DOCUMENTAÇÃO**

Autora: Larissa Vieira  
 Orientador: Oswaldo Augusto Filho  
 Data: 13/07/2015 | Escala Original 1:25.000 | **APÊNDICE A**  
 Mosaico de fotos aéreas de 2003, com sombreamento azimute 315° e inclinação 45°.

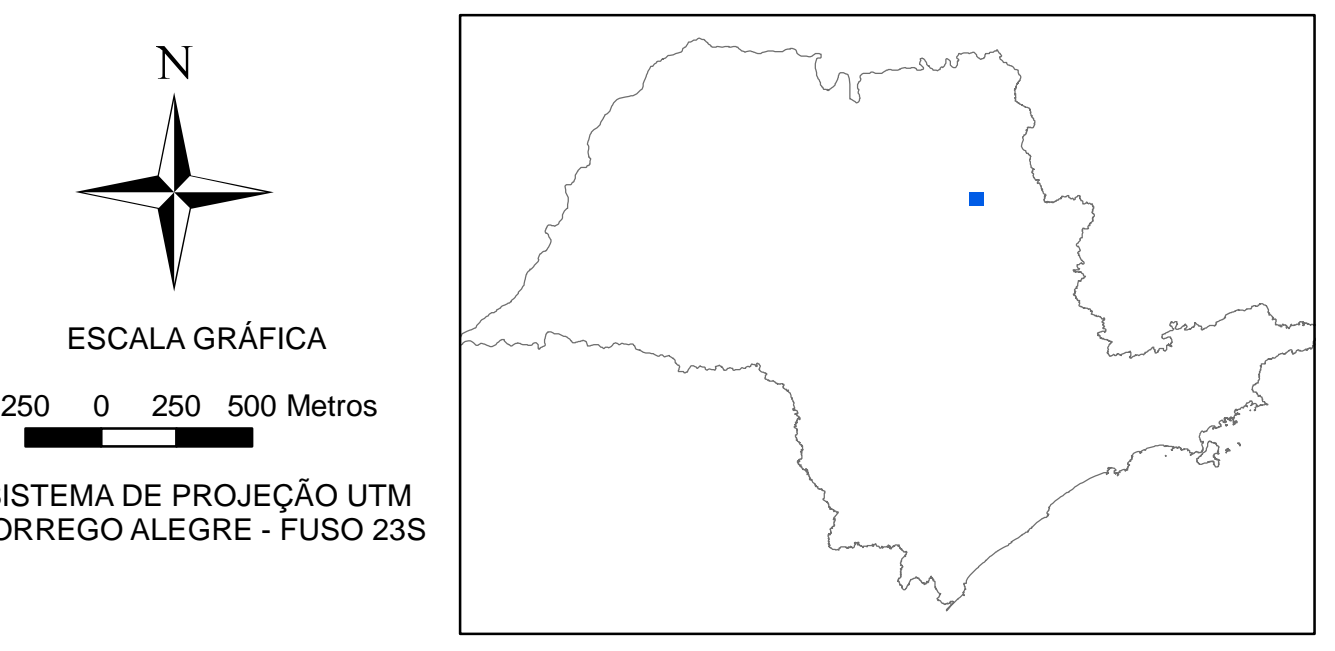
**APÊNDICE B – Mapa de vazões máximas para um período de retorno de 10 anos**



**FOLHAS TOPOGRÁFICAS (1:10.000) DA BASE CARTOGRÁFICA**



**LOCALIZAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO**



**Legenda**

- Limite da área de estudo
- Oleoduto OSBRA
- Estacas
- Linhas de fluxo (área de contribuição 5 ha)
- Curvas principais (25 m)
- Curvas intermediárias (5 m)

**Vazões máximas**

- Muito baixo (0,001 - 0,013 m³/s)
- Baixo (0,014 - 1,359 m³/s)
- Médio (1,360 - 2,614 m³/s)
- Alto (2,615 - 4,121 m³/s)
- Muito Alto (4,122 - 18,140 m³/s)

Obs.: As bacias com valores de vazões máximas classificados como "muito baixos" não são visíveis na escala do mapa (Bacias 01, 16, 20 e 24).

**USP** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Dissertação: Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares

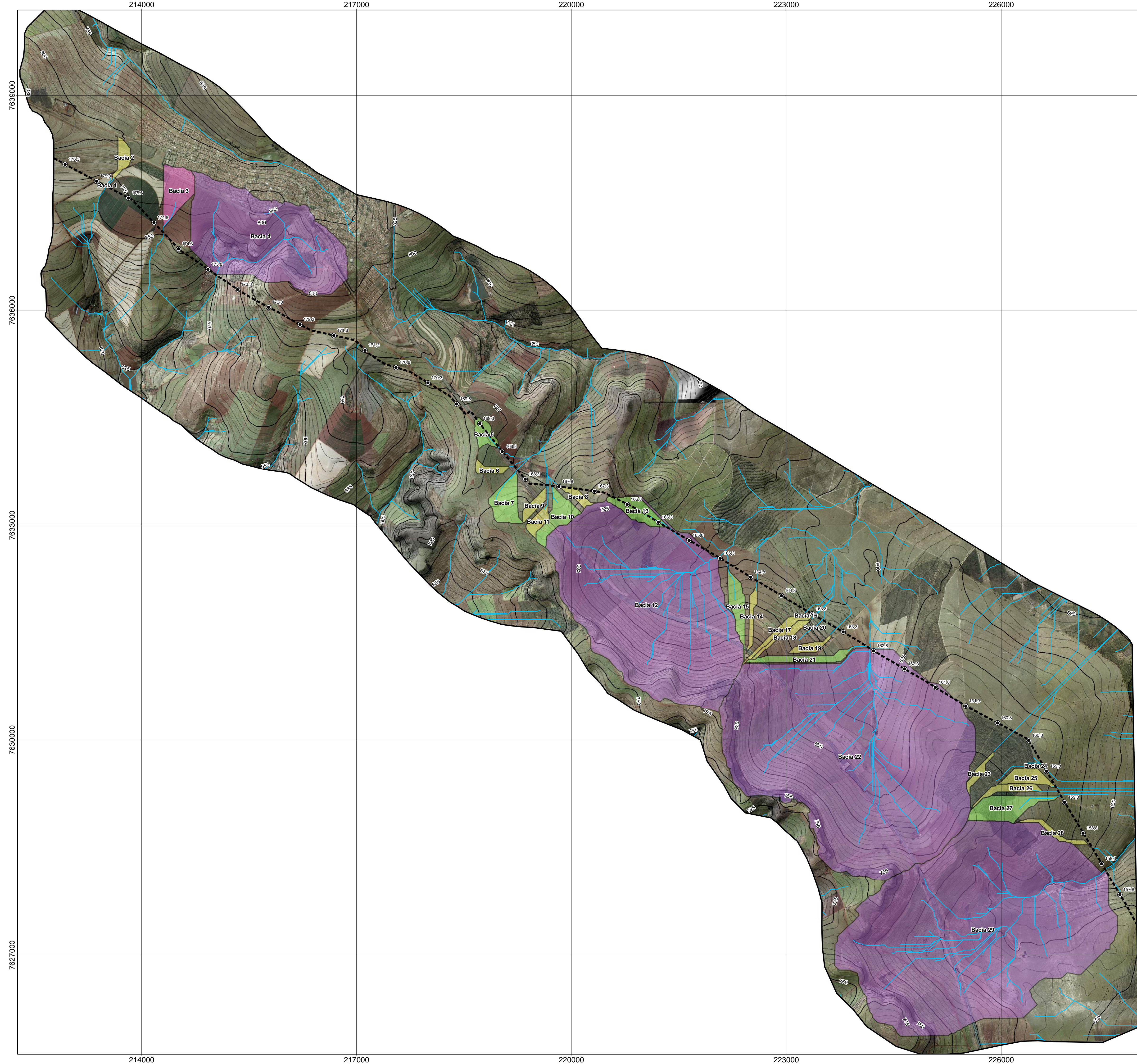
**MAPA DE VAZÕES MÁXIMAS PARA PERÍODO DE RETORNO DE 10 ANOS**

Autora: Larissa Vieira  
 Orientador: Oswaldo Augusto Filho

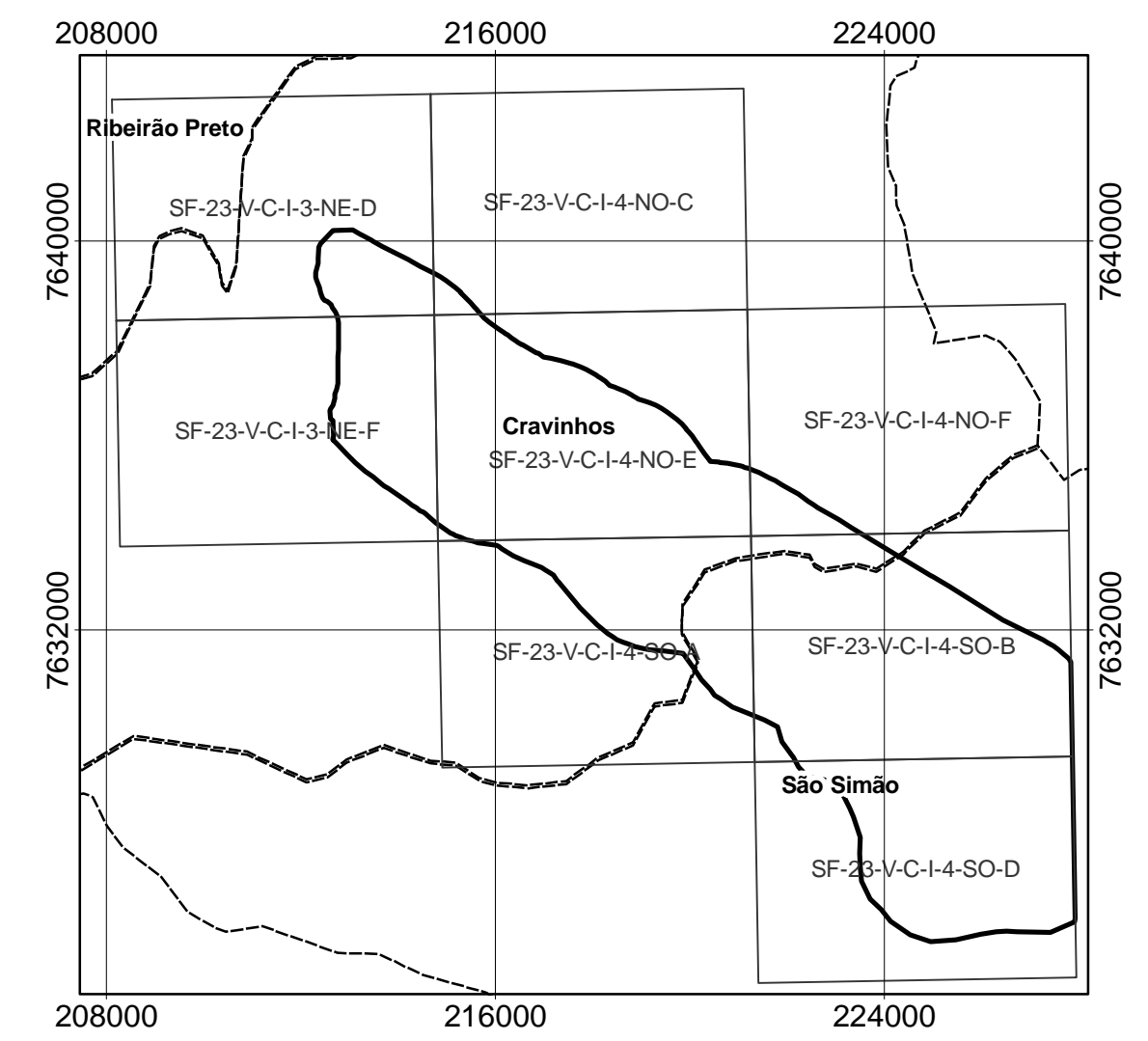
Data: 13/07/2015 | Escala Original 1:25.000 | **APÊNDICE B**

Mosaico de fotos aéreas de 2003, com sombreamento azimute 315° e inclinação 45°.

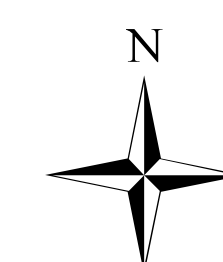
**APÊNDICE C – Mapa de vazões máximas para um período de retorno de 50 anos**



**FOLHAS TOPOGRÁFICAS (1:10.000) DA BASE CARTOGRÁFICA**

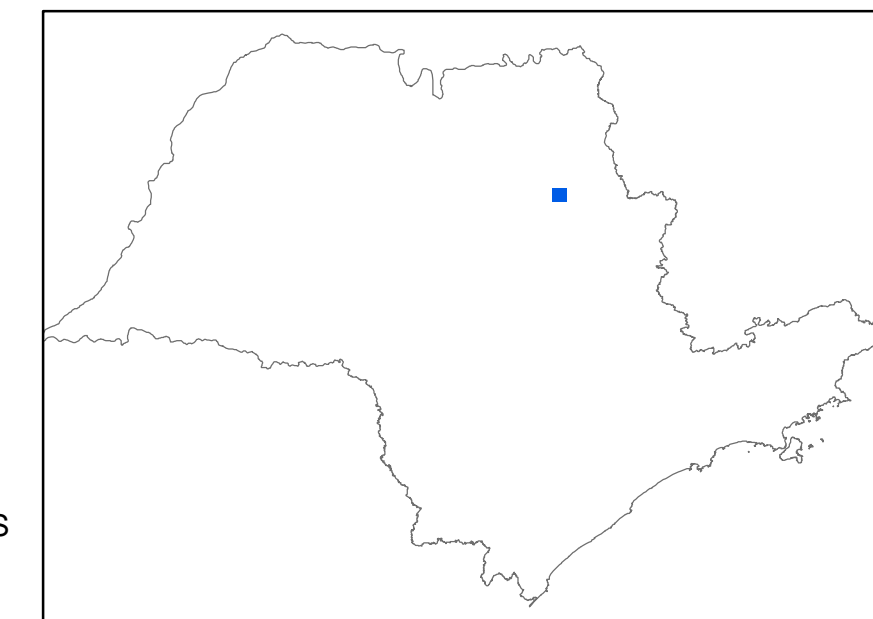


**LOCALIZAÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO**



ESCALA GRÁFICA  
250 0 250 500 Metros

SISTEMA DE PROJEÇÃO UTM  
CORREGO ALEGRE - FUSO 23S



**Legenda**

- Limite da área de estudo
  - Oleoduto OSBRA
  - Estacas
  - Linhas de fluxo (área de contribuição 5 ha)
  - Curvas principais (25 m)
  - Curvas intermediárias (5 m)
- Vazões máximas**
- Muito baixo (0,001 - 0,015 m³/s)
  - Baixo (0,016 - 1,627 m³/s)
  - Médio (1,628 - 3,130 m³/s)
  - Alto (3,131 - 4,935 m³/s)
  - Muito alto (4,936 - 21,760 m³/s)

Obs.: As bacias com valores de vazões máximas classificadas como "muito baixos" não são visíveis na escala do mapa (Bacias 01, 16, 20 e 24).

**USP** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
 DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Dissertação: Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares

**MAPA DE VAZÕES MÁXIMAS PARA PERÍODO DE RETORNO DE 50 ANOS**

Autora: Larissa Vieira  
 Orientador: Oswaldo Augusto Filho

Data: 13/07/2015 | Escala Original 1:25.000 | **APÊNDICE C**

Mosaico de fotos aéreas de 2003, com sombreamento azimute 315° e inclinação 45°.