

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO (SC) COM O MODELO SWAT**

João Félix de Luca Lino

Orientador: Masato Kobiyama

**Florianópolis, SC
2009**

João Félix de Luca Lino

**ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO (SC) COM O MODELO SWAT**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

**Florianópolis, SC
2009**

João Félix de Luca Lino

**ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO (SC) COM O MODELO SWAT**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Masato Kobiyama – Orientador
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC

Prof. Dr. Cláudia Weber Corseuil
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC

Prof. Dr. Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes
Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFPR

**Florianópolis, SC
2009**

Agradecimentos

A meus pais e a minha família pois é pra eles que retribuo todo carinho, amor e incentivo que sempre me deram durante toda minha vida e que sem o esforço deles eu não estaria aqui realizando esta pesquisa.

Ao prof. Dr. Masato Kobiyama pela valiosa orientação durante toda minha pesquisa e pela grande amizade construída nesse período em que estive presente no LabHidro.

A prof. Dra. Cláudia W. Corseuil pelo fundamental auxílio durante toda minha pesquisa e que sem dúvidas não estaria pronta a tempo sem sua ajuda, pelos longos momentos de debates e questionamentos sobre minha pesquisa, sobre nossa vida pessoal e também pela grande amizade que consolidamos durante o período que estivemos juntos no LabHidro.

Aos colegas do LabHidro, Fernando, Simone, Gabriela, Joana, Patrícia, Nadine, Aline, Roberto, Pedro, Camila, Ângela, Henrique e Tatiane, que me auxiliaram tanto nas tarefas em campo quanto em laboratório, contribuindo de alguma forma com o desenvolvimento da pesquisa.

A Companhia Volta Grande de Papel e Celulose (CVG) e ao Eng. Charles, pelo grande auxílio na aquisição dos dados batimétricos.

Ao prof. Dr. Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, pela sua aceitação na minha banca e sua contribuição de forma positiva e significativa para a melhoria da dissertação.

Ao prof. Dr. Irani dos Santos, do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, pelo auxílio no entendimento do modelo SWAT e nas inúmeras saídas a campo para coleta de dados.

Ao prof. Dr. Antônio Ayrton Auzani Uberti, do Departamento de Engenharia Rural da UFSC, pelo valioso auxílio no entendimento dos solos encontrados na bacia estudada e pelo carinho quando sempre me recebia em seu laboratório.

Ao prof. Dr. Luiz Carlos Pittol Martini e prof. Dr. Antônio Augusto Pereira, também do Departamento de Engenharia Rural da UFSC, pelo auxílio no entendimento dos parâmetros hidráulicos do solo.

Ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, através do seu programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), pela oportunidade de realizar uma pesquisa em uma das melhores instituições do país, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e que nos oferece grandes possibilidades e caminhos para aquisição de conhecimento aplicado ao ensino e pesquisa.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Muito Obrigado.

Resumo

O objetivo deste estudo foi analisar a dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (1000,41 km²), localizada no planalto norte de Santa Catarina, utilizando o modelo SWAT. Foram aplicadas as calibrações manual e automática para possibilitar as simulações do escoamento superficial e da produção de sedimentos nos diferentes cenários de uso do solo adotados. Para avaliar o desempenho do modelo, os dados diários de vazão simulados pelo modelo SWAT foram comparados com os dados observados na bacia hidrográfica do Rio Preto utilizando o coeficiente de Nash e Sutcliffe e o desvio dos dados simulados em relação aos dados observados. Neste estudo foram escolhidos cinco cenários de uso e cobertura do solo para a bacia. Os cenários têm por objetivo verificar a mudança de uso e cobertura do solo bem como da operação dos reservatórios na dinâmica hidrossedimentológica, verificada pelos hidrogramas e sedimentogramas. Os cenários simulados foram: a) Uso e cobertura atual; b) Mata Nativa; c) Agricultura; d) Reflorestamento; e e) Uso e cobertura Atual sem Reservatórios. Os resultados dos diferentes cenários foram comparados entre si. Observou-se que o cenário 3 (Agricultura) apresentou maior escoamento superficial e produção de sedimentos. O maior impacto na redução do escoamento superficial e da produção de sedimentos foi obtido pela substituição do uso e cobertura atual do solo (cenário 1) pela mata nativa (cenário 2). A maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de escoamento superficial anual foi de 118,17 mm (variação de 57%) entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata nativa) no ano de 1996. Para a produção de sedimento anual, a maior diferença encontrada foi 36,28 ton.ha⁻¹ (variação de 30.230%), entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata Nativa) também para o mesmo ano.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, escoamento superficial, produção de sedimentos, SWAT.

Abstract

The objective of this study was to analyze the hydrological and sedimentological dynamics of Preto River watershed (1000.41 km²), located on the northern plateau of Santa Catarina State, with the SWAT model. The simulations of current runoff and sediment yield and some possible situation (different scenarios of land-use) were performed through of manual and automatic calibration of the model. To evaluate the model performance, the daily discharge data simulated by SWAT were compared with the data observed in the Preto River watershed through the coefficient of Nash and Sutcliffe and the deviation of simulated data on observed data. This study adopted five scenarios of land use to the watershed: a) current land use, b) native forest; c) agriculture; d) reforestation; and e) current land use without reservoirs. The scenarios were designed to verify the effects of land use and the reservoir operation on the hydrologic and sedimentological dynamics, and verified in terms of with runoff generation and sediment yield. The results of different scenarios were compared. It was observed that the scenario 3 (agriculture) had higher runoff and sediment yield. The largest impact on reducing of runoff and sediment yield was obtained by replacing the current land use (scenario 1) to the native forest (scenario 2). The largest difference between the scenarios of annual runoff was 118.17 mm (range 57%) between the scenarios 3 (agriculture) and 2 (native forest) in 1996. For annual sediment yield, the largest difference was 36.28 ton.ha⁻¹ (range 30230%), between the scenarios 3 (agriculture) and 2 (native forest) also for the same year.

Key words: Hydrological modeling, runoff, sediment yield, SWAT.

Lista de Figuras

Figura 4-1 - Localização da bacia experimental do Rio Preto.....	41
Figura 4-2 - Rede de drenagem da bacia do Rio Preto.	42
Figura 5-1 – “Loop” do Comando para o cálculo do balanço hídrico (Neitsch <i>et al.</i> , 2005).....	54
Figura 5-2 – Procedimentos para geração da base de dados e simulações do modelo SWAT via SIG (Adaptado de Machado, 2002).	72
Figura 5-3 – Coleta das coordenadas com o GPS topográfico de frequência simples.	81
Figura 5-4 – Levantamento batimétrico no reservatório 1 utilizando o ADCP com o Catamaran.	82
Figura 5-5 – (a) RiverSurveyor "Mini" System, 1.5 MHz; (b) RiverCat Integrado com Sistema Catamaran com GPS interno.....	82
Figura 5-6 – Dados observados de vazão utilizados na calibração do modelo.....	83
Figura 6-1 – Modelo digital de elevação da bacia do Rio Preto.....	87
Figura 6-2 – Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do Rio Preto.	88
Figura 6-3 – Classes de solos da bacia do Rio Preto (EPAGRI/CIRAM, 2002).....	90
Figura 6-4 – Pontos medidos de profundidade, latitude e longitude para o reservatório 1.	95
Figura 6-5 – Pontos medidos de profundidade, latitude e longitude para o reservatório 2.	96
Figura 6-6 – Interpolação dos dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 1.	97
Figura 6-7 – Interpolação dos dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 2.	98
Figura 6-8 – Regiões com problemas de medição da profundidade no reservatório 1.....	99
Figura 6-9 – Regiões com problemas de medição da profundidade no reservatório 2.....	100
Figura 6-10 – Vazão monitorada no período de dez/93 à dez/97 e vazão média da bacia do Rio Preto.....	101
Figura 6-11 – Comparação entre os dados medidos e a simulação automática.....	105
Figura 6-12 – Uso do solo para o cenário 1.....	107
Figura 6-13 – Uso do solo para o cenário 2.....	109
Figura 6-14 – Uso do solo para o cenário 3.....	110
Figura 6-15 – Uso do solo para o cenário 4.....	112
Figura 6-16 – Uso do solo para o cenário 5.....	113

Figura 6-17 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 1.	115
Figura 6-18 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 1.	116
Figura 6-19 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 2.	117
Figura 6-20 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 2.	118
Figura 6-21 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 3.	119
Figura 6-22 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 3.	120
Figura 6-23 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 4.	121
Figura 6-24 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 4.	122
Figura 6-25 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 5.	123
Figura 6-26 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 5.	124
Figura 6-27 – Escoamento total mensal comparativo entre os cenários simulados.....	125
Figura 6-28 – Escoamento superficial mensal comparativo entre os cenários simulados.....	126
Figura 6-29 – Escoamento superficial anual comparativo entre os cenários simulados.	127
Figura 6-30 – Produção de sedimentos anual comparativo entre os cenários simulados.	129
Figura 6-31 – Produção de sedimentos mensal comparativo entre os cenários simulados.	129
Figura 6-32 – Evapotranspiração real anual comparativo entre os cenários simulados.	130
Figura 6-33 – Percolação anual comparativo entre os cenários simulados.	131

Lista de Tabelas

Tabela 4-1 – Temperatura média, mínima e máxima, precipitação anual e dias de chuva da zona agroecológica 3 (GUP3).	43
Tabela 4-2 – Umidade relativa, ocorrência de geadas, horas de frio e insolação da zona agroecológica 3 (GUP3).	43
Tabela 4-3 – Temperaturas mínimas e máximas mensais e precipitação média mensal.	44
Tabela 5-1 – Dados da estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA).	51
Tabela 5-2 – Características dos grupos hidrológicos	56
Tabela 5-3 – Classes de <i>Cperm</i>	65
Tabela 5-4 – Classes de <i>Csoilstr</i>	66
Tabela 5-5 – Relação entre declividades do solo e valores de P apresentado por Wischmeier e Smith (1978).	67
Tabela 5-6 – Valores das constantes encontradas por Rawls (1982).	78
Tabela 6-1– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC).	89
Tabela 6-2– Classes de solo na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC).	89
Tabela 6-3– Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT.	91
Tabela 6-4– Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT (cont.).....	91
Tabela 6-5– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT	92
Tabela 6-6– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT (cont.).....	93
Tabela 6-7– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT (cont.).....	94
Tabela 6-8– Valores de área de abrangência e vazão dos reservatórios 1 e 2.	101
Tabela 6-9– Valores de volume e vazão calculados para os reservatórios 1 e 2.	101

Tabela 6-10– Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial (sem calibração), manual e automática.....	102
Tabela 6-11– Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial (sem calibração), manual e automática.....	104
Tabela 6-12– Valores de NASH e Dv para as simulações inicial (sem calibração), manual e automática.....	104
Tabela 6-13– Precipitação anual utilizada nas simulações dos cenários.....	106
Tabela 6-14– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 1.....	108
Tabela 6-15– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 2.....	109
Tabela 6-16– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 3.....	111
Tabela 6-17– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 4.....	112
Tabela 6-18– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 5.....	114
Tabela 6-19– Escoamento superficial mensal dos cenários 1 e 5 e diferença absoluta e percentual no escoamento superficial durante o período de simulação.....	128
Tabela 6-20 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 25.....	132
Tabela 6-21 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 8 e 25.....	133
Tabela 6-22 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.....	133
Tabela 6-23 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 35.....	134
Tabela 6-24 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.....	134
Tabela 6-25 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 25.....	135
Tabela 6-26 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.....	135
Tabela 6-27 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 35.....	136

Sumário

1	Introdução	14
2	Objetivos.....	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	Revisão Bibliográfica	18
3.1	Bacias experimentais	18
3.2	Dinâmica Hidrossedimentológica.....	19
3.2.1	Tipos de erosão hídrica	21
3.2.2	Fatores que influenciam na erosão acelerada.....	23
3.2.3	Taxa de Transferência de Sedimentos	24
3.3	Modelagem Hidrossedimentológica	27
3.3.1	Soil and Water Assessment Tool – SWAT.....	31
3.4	Efeito hidrossedimentológico de barragens.....	35
4	Área de estudos	41
4.1	Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto	41
4.2	Caracterização Ambiental da área de estudos.....	43
4.2.1	Clima.....	43
4.2.2	Geologia e Geomorfologia.....	44
4.2.3	Solos.....	45
4.2.4	Vegetação.....	47
5	Materiais e Métodos.....	50
5.1	Materiais	50
5.1.1	Material cartográfico e imagens de sensoriamento remoto	50
5.1.2	Dados tabulares.....	50
5.1.3	<i>Softwares</i>	51
5.1.4	Descrição do modelo SWAT	52
5.2	Métodos	72
5.2.1	Seleção da Área de Estudo.....	72
5.2.2	Geração dos Planos de Informação.....	73

5.2.3	Dados Tabulares	76
5.2.4	Calibração do modelo SWAT.....	83
5.2.5	Taxa de Transferência de Sedimentos	85
5.2.6	Simulação de cenários	85
6	Resultados.....	87
6.1	Modelo Numérico do Terreno (MNT).....	87
6.2	Uso e Cobertura do Solo.....	88
6.3	Solos.....	89
6.4	Dados tabulares.....	91
6.4.1	Clima.....	91
6.4.2	Solos.....	92
6.5	Reservatórios	94
6.6	Calibração e Análises Estatísticas para avaliação do desempenho do modelo.....	102
6.7	Simulação dos Cenários.....	106
6.8	Distribuição Espacial – Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos.....	114
6.9	Estudo comparativo do escoamento superficial e da produção de sedimentos entre os cenários simulados	125
6.9.1	Em nível de bacia.....	125
6.9.2	Em nível de sub-bacia.....	131
7	Conclusões e Recomendações	137
7.1	Conclusões	137
7.2	Recomendações	138
8	Referências Bibliográficas	140

1 Introdução

A erosão do solo é considerada um dos maiores problemas ambientais, pois causam degradação da qualidade de água para abastecimento público, assoreamento de rios e lagos com as conseqüentes inundações propiciando a perda de vidas e também reduz a capacidade e a vida útil dos reservatórios de abastecimento de água e geração de energia.

A dinâmica de sedimentos é regida pelo escoamento de água em uma bacia hidrográfica. Pode-se dizer que o escoamento de água na bacia hidrográfica é o principal agente responsável pelos processos de erosão do solo. Assim, estuda-se o processo hidrológico e o escoamento de água com o objetivo de entender a dinâmica de sedimentos em qualquer bacia hidrográfica.

A intervenção humana na área rural, através de atividades agrofloretais em áreas com grande declividade e o desmatamento de encostas e margens de rios, propicia a redução da infiltração de água no solo e, conseqüentemente o aumento do fluxo superficial, desencadeando, muitas vezes, fluxo torrencial sob fortes chuvas. Esses fatores acabam favorecendo a instalação de processos de erosão do solo que desestabilizam encostas e confere maior carga sedimentar ao fluxo de água no canal. Tais eventos comprometem a qualidade da água para abastecimento público, elevando os custos do tratamento.

O controle da erosão se faz necessário para manutenção e/ou melhoria da qualidade e aumento da quantidade de água disponível para abastecimento público e para produção de insumos (alimentos, madeira, entre outros) para a população.

Conforme a revista BIO (2008), a poluição dos rios afeta cada vez mais a tratabilidade das águas que chegam as estações de tratamento de água em todo o país e afirma que as empresas de saneamento são obrigadas a escolher uma forma de ação mais adequada entre maiores gastos em produtos químicos e novas tecnologias de tratamento de água ou combate à ocupação desordenada perto dos mananciais.

A bacia hidrográfica do Rio Preto, localizada na região norte catarinense entre os municípios de Mafra e, em sua maior parte, em Rio Negrinho, possui características singulares pois possui diversos usos e tipos de solo bem como possui alto grau de aplicabilidade, já que varias bacias hidrográficas próximas possuem os mesmo usos e tipos de solo, permitindo que

estudos sobre os processos hidrossedimentológicos ocorrentes nessa região, possam ser aplicados a regiões vizinhas e que possuem características similares.

A captação de água do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Rio Negrinho (SAMAE) instalada no rio Corredeiras (um dos afluentes do Rio Preto) bem como estudos para sua ampliação, área de preservação ambiental (APA) a montante de dois reservatórios existentes nas proximidades e perto da cabeceira da bacia, áreas com Floresta Ombrófila Mista e com reflorestamento de *Pinus SP*.

Todos estes aspectos apresentados nos parágrafos acima justificam o estudo visto a importância da modelagem hidrossedimentológica no entendimento do processo hidrológico, sedimentos e qualidade de água em uma bacia hidrográfica.

A escolha da bacia hidrográfica do Rio Preto baseou-se também na Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997), no qual afirma que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo matemático que permite simular diferentes processos físicos na bacia hidrográfica (Evaporação, Infiltração, Escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo), com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água, em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas. Utilizando o SWAT pode-se calcular hidrogramas e sedimentogramas bem como obter informações espaciais com possível simulação de cenários. Outra justificativa em utilizar o modelo SWAT é que ele permite analisar o escoamento de água e a produção de sedimentos de forma espacial e distribuída na bacia.

O Laboratório de Hidrologia (LabHidro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS) do Centro Tecnológico (CTC), desenvolve estudos relacionados ao processo erosivo do solo, a produção, o transporte e a deposição de sedimentos e o balanço hídrico em bacias hidrográficas. O presente trabalho está inserido em um dos diversos projetos do LabHidro e foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), órgão do governo federal, através do projeto intitulado “Monitoramento e Modelagem Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Negro – Região Sul-Brasileira” que teve início em agosto de 2006.

Este documento foi dividido da seguinte forma: i) revisão bibliográfica, contendo a parte teórica envolvida no estudo; ii) materiais e métodos, que mostram materiais, equipamentos e métodos utilizados nos estudos que possibilitaram

Na primeira parte deste documento estão apresentados os objetivos do estudo. A revisão bibliográfica, que contém a parte teórica envolvida na pesquisa, está apresentada na segunda parte. A terceira parte contém os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados. Na última parte, as conclusões e recomendações decorrentes dos resultados obtidos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

- Analisar a dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto na região norte catarinense, utilizando o modelo SWAT.

2.2 Objetivos específicos

- Adequar o modelo SWAT aos processos hidrossedimentológicos da bacia do Rio Preto utilizando a calibração e a validação;
- Avaliar o escoamento superficial e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Preto através do modelo SWAT em diferentes cenários de uso e cobertura do solo;
- Avaliar a distribuição espacial do escoamento superficial em nível de sub-bacias;
- Avaliar a distribuição espacial da produção de sedimentos em nível de sub-bacias.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Bacias experimentais

A definição de uma área de estudo ou planejamento é uma tarefa complexa, não só pela dificuldade em delimitar a área de contenção de impactos, de pressões ou fenômenos, como, também, pela variedade de escalas necessárias para avaliação dos núcleos-alvo focados (Santos, 2004).

Porém, independentemente desses fatores de influência sobre o meio, é comum que a equipe planejadora do trabalho defina a bacia hidrográfica (um espaço moldado pela natureza) como unidade de trabalho (Santos, 2004).

Segundo Kobiyama (1999a), a bacia hidrográfica é definida como uma região sobre a terra, na qual o escoamento superficial em qualquer ponto converge para um único ponto fixo, chamado exutória. O Fluxo de matérias como solo, água, nutrientes e poluentes, é organizado dentro dos contornos da bacia, em uma dinâmica estabelecida pelo comportamento da água nesta unidade. O autor enfatiza que a bacia hidrográfica é a unidade ideal (ótima) para o gerenciamento integrado dos recursos naturais.

O critério de bacia hidrográfica é comumente usado porque constitui um sistema natural bem delimitado no espaço, composto por um conjunto de terras topograficamente drenadas por um curso d'água e seus afluentes, onde as interações, pelo menos físicas, são integradas e, assim, mais facilmente interpretadas. Esta unidade territorial é entendida como uma “caixa preta”, onde os fenômenos e interações podem ser interpretados, a priori, pelo input e output. Neste sentido, são tratadas como unidades geográficas, onde os recursos naturais se integram. Além disso, constitui-se numa unidade espacial de fácil reconhecimento e caracterização. Sendo assim, é um limite nítido para ordenação territorial, considerando que “... não há qualquer área de terra, por menor que seja, que não se integre a uma bacia hidrográfica” e, quando o problema central é água, a solução deve estar estreitamente ligada ao seu manejo e manutenção (Santos, 2004).

Como artifício, pode-se subdividir uma bacia hidrográfica em unidades menores (sub-bacias) por definição, a priori, das potencialidades, fragilidades, acertos e conflitos centrados nas características dessa área. Dessa maneira, setoriza-se a bacia de acordo com um critério

estabelecido, cujas partes podem ou não coincidir com as bacias hidrográficas componentes da área de estudo (Santos, 2004).

O mesmo autor afirma que essa unidade espacial é fundamental na definição do plano inicial de trabalho. Não há quem questione, tecnicamente, a utilização de bacia hidrográfica como área de trabalho. Entretanto, estabelecer como princípio que o limite definitivo da área de estudo é a bacia hidrográfica, pode se tornar extremamente inadequado se observadas suas variáveis sociais, econômicas, políticas e culturais. (Santos, 2004). Um exemplo disso é o confronto dos limites de bacias hidrográficas com os limites físicos municipais, visto que sua sobreposição, na grande maioria dos casos, é diferente.

3.2 Dinâmica Hidrossedimentológica

A erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento. A erosão do solo constitui, sem dúvida, a principal causa do depauperamento acelerado das terras. As enxurradas, provenientes das águas de chuva que não ficaram retidas sobre a superfície, ou não se infiltraram, transportam partículas de solo em suspensão e elementos nutritivos essenciais em dissolução. Outras vezes, esse transporte de partículas de solo é realizado pela ação do vento (Bertoni, 1999).

Dentro das ciências ambientais define-se erosão como o desgaste e/ou arrastamento da superfície da terra pela água corrente, vento, gelo ou outros agentes (ACIESP, 1987).

Segundo Fendrich (1997), a erosão é um processo que se traduz na desagregação, no transporte e na deposição de sedimentos nos cursos d'água como rios e lagos pela decomposição do solo, subsolo e rocha devido aos agentes naturais como águas, ventos, gravidade ou geleiras.

Todos esses fenômenos são processos naturais que sempre ocorreram através dos tempos geológicos, sendo responsáveis pela forma atual da superfície da Terra. A erosão é um dos principais fenômenos geológicos que ocorre na Terra e se processa de várias formas, se considerarmos seu ambiente de ocorrência (Rodrigues, 1982).

A erosão é comumente diferenciada de acordo com o agente erosivo (vento, água, gelo, gravidade, etc.), tipo ou origem (erosão por embate, erosão laminar, erosão em córregos, erosão em sulcos profundos ou ravinas, etc) e natureza (geológica e acelerada).

O fenômeno da erosão depende de vários fatores, sendo os principais: intensidade e duração das chuvas; estrutura e composição geológica do terreno (propriedades do solo); declividade do terreno e extensão do declive; cobertura vegetal; e tipo de uso e cobertura do solo. Fatores esses que resultam em alterações no ambiente aquático, principalmente, porque:

- i) causam assoreamento e obstrução dos cursos d'água, contribuindo para a ocorrência de cheias e prejudicando a navegação;
- ii) provocam a redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios, devido ao assoreamento, com prejuízos para o abastecimento público e industrial, a recreação e outros usos;
- iii) influem na qualidade de água, alterando, principalmente a sua turbidez, e contribuindo para a elevação do custo do tratamento da mesma. O solo carregado pode conter produtos químicos, como pesticidas e fertilizantes, os quais vão causar a poluição da água;
- iv) causam problemas ecológicos ao ambiente aquático, devido ao aumento da turbidez ou à deposição de materiais nos leitos dos cursos d'água e reservatórios.

Adicionalmente, o processo de proliferação anormal de algas em corpos d'água que possuem elevados índices de Nitrogênio e Fósforo na água é chamado de eutrofização. Este processo resulta na mortandade de peixes visto que a energia solar não consegue penetrar na camada de água devido a barreira física imposta pelas algas, ocorrendo assim a falta de oxigênio dissolvido na massa de água. Entre estas algas pode-se citar as cianobacterias, que são altamente tóxicas para o consumo humano. Portanto, a eutrofização dos corpos d'água implica em problemas ambientais e econômicos principalmente para as empresas de saneamento, pois aumentam o custo do tratamento (ABES, 2008).

A erosão do solo é um processo de fase dupla que consiste no destacamento de partículas individuais da massa de solo e seu transporte por agentes erosivos como a água e o vento. Quando a energia não é suficientemente disponível por mais tempo para transportar as partículas, ocorre a terceira fase, a deposição (Morgan, 1979).

Segundo Bertoni (1999), a única fonte de remoção do solo, abstraindo-se a erosão eólica, é a chuva. As gotas de chuva que golpeiam o solo contribuem para a erosão da seguinte maneira: a) desprendem as partículas de solo no local que sofre o seu impacto; b) transportam por

salpicamento as partículas desprendidas; c) imprimem energia, em forma de turbulência, à água de superfície. A água que escorre na superfície de um terreno, principalmente nos minutos iniciais exerce uma ação transportadora.

A erosão, no seu aspecto físico, é simplesmente a realização de uma quantidade de trabalho no desprendimento do material de solo e no seu transporte. O processo erosivo começa quando as gotas de chuvas colidem com a superfície do solo, destroem os agregados e levam às seguintes etapas: a) as partículas de solo se soltam; b) o material desprendido é transportado; c) esse material é depositado (Bertoni, 1999).

Segundo o mesmo autor, o escoamento da água na superfície é o maior agente de transporte das partículas de solo. A quantidade de força gerada pela enxurrada é relacionada com a concentração e velocidade com que ela se move. A água que escorre ganha energia pelo aumento de massa no seu movimento ou pelo aumento de velocidade que adquire por uma rápida mudança na declividade do terreno. A erosão é máxima quando a enxurrada contém quantidade suficiente de material abrasivo para desprender a maior quantidade possível que a enxurrada seja capaz de transportar. A energia da enxurrada é uma função da massa e da velocidade de escoamento da água e a massa é determinada pela quantidade e qualidade da enxurrada.

Se a superfície de um terreno está protegida contra o impacto das gotas, muito pouco solo será transportado. Apenas as partículas que se soltam pelas concentrações de enxurrada.

Os materiais de solo depositados pelo movimento da água são geralmente separados por tamanho de partículas. Primeiro são depositados os de baixa transportabilidade e, por último, os materiais mais leves, nos pontos mais distantes das partes mais baixas, geralmente em lagos, açudes e reservatórios de água.

Portanto, segundo Bertoni (1999), é necessário deter o escoamento da enxurrada que transporta as partículas do solo como também o efeito da dispersão dos agregados do solo, eliminando o desprendimento das partículas causado pelas gotas de chuva.

3.2.1 Tipos de erosão hídrica

Os tipos de erosão são apresentados a seguir de forma a melhorar o entendimento do processo erosivo-sedimentológico e pode se processar das seguintes formas, segundo Silva (2004):

- i) Laminar (sulcos ou semi-sulcos): caracterizada pela ocorrência da remoção de uma camada fina e relativamente uniforme do solo pela precipitação e pelo escoamento superficial. A erosão laminar, em lençol ou ainda areolar, cuja forma de remoção de partículas é bastante seletiva, ocorre em toda a área e se dá pelo impacto das gotas de chuva (Sparovek, 1996 *apud* Silva, 2004). O tipo de solo também é fator importante a ser considerado no tocante à ação erosiva pela gota d'água, sendo esta proporcional ao grau de coesão das partículas de solo (Barros, 1956, Rodrigues, 1982 *apud* Silva, 2004), conferido pela presença de um agente que as une ou agregue – argilas e/ou matéria orgânica. Conforme as características do perfil do solo de (textura, permeabilidade, profundidade, gradiente textural B/A, teor de matéria orgânica), ocorre variação da suscetibilidade à erosão (Carvalho, 1994 *apud* Silva, 2004).
- ii) Linear: ocorrência de formação de canais, de freqüência e dimensões variáveis, conforme as características da chuva, relevo e solo, principalmente em solos recém-cultivados. Uma vez que ocorre o acúmulo de água em canais estreitos por curtos períodos, há a remoção de solo desses canais desde a superfície até profundidades consideráveis, variando de 0,5 m até 25,0 m (Silva, 2004). Na erosão do tipo linear, a remoção e o transporte de partículas são feitos pela enxurrada concentrada e em alta velocidade, condicionada pelo relevo, escoamento de água de estradas ou terraços seccionados. A remoção se dá de forma pouco seletiva e a área afetada corresponde, geralmente, a uma pequena parte da superfície. A quantidade e o tamanho dos sedimentos transportados na enxurrada são função da velocidade do escoamento superficial da água e sua turbulência, os quais, por sua vez, são influenciados pela rugosidade superficial, comprimento da rampa, declividade e cobertura do solo (Lopes et al., 1987 *apud* Silva, 2004).
- iii) Deslizamento: constitui o deslizamento coletivo do solo e também de fragmentos rochosos, com descolamento por gravidade, em épocas de fortes chuvas continuadas, de grandes postas de terreno. São terras escorregadas por saturação extremada (perda da coesão das partículas de solo) e ação da gravidade em escarpas ou vertentes íngremes. Há diversos tipos de escorregamentos: planares, de rotação por avalanches detriticas, entre outros. Os escorregamentos ocorridos na Serra do Mar (Cubatão, SP), por exemplo, foram ocasionados pelo intenso processo de fencimento desigual da

cobertura florestal, em decorrência da ação prolongada de agentes poluentes na região (ACIESP, 1987; Carvalho, 1994 *apud* Silva, 2004).

iv) Canais: ou erosão fluvial. Processa-se de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios. É de grande interesse na morfologia fluvial, podendo explicar a formação dos rios e da rede hidrográfica. É responsável pelo aprofundamento e alargamento do leito dos rios. O material erodido é transportado pelos rios, processando-se uma deposição que pode ser temporária. Esse material é chamado de aluvião (Silva, 2004).

3.2.2 Fatores que influenciam na erosão acelerada

Conforme Silva (2004), a compreensão do processo erosivo-sedimentológico é complexa, pois envolve vários fatores de ordem física, meteorológica e antrópica/cultural.

Para entender quando e como a erosão ocorre, estes fatores devem ser examinados detalhadamente e seus aspectos relevantes devem ser identificados precisamente (MORGAN, 1979).

A erosão é causada por forças ativas, como as características da chuva, a declividade e comprimento do declive do terreno e a capacidade que tem o solo de absorver água, e também por forças passivas, como a resistência que exerce o solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal (Bertoni, 1999).

Segundo Silva (2004), a erosão do solo é um processo complexo no qual vários fatores exercem influência, de forma e magnitude variável, conforme o local de ocorrência. Dentre os principais fatores destacam-se a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, a topografia e a cobertura do solo (Morgan, 1979; Silva, 2004)

Segundo Mota (1995), as principais causas da erosão acelerada são o desmatamento, as praticas agrícolas inadequadas, a ocupação incorreta das áreas, alterações no escoamento natural das águas, movimentos de terra e impermeabilizações de terrenos.

Os parâmetros apresentados são utilizados para avaliar as perdas de solo de uma área através de equações empíricas. Segundo Bertoni (1999), essa técnica de previsão das perdas de solo não só tem maior segurança como pode ser utilizada em escala universal, dependendo, nesse caso, da existência ou obtenção de dados locais específicos.

A equação empírica mais utilizada, criada em 1960 por Wischmeyer e Smith (Braga, 2003), é a equação universal de perdas de solo - USLE (1), pois exprime a ação dos principais fatores que influenciam a erosão pela chuva.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (3-1)$$

A perda de solo (A) é calculada através dos seguintes fatores: fator de erosão pela chuva ou erosividade da chuva (R), fator de erodibilidade do solo (K), fator de comprimento do declive (L), fator de grau de declive (S), fator de uso e manejo (C) e fator de prática conservacionista (P).

O fator de erosão pela chuva (R) é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção.

O fator de erodibilidade do solo (K) expressa a intensidade de erosão por unidade de índice de erosão da chuva, para um solo específico que é mantido continuamente sem cobertura, mas sofrendo as operações culturais normais, em um declive de 9% e comprimento de rampa de 25 metros.

O fator de comprimento do declive (L) é a relação de perdas de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 25 metros para o mesmo solo e grau de declive.

O fator de grau do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa.

O fator de uso e manejo do solo (C) é a relação entre perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto, isto é, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado.

O fator de prática conservacionista (P) é a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro baixo.

Os fatores que influenciam a erosão superficial do solo e a forma que ela pode ser avaliada foram assim apresentados. A seguir serão detalhados os tipos de erosão comumente encontrados no ambiente.

3.2.3 Taxa de Transferência de Sedimentos

A quantidade de sedimentos transferida ou removida do ponto de medição para jusante representa somente uma parte do que é erodido na bacia, sendo esse valor decrescente quando considerado em relação à quantidade erodida. Em outras palavras, nem todo o sedimento erodido na bacia alcança o curso d'água, sendo parte depositada nos declives, nas saliências dos terrenos ou nas planícies. Isso depende principalmente das áreas disponíveis e também da textura do material e do relevo regional. Assim, pode-se definir uma relação entre as grandezas intervenientes para se conhecer qual a porcentagem de sedimento erodido numa bacia que passa num ponto de medida do curso d'água (Carvalho, 2008).

Um método para determinação e/ou quantificação do transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica é o *Sediment Delivery Ratio (SDR)*, ou seja, a Taxa de Transferência de Sedimentos.

Antes de entender o que se trata o SDR, deve-se explicitar o significado para a vazão sólida específica (Q_{ESP} ; $t.km^{-2}.ano^{-1}$). A Q_{ESP} é nada mais do que a massa de sólidos transportada de uma bacia com área e período de tempo pré-determinado. Na falta de modelos espacialmente distribuídos confiáveis para estimativa do transporte de sedimentos em escala de bacia hidrográfica, a vazão sólida específica é freqüentemente adotada. Seu valor geralmente decresce com o aumento da área de drenagem da bacia. Como a medição da área é relativamente simples, essa adoção é freqüentemente utilizada para estimativa da vazão sólida em bacias não calibradas.

A taxa de transferência de sedimento é a relação entre a quantidade de carga sólida medida na seção transversal do curso d'água e a quantidade total de erosão da bacia contribuinte. (Silva et al., 2003; Carvalho, 2008),

Segundo Carvalho (2008), para pequenas bacias, até 1.000 km², o valor do SDR tem sido investigado, enquanto para grandes bacias é de difícil previsão. Em bacias de tamanho médio, a quantidade de sedimentos que chega ao oceano pode ser 1/4 da erosão contribuinte, enquanto para grandes bacias essa quantidade é de 1/10, sendo mais correto afirmar que SDR está mais próximo de 10%, conforme Mahmood (1987).

O mesmo autor mostra que, para bacias muito pequenas (até 0,002 km²), o valor varia de 1, ou 100%, diminuindo até 0,25, ou 25%, para bacias de tamanho médio (até 100.00 km²) e chegando a 0,10, ou 10%, em grandes bacias. Constata-se, ainda, que em qualquer bacia, o SDR vai diminuindo de montante para jusante.

De Vente et al. (2007) estudaram estas as diferentes tendências na relação entre área e Q_{ESP} e abordaram diversos aspectos relacionados às variações dos resultados obtidos para as diferentes tendências. Durante as duas últimas décadas, muitos estudos verificaram uma relação entre área e Q_{ESP} positiva ou não-linear, diferentemente do que se pensavam estudos anteriores.

Muitos pesquisadores sugeriram diversas explicações para estas tendências opostas. Em termos gerais, encontram-se relações positivas quando a erosão fluvial é dominante e uma relação negativa é encontrada onde a erosão laminar é dominante.

Segundo Moszherin (1992) e Dedkov (2004), a relação positiva entre área e Q_{ESP} está ligada à presença de uma cobertura vegetal ampla, distúrbios antrópicos ambientais limitados e ocorre a dominância da erosão fluvial sobre os processos erosivos em encostas (erosão laminar, linear e/ou deslizamento). Para Church et al. (1999) e Slaymaker et al. (2003), a relação positiva indica erosão fluvial e sua conseqüente degradação, possivelmente combinado com o aporte de sedimentos para os rios principais através de grandes movimentações de terra (deslizamentos). Já Andereck (2006) encontrou uma tendência positiva e não muito clara para bacias dominadas pelo uso florestal, ou seja, mata nativa ou reflorestamento.

Nos estudos de Krishnaswamy et al. (2001) foi verificada a importância da análise dos padrões espaciais de clima e uso do solo sobre Q_{ESP} . Neste estudo foi encontrado um aumento na Q_{ESP} de 112 para 404 t.km⁻²ano⁻¹ devido à variação do tamanho da área da bacia analisada, aumentando de 318 para 4767 km². Esta relação positiva foi explicada pelo fato que a parte mais baixa e plana da bacia é predominantemente utilizada para agricultura e assim está altamente exposta à erosividade da chuva enquanto que as áreas mais altas da bacia são bem protegidas por florestas, pastagens e áreas de reflorestamento resultando em baixas taxas de erosão.

Já Church et al. (1999) e Slaymaker et al. (2003) sugeriram que a relação negativa entre os dois parâmetros pode ser atribuída à deposição de sedimentos durante o transporte e assoreamento do canal. Lino et al. (2007) estudaram a relação entre sólidos em suspensão, vazão e precipitação possuindo dados de quatro estações dentro da bacia do Alto Rio Negro (Paraná / Santa Catarina). Os autores encontraram uma proporcionalidade com tendência negativa ($R^2=0,82$), como já encontrada por Ashida e Okumura (1974), isto é, os valores de Q_{ESP} são inversamente proporcionais às áreas das respectivas bacias.

Casos que foram de difícil análise e impossibilitaram a determinação de uma tendência significativa entre área e Q_{ESP} também foram estudados. Schaller et al. (2001) estudou quatro

grandes bacias européias (Rio Meuse, Rio Neckar, Rio Regen e Rio Loire). Os autores encontraram uma pequena tendência negativa para o Rio Meuse, nenhuma tendência para os Rios Neckar e Regen e uma pequena tendência positiva para o Rio Loire. Eles não encontraram relação entre área e erosão em longo prazo (10 à 40 anos). Por outro lado, verificaram que as diferenças espaciais na litologia e na topografia dentro da bacia refletiram nas taxas de erosão à longo prazo dos quais foram medidos nos rios.

A avaliação da influência na utilização de grama no solo e cobertura do solo sobre o processo erosivo é importante na conservação do solo e da água. Sendo assim, Pan & Shangguan (2006) estudaram experimentalmente o processo de produção de vazão e sedimentos através de diferentes valores de cobertura de solo e parcelas de solo nu para declividade de 15%. Os resultados mostraram que a grama reduziu significativamente a quantidade de água e sedimentos. Comparado com as parcelas de solo nu, reduziu em torno de 14-25% a vazão e em 81-95% a de sedimentos, e foi determinante pela mais importante regra na redução de sedimentos na fase final da precipitação. Os autores verificaram uma significativa relação negativa logarítmica entre a taxa de transferência de sedimentos (SDR) e a cobertura do solo (C): $SDR = 1,077 - 2,911 \ln(C)$ ($R^2 = 0,999$). A taxa de transferência de sedimentos decresceu com a duração da precipitação e decresceu linearmente durante o aumento linear da vazão. As velocidades decresceram com o aumento da taxa de cobertura do solo com grama, e a cobertura teve um maior efeito em declividades menores. O número de Froude diminuiu com o aumento na cobertura e todos os regimes de vazão foram laminares. O coeficiente de Darcy–Weisbach e Manning cresceram com o aumento da cobertura de grama. Portanto, o aumento de grama na cobertura do solo reduziu significativamente a perda de solo e melhorou o ambiente ecológico.

3.3 Modelagem Hidrossedimentológica

Os fenômenos naturais são de grande complexidade, dificultando estudos para sua compreensão, pela impossibilidade de medir e percorrer todas as suas partes e/ou etapas. Uma abordagem básica destes fenômenos, apenas para compreendê-los fisicamente e de forma genérica, torna necessária a utilização de leis empíricas e de hipóteses, o que requer a aplicação da modelagem (Kobiyama e Manfroi, 1999b).

Segundo Tucci (1998), “modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”.

Já conforme Christofolletti (1999), modelo pode ser compreendido como sendo “qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução”.

Kobiyama e Manfroi (1999b) definem modelo como uma apresentação do sistema (ou objeto) tanto estático quanto dinâmico.

Existem algumas definições para descrever o significado da palavra modelo. A seguir está apresentada a definição que se considera a mais adequada segundo Christofolletti (1999).

Modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações e importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade (Haggett e Chorley, 1967; 1975 *apud* Christofolletti, 1999)

Segundo Tucci (1998), Os modelos usualmente são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

- O modelo físico representa o sistema por um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos. Na hidráulica, a teoria da semelhança é utilizada para o estabelecimento dos modelos reduzidos.
- Os modelos analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente, o processo desejado. A analogia entre as equações do escoamento hidráulico e de um circuito elétrico permite a representação do sistema hidráulico por um circuito elétrico, que tem um custo mais reduzido.
- Os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema, através de equações matemáticas. Estes modelos são mais versáteis, porque se pode facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade de resposta. A desvantagem deste tipo de modelo está

discretização de processos contínuos e na dificuldade na representação matemática de alguns processos físicos. Em determinadas áreas de estudo, ainda não existem funções matemáticas, que representem convincentemente certos fenômenos físicos. Kobiyama e Manfroi (1999b) ressaltam que o modelo matemático possui várias vantagens, como: facilidade de execução, baixo custo, rápida obtenção dos resultados, permitindo a simulação de experimentos inviáveis na prática e facilitam a previsão de fenômenos e processos naturais, possibilitando a elaboração do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

Para Tucci (1998), os modelos hidrológicos também podem ser classificados segundo vários critérios encontrados na literatura, sendo:

- *Contínuo* ou *discreto*: um sistema é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, e discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos. A maioria dos sistemas hidrológicos são contínuos e são representados por modelos discretos.
- *Concentrado* ou *distribuído*: um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial. Em geral, os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema.
- *Estocástico* ou *determinístico*: esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. Segundo Chow (1964), se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. De outro lado, se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, e o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades, o modelo e os processos são ditos determinísticos.
- *Conceitual* ou *empírico*: um modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Esta definição é estabelecida para diferenciar os modelos que consideram os processos físicos, dos modelos ditos “caixa-preta”. Os modelos do tipo “caixa-preta” ou empíricos são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (Tucci, 1998).

De acordo com Christofolletti (1999), em hidrologia costuma-se utilizar modelos de simulação e de síntese como instrumentos para gerar seqüências artificiais de dados a fim de serem aplicadas na racionalização das análises em pesquisa e tomadas de decisão.

A simulação é definida com a descrição matemática da resposta de um sistema hidrológico de recursos hídricos a uma série de eventos durante um pré-determinado período de tempo. Em hidrologia, por exemplo, a simulação pode ser aplicada para calcular a média diária, mensal e sazonal do escoamento fluvial utilizando como base os dados da precipitação, ou computar a descarga hidrográfica resultante de um aguaceiro conhecido ou hipotetizado, ou simplesmente para preencher lacunas existentes nas séries de informações registradas em estações hidrológicas ou climáticas (Christofolletti, 1999).

A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (Christofolletti, 1999).

Segundo Kobiyama e Manfroi (1999b) e Tucci (1998), a simulação é o processo de execução do modelo. Nesta execução, a calibração do modelo é indispensável. Pela natureza da simulação, quanto mais sofisticado o modelo, mais calibrações são necessárias. A calibração do modelo é sempre feita com dados obtidos pelo monitoramento.

Conforme Tucci (1998), na simulação existe, em geral três fases que são classificadas como: i) estimativa ou ajuste; ii) verificação; e iii) previsão. A estimativa dos parâmetros é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados. A verificação é a simulação do modelo com os parâmetros estimados onde se verifica a validade do ajuste realizado. A previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de suas respostas a diferentes entradas.

Os modelos de síntese possuem a potencialidade de ampliar os procedimentos de simulação, sendo utilizados na análise de séries temporais com a finalidade de gerar seqüências sintéticas de dados sobre precipitação ou escoamento fluvial (diárias,

mensais, sazonais ou anuais), que podem ser empregados para preencher lacunas existentes em registros e para analisar a acuidade em longo prazo da capacidade das microbacias e dos reservatórios na previsão de cheias ou quantificar o escoamento a partir de seqüências sintéticas da precipitação (Christofoletti, 1999).

Kobiyama e Manfroi (1999b) afirmam que a simulação é a execução do modelo e que nesta execução, a calibração do modelo é indispensável. Pela natureza da simulação, quanto mais sofisticado o modelo, mais calibrações são necessárias. A calibração do modelo é sempre feita com dados obtidos pelo monitoramento. Os autores ressaltam que o sucesso do modelo, da modelagem e da simulação dependem da qualidade do monitoramento e que não há nenhum bom modelo sem o uso de dados obtidos do fenômeno monitorado. Assim, a modelagem e o monitoramento não se confrontam passando a serem métodos científicos mutuamente complementares, efetuados sempre paralelamente.

A análise da erosão dos solos com base na ação dos processos hidrológicos constitui tema recorrente no setor da modelagem, apresentando uma ampla gama de modelos. Existe uma diversidade de modelos sobre bacias hidrográficas que simulam a hidrologia e os processos erosivos, tais como CREAMS, ANSWERS, AGNPS KINEROS, EUROSEM, WEPP, LISEM e SWAT (Christofoletti, 1999).

3.3.1 Soil and Water Assessment Tool – SWAT

O modelo *Soil and Water Assessement Tool* (SWAT) foi desenvolvido por Dr. Jeff Arnold da Seção de Pesquisas Agrícolas (*Agricultural Research Service - ARS*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*USDA - United States Department of Agriculture*).

O SWAT foi desenvolvido para estimar os impactos das práticas de manejo sobre o balanço hídrico, produção de sedimentos e agroquímicos em grandes bacias que variam os solos, o uso e cobertura dos solos e as condições de manejo durante um longo período de tempo (Neitsch et al., 2005).

Muitos trabalhos foram desenvolvidos tomando-se como base o modelo SWAT, visto a importância da modelagem hidrológica no contexto mundial. Alguns destes estão brevemente

apresentados aqui nesta dissertação e ajudaram no entendimento do tema para o desenvolvimento do presente trabalho.

Mishra et al. (2007) simularam a vazão e a quantidade de sedimentos através do SWAT na bacia denominada Banha no distrito de Jharkhand localizada no nordeste da Índia com a intenção de auxiliar as tomadas de decisão e conseqüentemente no planejamento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas. Tendo como base as sub-bacias e seus respectivos usos do solo, os autores compararam os parâmetros chuva, vazão e sedimentos entre si através do método de análise de regressão. A relação entre chuva e vazão foi de 0,87 e 0,82 e entre chuva e quantidade de sedimentos foi de 0,55 e 0,31 para os anos de 2000 e 2001, respectivamente. Concluíram que as bacias que possuem maiores porcentagens de área com mata nativa, obtiveram maior controle sobre a vazão e sedimentos, e assim, possuem melhor proteção contra a erosão. Sub-bacias contendo largas áreas de cultivo de arroz (base do trabalho realizado) possuem baixa taxa de infiltração, geram elevados valores de vazão e de perdas de solo e nutrientes. Para se ter uma noção de valores envolvidos neste trabalho, uma bacia com um total de 4.271 km² e com extensa área de vegetação nativa produziu em média 0,26 t.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto que outra bacia com área de 5.577 km² e extenso cultivo de arroz produziu em média 8,98 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Portanto, as simulações através do SWAT mostraram que existe uma forte relação entre as características da bacia e os usos nelas realizados com os valores de vazão e de perda de solo.

Chaplot et al. (2003) simularam a vazão, a quantidade de sedimentos e as descargas de NO₃-N em diferentes cenários de uso e práticas manejo do solo em uma bacia hidrográfica plana. Foram utilizados nove diferentes cenários de manejo (aplicação de Nitrogênio: aumento em 20% e 40%; decréscimo de 20%, 40% e 60% e sistema de semeadura direta) e uso do solo (da rotação de milho e soja para trigo e pastagem) em um período de trinta anos de simulação. Os autores validaram o modelo com os parâmetros vazão, sedimentos e descarga de nutrientes de 1991 a 1998. Os cenários de aplicação de Nitrogênio não afetaram nenhum valor anual de água e sedimentos mas apenas para descarga de NO₃-N. Com o decréscimo dos valores na taxa de 20, 40 e 60% em campos com milho e soja, ocorreu a diminuição anual média da descarga de NO₃-N em 22, 50 e 95%, respectivamente. Quando trocado o manejo de milho e soja para trigo, a descarga de NO₃-N aumentou logo no começo do outono, logo após a colheita. A colocação de pastagem com ou sem fertilização diminuiu a descarga líquida, de NO₃-N e sedimentos em 58, 97

e 50%, respectivamente. Já o sistema de semeadura direta não afetou significativamente os recursos hídricos e a descarga de sedimentos.

Debele et al. (2006) utilizaram dois modelos (CE-QUAL-W2 e SWAT) para simular os processos combinados de quantidade e qualidade de água tanto nas bacias hidrográficas em regiões montanhosas quanto nos corpos d'água a jusante. Os autores afirmam que enquanto os dados de saída para a qualidade de água do SWAT são variáveis na sua totalidade, o CE-QUAL-W2 requer dados de entrada nos mais variados agrupamentos da matéria orgânica. Um programa intermediário foi utilizado para extrair os dados de saída do SWAT e torná-los aceitáveis no CE-QUAL-W2. Os resultados deste estudo indicaram que os dois modelos são compatíveis e podem ser utilizados na avaliação e gestão dos recursos hídricos em bacia hidrográficas complexas compreendendo bacias montanhosas e seus corpos d'água a jusante.

Tolson & Shoemaker (2007) realizaram um estudo no desenvolvimento, calibração e validação do modelo SWAT para simular o transporte de água, sedimentos e Fósforo (P) na bacia hidrográfica de Cannonsville, estado de Nova Iorque nos Estados Unidos. Para obter sucesso na aplicação do modelo SWAT, foram necessárias, para esta bacia, duas modificações considerando: a) o excesso de movimentação de água no solo em solos congelados e; b) previsão de erosão na ocorrência de solos cobertos por neve. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (*NASH*) para vazão média diária não baixou de 0,80 na estação principal da bacia hidrográfica para todas as simulações: 1) sete anos de calibração; 2) um ano de validação; e 3) quatro anos de validação.

A influência do aporte de Nitrogênio (N) e Fósforo (P) no manancial de uma bacia hidrográfica foi estudado por Neves et al. (2006). Os autores utilizaram o modelo SWAT para simular a influência de atividades avícolas sobre a qualidade de água na microbacia do Rio Bonito, região centro-leste do estado de São Paulo. Os autores afirmaram que as simulações estavam coerentes comparando-se os valores de N e P simulados e os valores de perda de solo estimados pelo USLE. Assim concluíram que a utilização de modelos hidrossedimentológicos (no caso o SWAT) foi muito satisfatória para estimativa de cargas poluentes, neste estudo, sedimentos, N e P.

Abbaspour et al. (2007) utilizaram o modelo SWAT para simular todos os processos que afetam a vazão de água, os sedimentos e a descarga de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Thur, com área de 1.700 km² localizada ao nordeste da Suíça. O objetivo principal deste estudo era testar o desempenho do SWAT e sua conseqüente viabilidade na utilização como um modelo

de escoamento e transporte em escala de bacia hidrográfica. Os resultados encontrados foram estatisticamente excelentes para vazão e Nitrato e razoavelmente bom para sedimentos e Fósforo total. Sabendo das boa qualidade de dados que os autores possuíam, eles concluíram que em bacias hidrográficas similares à bacia do rio Thur, é altamente recomendada a utilização do modelo SWAT para simulação do escoamento e transporte.

Lopes (2008) realizou a análise da produção de água e sedimentos em sete microbacias experimentais (Nativa 1, Nativa 2, Pinus 1, Pinus 2, Agricultura, Mista 1 e Mista 2) localizadas nos municípios de Mafra e Rio Negrinho. Segundo a autora, o objetivo deste trabalho foi calibrar e validar o modelo SWAT, avaliar os processos hidrossedimentológicos e simular cenários de recuperação e manutenção das Áreas de Preservação Permanente (APP) para identificação das alternativas sustentáveis para o manejo do uso do solo. Pelos valores de *NASH*, a autora verificou a eficiência do modelo. O resultado nas sub-bacias, para a calibração manual e automática, foi respectivamente de -0,59 e 0,42 (Nativa 1), 0,03 e 0,47 (Nativa 2), 0,09 e -4,40 (Pinus 1), -0,33 e -1,39 (Pinus 2) e, 0,36 e 0,37 (Agricultura).

Machado (2002) aplicou o SWAT para simular o escoamento e a produção de sedimentos produzidos no biênio 1999/2000 na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba, localizado no estado de São Paulo. A calibração e validação do modelo foram obtidas utilizando o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NASH) e o desvio dos dados simulados em relação aos observados (Dv). O autor adotou dois cenários para as simulações: 1) uso atual e considerando mata ciliar de 30 metros em toda extensão dos cursos d'água e 50 metros ao redor das nascentes; e 2) substituição das pastagens nas encostas mais íngremes por vegetação florestal. Os resultados obtidos para o escoamento simulado após a calibração foram de 0,92 e -0,7% para NASH e Dv, respectivamente. Já para a produção de sedimentos os valores obtidos foram de NASH igual a 0,83 e Dv igual a -3,2%. Machado verificou uma redução de 84,4% na produção de sedimentos com a substituição da pastagem por vegetação nativa (cenário 2). Ele concluiu que há a necessidade assim de se tratar a paisagem em bacias hidrográficas de uma forma global, identificando as áreas “ambientalmente sensíveis”, onde são necessárias práticas de controle dos processos erosivos e não somente com a proteção dispensada aos cursos d'água por meio da mata ciliar.

A perda de solo também foi estudada por Irvem et al. (2007). Segundo os autores, o estudo teve a intenção de identificar espacialmente a perda de solo anual na bacia hidrográfica do rio

Seyhan, na Turquia. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi utilizado para gerar os mapas dos fatores do USLE, como já explicitados. A estimativa da perda de solo na bacia só foi possível graças a integração de todos os fatores do USLE ao SIG. A produção média anual estimada de sedimentos foi de $16,38 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. A distribuição espacial da perda de solo estimada foi: 61,03% muito baixo, 8,76% baixo, 23,52% moderado, 4,03% alto e 1,70% muito alto. Com base nestes resultados, as estimativas ajudam a identificar as regiões mais suscetíveis à erosão hídrica e, portanto, auxilia no planejamento conservacionista e ambiental e na tomada de decisão na bacia hidrográfica.

3.4 Efeito hidrossedimentológico de barragens

Devido ao crescimento econômico e populacional, países como o Brasil, na maioria dos casos utiliza a construção de barragens (reservatórios) para o aumento na produção de energia elétrica e disponibilidade de água para abastecimento público e irrigação nas plantações.

Problemas ambientais, sociais e econômicos positivos e negativos juntam-se ao seu projeto, construção e principalmente sua operação, tornando permanente os efeitos dos reservatórios sobre o ambiente. Segundo Müller (1995), os efeitos resultantes da implantação dos reservatórios não se restringem unicamente ao contorno do lago artificial, mas normalmente se refletem em regiões de considerável extensão.

Em muitas regiões do planeta adotam-se políticas de crescimento agressivas ignorando os impactos hidrológicos e hidrossedimentológicos que podem ser acarretados pelos projetos de engenharia mal planejados. Assim, aumentou-se a demanda de pesquisa nesta área e vários pesquisadores vêm estudando estes efeitos causados pela implantação dos reservatórios (Müller, 1995).

Os lagos naturais formam-se em regiões geologicamente recentes, por deslizamento de encostas, por ações vulcânicas etc., diferentes das regiões estabilizadas escolhidas para formar os reservatórios de hidrelétricas. Essas diferenças causam repercussões na geologia e hidrogeologia e manifestarão seus maiores impactos no sistema hidrológico (Müller, 1995).

As oscilações de nível do reservatório e as variações de descarga a jusante são o maior obstáculo para a estabilização hidrobiológica do corpo d'água e, não raro, uma restrição a muitos

usos múltiplos nessas águas. A oscilação do nível, por exemplo, cria uma faixa inóspita ao redor do reservatório, despida de vegetação e sujeita à erosão (Müller, 1995).

Schreider et al. (2002) verificaram as mudanças no regime hidrológico depois da construção de uma barragem para irrigação na região sudeste da Austrália. Em duas bacias (Rio Yass e Broadwater Creek) foram encontradas reduções no valor da resposta de potencial de vazão (Potential Streamflow Response) e houve um acréscimo de 1,5 e 3,3% na vazão média anual, respectivamente. Nas outras nove bacias experimentais não ocorreram reduções significativas na resposta de potencial de vazão para o período de simulação. A informação da capacidade das barragens estavam disponíveis para cinco das nove bacias experimentais. Nestas cinco bacias foram verificados pequenos aumentos significativos nas suas capacidades (não mais que 0,3% da vazão média anual por ano) comparados as duas bacias já citadas, Rio Yass e Broadwater Creek.

Jones et al (2008) estudaram os impactos hidrológicos decorrentes dos projetos de engenharia nas bacias dos rios Tigre e Eufrates (região da Mesopotâmia) através do modelo SWAT. Durante as últimas três décadas, esta região sofreu com a implantação de mais de 60 projetos de engenharia que eliminaram as inundações sazonais, reduziram a vazão natural e também reduziram dramaticamente as áreas alagadiças da Mesopotâmia. Através do modelo SWAT, os autores puderam compreender a dinâmica do sistema de escoamento natural e investigar os impactos da redução na vazão em toda área e da modificação do uso e cobertura do solo. Eles também examinaram a variação da área durante o decorrer do período de simulação (entre 1964 e 1998) através de imagens de satélite. Os resultados indicaram um decréscimo da área coberta pelos pântanos (em 1966: 7970 km², em 1977: 6680 km², em 1984: 5270 km²) juntamente com o decréscimo do volume de escoamento médio (em 1966: 60,8x10⁹ m³, em 1977: 56,9x10⁹ m³, em 1984: 37,6x10⁹ m³). Utilizando uma relação que descreve os impactos da redução do volume de escoamento médio na área total dos pântanos, os autores também avaliaram os impactos que poderão resultar em reduções no fluxo devido à implementação de projetos de engenharia já planejados para as bacias dos rios Tigres e Eufrates nos próximos anos. Após a conclusão deste projeto, com uma redução projetada no volume de escoamento médio excedendo 5x10⁹ m³.ano⁻¹, as áreas alagadiças estudadas terão uma redução estimada de pelo menos 550 km² na sua área total.

Lajoie et al (2007) compararam as características de escoamento entre rios naturais (possuindo 76 estações de medição) e rios modificados por reservatórios (com 25 estações)

utilizando a análise de regressão da vazão mensal observada em Québec, Canadá. Este estudo revelou que as barragens alteram todas as características mensais de fluxo, mas as extensões destas modificações são variáveis. Os dois fatores que influenciam são: O comportamento das bacias grandes (maiores que 10.000 km²) parecem ser diferentes das bacias pequenas e médias. Grandes bacias são caracterizadas pela maior variabilidade anual da distribuição das vazões mensais mínimas que as bacias menores. Relacionando as vazões mensais em épocas de inverno, as bacias grandes também exibem um aumento em sua magnitude e menor variabilidade entre os anos de descarga. Se considerarmos as estações do ano, as mudanças hidrológicas são principalmente verificadas no inverno e na primavera. Contudo, nas duas estações, a extensão destas variações hidrológicas variam de mês para mês. Os resultados mostraram que as mudanças hidrológicas induzidas pelas barragens, representadas pelo método de estimativa da necessidade de vazão mínima no inverno e na primavera, são inaplicáveis para os reservatórios em Québec na proteção efetiva dos habitats dos peixes. No inverno, o método deveria subestimar os fluxos à jusante das barragens, enquanto superestimando-os na primavera. Além disso, o método não pôde ser aplicável para todas as bacias em certos meses, já que às mudanças hidrológicas durante estes meses apenas afetam bacias pequenas ou bacias grandes.

Lu e Siew (2006) estudaram as variações na vazão e sedimentos devido à instalação de 8 barragens na bacia do Baixo Rio Mekong, região sudeste da Ásia. As análises de dados das estações de medição de vazão e sedimento indicaram uma quebra na vazão, nível e transporte de sedimentos à jusante da primeira barragem construída em 1992 (Manwan). O escoamento no período seco mostrou uma tendência ao declínio, e as flutuações de nível aumentaram consideravelmente no período de 1993 à 2000, ou seja, após a construção desta primeira barragem. A concentração mensal de sólidos em suspensão também diminuiu significativamente em várias estações no período após a instalação da barragem. Os autores verificaram que era uma tarefa desafiadora realizar as estimativas do fluxo de sedimentos, pois a medição da concentração de sólidos em suspensão eram esporádicas. Através das estimativas destes dados disponíveis, os autores verificaram uma redução no fluxo de sedimentos à jusante da barragem Manwan, possivelmente devido à sedimentação ocorrida na própria barragem. O decréscimo só foi estatisticamente significativo na estação mais próxima à jusante da barragem. As áreas localizadas à meia altura do rio Mekong mostraram menor sensibilidade durante a operação da barragem

Manwan (localizada à montante desta região), apresentando estabilidade ou até, em alguns casos, o aumento do fluxo de sedimentos no período estudado.

Kim e Sultan (2002) investigaram os impactos hidrológicos do Lago Nasser e da utilização excessiva de água nos projetos de irrigação do solo na região sudoeste do Egito através da construção de um modelo bi-dimensional de fluxo de água no sub-solo. Os autores verificaram uma diminuição de cerca de 86% na recarga do lago no período de 30 anos (1970 a 2000). Eles também identificaram que os possíveis efeitos das irrigações nos aquíferos indicaram que muitas das áreas irrigadas, especialmente os aquíferos que possuem pequena espessura, serão completamente saturadas com a introdução de água, resultando em potenciais inundações e salinização do solo.

Lopez-Moreno et al (2002) estudaram a influência de um reservatório nas inundações na região noroeste da Espanha. Os autores verificaram o decréscimo da freqüência de inundação à jusante da barragem e que dependia principalmente de dois fatores: a) o nível de água reservada, e b) a estação do ano. As inundações eram muito bem controladas quando o nível do reservatório estava abaixo de 50%. Entre 50 e 70% somente as maiores inundações eram controladas. O reservatório retinha principalmente as inundações do outono e primavera. As inundações de inverno eram liberadas no rio para garantir a segurança da barragem

Zahar et al (2008) verificaram os impactos nas condições de fluxo (assoreamento e redução da capacidade do canal) no rio Medjerda após 1981, ano de instalação de uma grande barragem chamada Sidi Salem localizada na Tunísia. Os autores revelaram que o risco de inundação pode ser cancelado pela instalação da barragem, visto que identificaram a diminuição da vazão máxima diária média e vazão máxima instantânea durante 70 anos (1926 a 1996). Eles também concluíram que as modificações geomorfológicas do canal (dimensões de fundo e suas condições de fluxo) à jusante da barragem podem conduzir à diferentes alternativas na sua operação e que é possível reduzir a própria manutenção do reservatório, particularmente se a erosão à montante for controlada.

Duvail e Hamerlynck (2003) avaliaram os impactos ecológicos e socioeconômicos negativos da barragem Diama, localizada no delta do Rio Senegal (Mauritânia) utilizando o modelo MIKE 11 como base para as tomadas de decisões nas planícies alagáveis. Em 1994, foram liberadas algumas inundações regulamentadas como parte do programa de reabilitação do Parque Nacional Diawling. Os dados hidráulicos foram integrados no modelo unidimensional

MIKE 11 e depois associado com o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e o Sistema de Informações Geográficas (SIG), para possibilitar o entendimento da dinâmica das inundações. Neste trabalho, os autores compararam o nível de água, a extensão e duração da inundação com os dados ecológicos e socioeconômicos. Os requisitos hídricos das diferentes partes interessadas da bacia foram convertidos em cenários de inundação e a partir disso os prós e os contras analisados. Um cenário ideal para ambas as partes interessadas na utilização dos recursos hídricos da região foi atingido por meio de um processo participativo. O volume de água liberado para inundação com o intuito de restaurar o delta do rio não afetou a geração de energia, a navegação ou a irrigação intensiva, razões pela qual a barragem foi construída. Portanto, a modelagem hidráulica auxiliou nas discussões e tomada de decisão da bacia, permitindo investigações de cenários de inundação não testados na prática.

Em relação à qualidade da água, Müller (1995) afirma que ocorrem reduções nos valores de sílica, turbidez e cor, bem como o amortecimento nos picos da variação dos compostos minerais dissolvidos, da dureza, pH e alcalinidade, comparando com valores de qualidade de água do rio. Ocorre também a redução da temperatura e a retenção de grande parte do material sólido transportado. Como consequência, observa-se um aumento na taxa de algas, podendo surgir sabores e odores desagradáveis, redução da concentração do oxigênio dissolvido nas partes mais profundas, aumento das concentrações de gás carbônico, ferro, manganês e alcalinidade no fundo. É possível notar o aumento da concentração dos sólidos dissolvidos e dureza, devido à evaporação superficial e dissolução de rochas subjacentes. Dependendo da profundidade e da temperatura da água, poderá surgir a chamada estratificação térmica como estudado por Olijnyk (2008), produzindo camadas com volumes de sedimentação da matéria orgânica, gerando seu empobrecimento.

Por outro lado, os aproveitamentos dos cursos d'água podem ser profundamente afetados pelos sedimentos, assim como podem produzir efeitos adversos aos processos naturais de desagregação (produção), transporte e deposição (assoreamento). No entanto, quando corretamente conduzidos ambos os efeitos podem ser acomodados ou minimizados (Müller, 1995).

Os sedimentos, conforme o autor citado acima, provocam danos às estruturas hidráulicas pelo aumento do esforço e pressão ou pela abrasão dos componentes: tubulações, pás de turbinas, sistemas hidráulicos de eclusas etc., além de problemas mecânicos nas manobras das eclusas e

comportas. Mas o efeito mais notável é o assoreamento, que reduz a capacidade de acumulação de águas dos reservatórios e diminui a vida útil do aproveitamento.

Dentre todos os efeitos gerados, o autor afirma que é princípio do desenvolvimento sustentável que os reservatórios, além de produzirem energia elétrica, contribuam para melhoria da qualidade de vida na região aonde venham a ser inseridos. Isso somente é obtido dentro de ações planejadas, segundo critérios ao mesmo tempo econômicos e socioambientais, que satisfaçam as necessidades nacionais sem descuidar das peculiaridades e necessidades da área geográfica diretamente atingida pelo projeto.

4 Área de estudos

4.1 Localização da bacia hidrográfica do Rio Preto

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio Preto, afluente do rio Negro, com uma área de 1000 Km², localizada no Planalto Norte Catarinense, entre as longitudes 46°10'W e 46°34'W e latitudes 26°10'S e 26°38'S (Figura 4-2). Esta bacia abrange três municípios catarinenses: Mafra, Rio Negrinho e Itaiópolis (Figura 4-1). A rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Preto está apresentada na Figura 4-2.

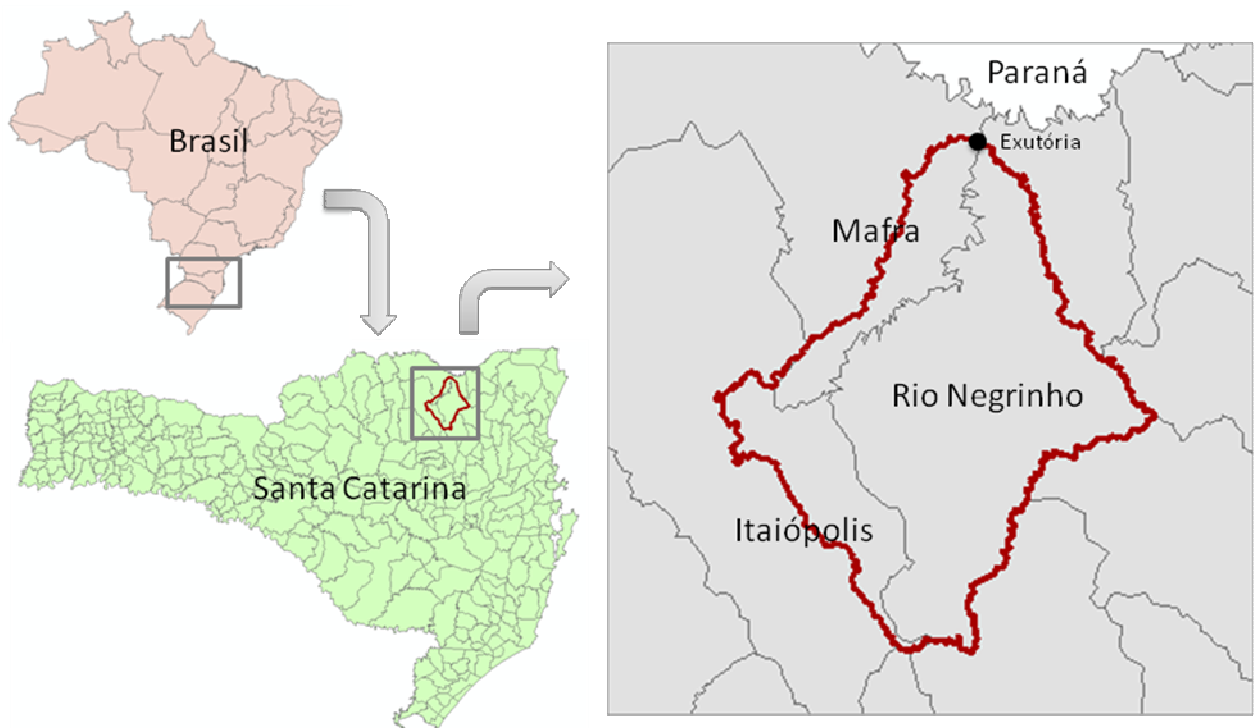


Figura 4-1 - Localização da bacia experimental do Rio Preto.

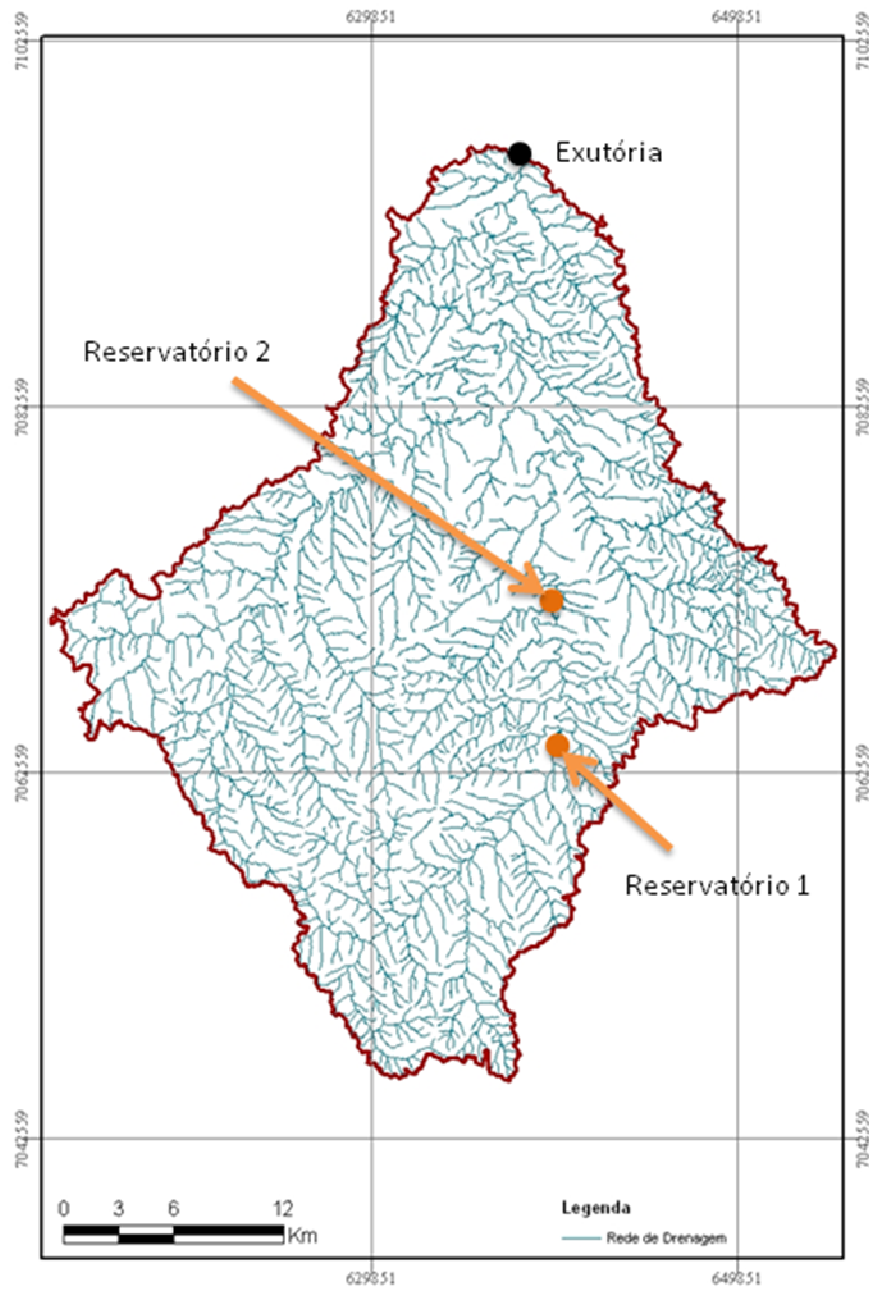


Figura 4-2 - Rede de drenagem da bacia do Rio Preto.

Na bacia do Rio Preto encontram-se dois reservatórios pertencentes a uma empresa de reflorestamento como apresentado na Figura 4-2.

4.2 Caracterização Ambiental da área de estudos

4.2.1 Clima

A bacia do Rio Preto está inserida na Zona Agroecológica 3B. Esta zona é classificada como de clima Cfb, segundo Köeppen, ou seja, clima temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verão fresco (temperatura média do mês mais quente < 22,0°C). O clima é mesotérmico brando (temperatura do mês mais frio entre 10 e 15°C), com isoterma do mês mais frio entre 11,5°C e 13,0°C, ficando inserida, desta forma, na GUP 3 como está apresentado nas Tabela 4-1 e Tabela 4-2 (EPAGRI/CIRAM, 2008; Braga, 2008).

Tabela 4-1 – Temperatura média, mínima e máxima, precipitação anual e dias de chuva da zona agroecológica 3 (GUP3).

GUP	Zona	Temperatura (°C)			Precipitação pluviométrica (mm/ano)	Dias de chuva (soma)
		Média	Máxima	Mínima		
3	B	15,5 a 17,0	26,6 a 24,0	10,8 a 11,8	1360 a 1670	138 a 164

Tabela 4-2 – Umidade relativa, ocorrência de geadas, horas de frio e insolação da zona agroecológica 3 (GUP3).

GUP	Zona	Umidade relativa (%)	Geadas (ocorrências)	Horas de frio abril - outubro		Insolação (horas/ano)
				< 7,2 (°C)	< 13,0 (°C)	
3	B	80,0 a 86,2	5,4 a 14,0	437 a 642	1653 a 2231	1413 a 1613

A temperatura média anual da Zona Agroecológica 3B varia de 15,5 a 17,0°C. A temperatura média das máximas varia de 26,6 a 24,0°C, e das mínimas de 10,8 a 11,8°C. Os valores de horas de frio abaixo ou iguais a 7,2°C variam de 437 a 642 horas acumuladas por ano. A insolação total anual varia de 1.413 a 1.613 horas nesta sub-região (EPAGRI/CIRAM, 2008).

A precipitação pluviométrica total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm, com o total anual de dias de chuva entre 138 e 164 dias. A umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (EPAGRI/CIRAM, 2008).

Com os dados obtidos com a EPAGRI/CIRAM (2008) foram calculadas as temperaturas mínimas e máximas mensais e a precipitação média mensal nos diferentes meses do ano no período de dados. A Tabela 4-3 mostra os valores para estes parâmetros a partir dos cálculos da série de dados de 1991 a 2008.

Tabela 4-3 – Temperaturas mínimas e máximas mensais e precipitação média mensal.

Meses do ano	Temperaturas (°C)		Precipitação (mm)
	Mínima	Máxima	
Janeiro	12,70	31,82	224,17
Fevereiro	12,51	31,21	149,96
Março	11,37	30,89	138,29
Abril	6,13	29,06	108,84
Mai	2,45	26,63	127,99
Junho	2,30	25,23	126,76
Julho	1,13	25,96	139,98
Agosto	1,19	28,86	104,24
Setembro	3,33	29,83	174,22
Outubro	7,58	30,81	187,32
Novembro	8,64	31,61	141,93
Dezembro	10,52	32,44	171,38

4.2.2 Geologia e Geomorfologia

A bacia experimental do Rio Preto está inserida na Formação Rio Bonito, pertencente ao Grupo Guatá, e nas Formações Rio do Sul e Mafra, pertencentes ao Grupo Itararé. Ambos os grupos estão inseridos em substrato sedimentar pertencente ao Super Grupo Tubarão (DNPM, 1986).

A Formação Rio Bonito é constituída de depósitos flúvio-deltaicos, compreendendo arenitos imaturos (arcóseos e subarcóseos) esbranquiçados, finos a médios, localmente

grosseiros, argilosos, micáceos e secundariamente arenitos muito finos, siltitos, argilitos, folhelhos carbonosos, leitos de carvão e conglomerados (DNPM, 1986).

A Formação Rio do Sul é constituída de folhelos e argilitos cinza-escuros na porção inferior, diamictos acinzentados, com matriz arenosa, intercalados com arenitos muito finos na porção intermediária e folhelhos, normalmente várvidos, argilitos, ritmitos e siltitos na porção superior (EMBRAPA, 2005).

A Formação Mafra é constituída por seqüência flúvio-marinha com predomínio de arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, finos a grosseiros, ocorrendo também diamictos, ritmitos, conglomerados, argilitos e argilitos várvidos e possuindo uma área aflorante expressiva, especialmente na divisa com o Paraná (EMBRAPA, 2005).

Nos municípios que compõem a área de estudo (Itaiópolis, Rio Negrinho, Mafra e parte de São Bento do Sul), aparecem grandes manchas das Formações Mafra (seqüência flúvio-marinha, com influência glacial, representada predominantemente por arenitos e secundariamente por diamictos, conglomerados, ritmitos, argilitos e argilitos várvidos), Rio Bonito, Rio do Sul e Palermo, com inclusões de Formação Rio do Rastro (EPAGRI, 2008).

4.2.3 Solos

Segundo o levantamento de solos realizados pela EMBRAPA, a bacia do Rio Preto possui 4 tipos: Cambissolo Háptico alumínico (CXa), Nitossolo Bruno alumínico (NBa), Latossolo Bruno alumínico (LBa) e Neossolo Litólico distrófico (RLd) (EMBRAPA, 2004).

Os Cambissolos são solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte A ou hístico com espessura maior que 40 cm seguido de horizonte B incipiente e satisfazendo os seguintes requisitos: a) B incipiente não coincidente com horizonte glei dentro de 50 cm da superfície do solo; b) B incipiente não coincidente com horizonte plúntico; c) B incipiente não coincidente com horizonte vértico dentro de 100 cm da superfície do solo; e d) não apresente a conjugação de horizonte A chernozônico e horizonte B incipiente com alta saturação por bases e argila de atividade alta. Os Cambissolos Hápticos são solos que não são nem Hísticos (solos com horizonte O hístico com menos de 40 cm de espessura, ou menos de 60 cm quando 50% ou mais do material orgânico for constituído de ramos finos, raízes finas, casca de árvores e folhas, parcialmente decompostas) e nem Húmicos (solos com horizonte A húmico). Cambissolos

Háplicos alumínicos são solos com caráter alumínico na maior parte do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 1999).

Os Nitossolos são solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte B nítico com argila de atividade baixa imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50 cm do horizonte B. Estes solos apresentam horizonte B bem expresso em remos de desenvolvimento de estrutura e cerosidade, mas com inexpressivo gradiente textural (EMBRAPA, 1999).

Os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico, imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura. Os Latossolos Brunos são solos com matiz mais amarelo que 2,5YR no horizonte BA ou em todo horizonte B, apresentando os seguintes requisitos: a) horizonte A espesso com mais de 30 cm de espessura, com teores de carbono orgânico acima de 1%, inclusive no horizonte BA; b) textura argilosa ou muito argilosa em todo o horizonte B; c) alta capacidade de retração do solo com a perda da umidade evidenciado pelo fendilhamento acentuado em cortes de barrancos, expostos ao sol por curto espaço de tempo (uma semana ou mais), formando uma estrutura do tipo prismática. Os Latossolos Brunos alumínicos são solos com caráter alumínico na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive horizonte BA) (EMBRAPA, 1999).

Os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 30 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico e satisfazendo os seguintes requisitos: a) ausência de horizonte glei, exceto no caso de solos com textura areia ou areia franca, dentro de 50 cm da superfície do solo, ou entre 50 cm e 120 cm de profundidade, se os horizontes subjacentes apresentarem mosqueados de redução em quantidade abundante; b) ausência de horizonte vértico imediatamente abaixo de horizonte A; c) ausência de horizonte plíntico dentro de 40 cm, ou dentro de 200 cm da superfície se imediatamente abaixo de horizontes A, E ou precedidos de horizontes de coloração pálida, variegada ou com mosqueados em quantidade abundante, com uma ou mais matizes 2,5Y ou 5Y ou 10YR a 7,5YR, com cromas baixos, normalmente iguais ou inferiores a 4, podendo atingir 6, no caso da matiz 10YR; e d) ausência de horizonte A chernozônico conjugado a horizonte cálcico ou C carbonáceo.

Os Neossolos Litólicos são solos com horizonte A ou O hístico com menos de 40cm de espessura, assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (por volume), ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2mm (cascalhos, calhaus e matacões) e que apresentam um contato lítico dentro de 50 cm da superfície do solo. Os Neossolos Litólicos admitem um horizonte B, em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Neossolos Litólicos distróficos são solos com baixa saturação por bases ($V < 50\%$) em pelo menos um horizonte dentro de 50 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 1999).

4.2.4 Vegetação

A bacia do Rio Preto está situada na região de predominância da floresta de araucária ou dos pinhais também denominada por Klein (1978) como Floresta Ombrófila Mista que se caracteriza por apresentar como espécie dominante o pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*). Essa vegetação não constitui uma formação homogênea e contínua, mas é formada por diversos tipos de submatas, constituídas por árvores características nas diferentes áreas de recorrência. Segundo Klein (1978) no estrato das florestas da submata predominam a imbuia (*Ocotea porosa*) e a Sapopema (*Sloanea lasioma*). Já na sinusita das árvores predomina a erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Essas características imprimem um facies próprio à mata dos pinhais dessa região do Estado de Santa Catarina.

A paisagem atual dessa região encontra-se bastante fragmentada, em função do plantio de *Pinus* sp, que é a unidade dominante da paisagem atual (matriz), apresentando poucos e pequenos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista, alguns conectados a corredores ciliares remanescentes e outros isolados na paisagem.

A cobertura vegetal da região está inserida na transição entre as unidades fitogeográficas da Floresta Ombrófila Mista (floresta com araucária) e Floresta Ombrófila Densa (floresta atlântica), ambas constituintes do bioma Mata Atlântica. A cobertura original da região foi na sua maior parte descaracterizada pela ação antrópica, que desde a colonização vinha sendo feita, principalmente, pela exploração das florestas para extração de madeiras, bem como pela implantação de cultivos anuais e pelas pastagens, para a criação extensiva de gado bovino (SANTA CATARINA, 1986).

A Floresta Ombrófila Mista ocorre, geralmente, em altitudes superiores a 500 m, onde as chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, sem períodos de seca e com temperatura média anual amena, com quatro a seis meses de frio (temperatura média de 15°C) e, com no máximo seis meses quentes (temperatura média de 20°C). Esta formação apresenta como característica a resistência ao frio, pela sua coloração ser mais clara e por serem mais ralas e menos exuberantes, em relação às Florestas Tropicais. A composição florística é fortemente influenciada pelas baixas temperaturas e pela ocorrência de geadas no inverno (Roderjan *et al.*, 2002; Santa Catarina, 1986; EMBRAPA, 2004).

A Floresta Ombrófila Mista é a unidade fitoecológica na qual se contempla a coexistência de representantes das floras tropical e temperada, em marcada relevância de elementos Coniferades e Laurales, onde domina *Araucaria angustifolia* (Bertol). Essa compreende as formações florestais típicas dos planaltos da região Sul do Brasil. São predominantemente entre 800 e 1200m de altitude, podendo, eventualmente, ocorrer acima desses limites (Roderjan *et al.*, 2002).

A Floresta Ombrófila Mista pode ser subdividida em relação ao aspecto fisionômico em Floresta Submontana, Montana e Altomontana. Sendo que, na região de estudo há predominância da Floresta Montana, com poucos trechos de Altomontana, que devido à intensa exploração agrícola da floresta primária restam apenas alguns remanescentes. É constituída por três estratos, sendo o superior composto por araucária (*Araucaria angustifolia*), imbuia (*Ocotea porosa*), canela amarela (*Nectandra lanceolata*), canela sassafrás (*Ocotea odorifera*), cedro (*Cedrella fissilis*) e outras espécies folhosas de grande porte; o médio estrato é formado por podocarpus (*Podocarpus latifolius*), erva-mate (*Ilex paraguariensis*), bracatinga (*Mimosa scabrella*) entre outras. No estrato inferior são comuns as gramíneas cespitosas (ex. *Merostachys*); arbustos; samambaias; fetos arborescentes como o xaxim (*Dicksonia* sp) e taquaras (Roderjan *et al.*, 2002; Klein, 1978). Destas, encontra-se na lista de extinção a araucária, a canela sassafrás, a imbuia e o xaxim.

Na região, atualmente, a cobertura vegetal predominante é de floresta secundária em estágio avançado de regeneração, devido ao corte seletivo de araucária (*Araucaria angustifolia*), imbuia (*Ocotea porosa*) e cedro (*Cedrella fissilis*) e ao corte raso, que ocorreram nas décadas de 1960 e 1970. Nessa época a cobertura original foi substituída por cultivos anuais, pastagens e para implantação de florestas plantadas com espécies exóticas, como o pinus (*Pinus taeda*).

Hoje, a economia da região é movida pelo reflorestamento de pinus que abastece principalmente a indústria moveleira (Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, 2006).

5 Materiais e Métodos

5.1 Materiais

5.1.1 Material cartográfico e imagens de sensoriamento remoto

Neste estudo foram utilizadas cartas topográficas digitais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para delimitar a bacia hidrográfica do Rio Preto, gerar o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e determinar a rede de drenagem. O Mapa de solos em escala de 1:250.000 foi utilizado para inclusão dos tipos de solos da área de estudo no modelo SWAT.

Foram necessárias imagens de satélites para determinação das áreas homogêneas, da cobertura e uso do solo da região com o uso de um software de geoprocessamento (ArcGIS).

Abaixo estão relacionados os materiais cartográficos e imagens de sensoriamento remoto utilizados no estudo:

- Cartas Planialtimétricas: Rio Itajaí do Norte, Represa Alto Rio Preto, Rio dos Cedros, Itaiópolis, Rio Negrinho, São Bento do Sul e Rio Preto do Sul na escala 1:50.000 elaboradas pelo IBGE, editadas e disponibilizadas em meio digital pela EPAGRI e disponíveis no site www.ciram.com.br;
- Imagens do satélite LANDSAT-TM5 220/79, 220/78 e 221/78, datas de julho de 2007;
- Ortofotocartas digitais em escala de 1:10.000, com coordenadas geográficas e planas com projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum SAD-69, elaboradas a partir do levantamento realizado em 2006, disponibilizadas pela Prefeitura municipal de Rio Negrinho;
- Levantamento de solos em escala 1:250.000 realizado pela EMBRAPA/EPAGRI (2004). O Mapa de solos foi disponibilizado em meio digital em formato vetorial, juntamente com banco de dados de atributos. .

5.1.2 Dados tabulares

O modelo SWAT requer os dois tipos de dados tabulares: a) dados para o gerador climático (dados meteorológicos), e b) dados para calibração do modelo (dados de vazão medidos).

Os dados meteorológicos medidos que possibilitaram as simulações através do gerador climático são valores médios diários de precipitação, temperaturas mínima e máxima do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Estes dados foram adquiridos da estação meteorológica da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. (EPAGRI) localizada nas coordenadas 26°14'52"S e 49°34'48"W, com altitude de 862 metros

Já os dados medidos de vazão na área de estudo são os que possibilitaram a calibração do modelo, ou seja, o ajuste dos parâmetros de entrada do modelo. Apenas a vazão medida na exutória da bacia do Rio Preto foi utilizada para calibração do modelo. Os dados foram adquiridos por meio do site da Agência Nacional de Águas (ANA) – www.ana.gov.br – no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB). A calibração do modelo está detalhadamente apresentada no item 5.2.4 (Calibração do modelo SWAT).

Estes dados de vazão foram adquiridos da estação fluviométrica denominada AVENCAL localizada nas coordenadas 26°16'00"S e 49°37'16"W. Na Tabela 5-1 estão apresentados os dados da estação fluviométrica da ANA.

Tabela 5-1 – Dados da estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA).

Código	Nome	Rio	Estado	Município	Responsável	Operadora
65094500	AVENCAL	RIO PRETO	SANTA CATARINA	MAFRA	ANA	SUDERHSA

5.1.3 Softwares

Os seguintes softwares foram utilizados para edição dos dados de entrada e simulação no SWAT:

- ArcGIS 9.1. Extensões: *Spatial Analyst v. 1.1* e *3D Analyst v. 1.0* desenvolvidos pela *Environmental Systems Research Institute (ESRI), Redlands, California, EUA*;
- Interface ArcGIS - *Soil and Water Assessment Tool v. 1.0.6* (ArcSWAT), desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station* e *USDA Agricultural Research Service*;

- Software *Surfer v.8.0*, desenvolvido pela *Golden Software Inc., Golden, Colorado, EUA*.
- ENVI 4.3 (*Environment for Visualize Image*), para o processamento digital de imagens.

5.1.4 Descrição do modelo SWAT

O modelo SWAT simula diferentes processos físicos na bacia hidrográfica, com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água. Para satisfazer estes objetivos o modelo: (a) é baseado em características físicas da bacia; (b) usa dados de entrada normalmente disponíveis; (c) é computacionalmente eficiente para operar sobre médias a grandes bacias; e (d) é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (>100 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo (Arnold *et al.*, 2005).

5.1.4.1 Componentes do SWAT

A simulação hidrológica realizada pelo modelo SWAT é dividida em duas fases: a) fase terrestre do ciclo hidrológico; e b) fase de propagação do ciclo hidrológico.

A fase terrestre do ciclo hidrológico é dividida em sete componentes: i) hidrologia; ii) clima; iii) sedimentos; iv) crescimento vegetal; v) manejo agrícola; vi) nutrientes; e vii) pesticidas.

A fase de propagação do ciclo hidrológico é dividida em dois componentes: i) propagação no canal principal; e ii) propagação no reservatório.

Hidrologia – Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico é simulado pelo SWAT baseado na equação do balanço hídrico apresentado a seguir.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (5-1)$$

onde, SW_t é a quantidade final de água no solo (mm H₂O), SW_o é a quantidade inicial de água no solo (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a precipitação total diária no dia t (mm), Q_{sup} é o escoamento superficial no dia t (mm), E_a é a evapotranspiração total diária no dia t (mm), W_{seep} é a quantidade de água que entra e é armazenada no solo no dia t (mm), e Q_{gw} é a vazão de retorno no dia t (mm).

A subdivisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológica (HRU) permite que o modelo revele diferenças na evapotranspiração decorrentes dos diversos manejos e solos existentes em cada sub-bacia. O escoamento superficial é estimado separadamente para cada HRU para depois ser obtido o escoamento total para a bacia hidrográfica. Este processo aumenta a exatidão e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico. A Figura 5-1 mostra uma seqüência geral dos processos utilizados no SWAT para modelar o balanço hídrico.

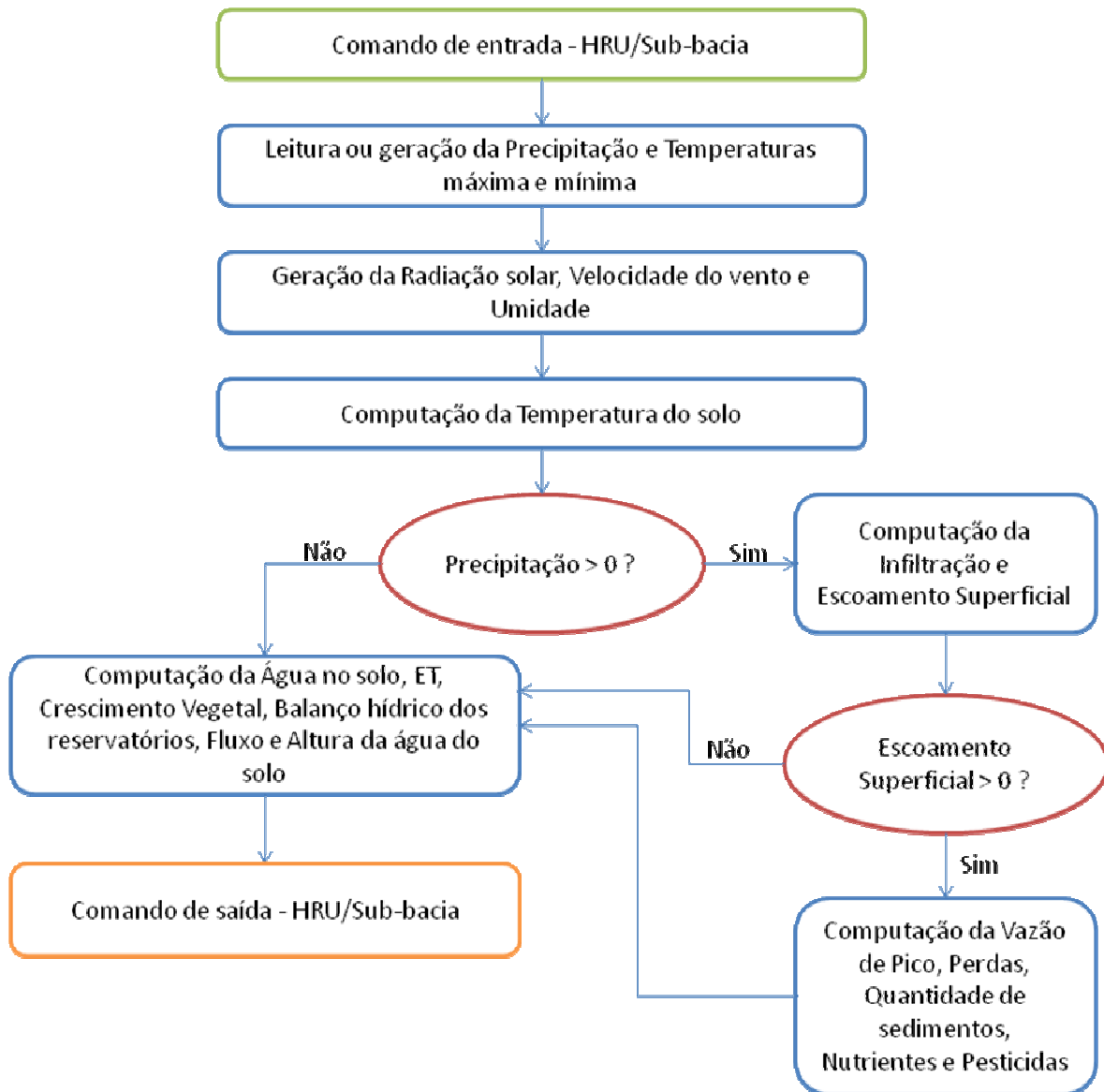


Figura 5-1 – “Loop” do Comando para o cálculo do balanço hídrico (Neitsch *et al.*, 2005)

Escoamento Superficial

O Escoamento superficial é calculado a partir dos valores de precipitação diária por meio do método da Curva Número (CN). O método da Curva Número é um produto de mais de vinte anos de estudos envolvendo relações entre a precipitação e o escoamento superficial de pequenas bacias hidrográficas rurais nos Estados Unidos. Este modelo foi desenvolvido para estimar o escoamento superficial a partir dos mais variados tipos e usos de solos por meio da Equação 5-2.

$$Q_{sup} = \frac{(P-Ia)^2}{(P-Ia+S)} \quad (5-2)$$

onde, Q_{sup} é o escoamento superficial total (mm), P é a precipitação total (mm), Ia é a abstração inicial que abrange o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm).

A condição para que aconteça o escoamento superficial é $P > Ia$. Segundo o *Soil Conservations Service* (USDA/SCS, 1972), a abstração inicial (Ia) é comumente adotada como aproximadamente $0,2.S$ e a Equação 5-2 torna-se na Equação 5-4.

$$Q_{sup} = \frac{(P-0,2 \times S)^2}{(P+0,8 \times S)} \quad p/P > 0,2 \times S \quad (5-3)$$

$$Q_{sup} = 0 \quad p/P \leq 0,2 \times S \quad (5-4)$$

A Curva Número é uma função da permeabilidade do solo, do uso do solo e das condições antecedentes de umidade do solo. O USDA-SCS (op.cit.) define três condições de umidade antecedente: (i) CN1 – condição seca (ponto de murcha), (ii) CN2 – condição de umidade média, e (iii) CN3 – condição úmida (capacidade de campo). Os valores tabelados de CN encontram-se na condição CN2, para transformá-lo para as condições CN1 e CN3, utilizam-se as equações 5-5 e 5-6, respectivamente.

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \times (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636 \times (100 - CN_2)])} \quad (5-5)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0,00673 \times (100 - CN_2)] \quad (5-6)$$

O *Natural Resource Conservation Service* (NRCS, 2007) classifica os solos em 4 grupos hidrológicos (A, B, C e D) baseados nas características de infiltração dos solos. Eles também definiram o grupo hidrológico como um grupo de solos que tem similaridade potencial de escoamento superficial sobre a similaridade de condições de tormenta e cobertura do solo.

As propriedades do solo que influenciam o escoamento superficial são aqueles que causam um impacto mínimo na taxa de infiltração para o solo exposto, depois de uma prolongada umidade e sem congelamento do mesmo. A Tabela 5-2 apresenta os grupos hidrológicos e suas respectivas características.

Tabela 5-2 – Características dos grupos hidrológicos

Grupos hidrológicos	Características
A	Pouco potencial de escoamento superficial. O solo apresenta alta taxa de infiltração quando está completamente úmido e alta taxa de transmissividade da água. O solo é composto por menos que 10% de argila e mais que 90% de areia ou cascalho.
B	O solo tem moderada taxa de infiltração quando completamente úmido e moderada taxa de transmissividade da água. O solo apresenta argila variando entre 10 e 20% e areia variando entre 50 e 90%.
C	O solo tem baixa taxa de infiltração quando completamente úmido e baixa taxa de transmissividade da água. O solo apresenta argila variando entre 20 e 40% e areia menos que 50%.
D	Alto potencial de escoamento superficial. O solo apresenta taxa de infiltração muito baixo quando completamente úmido o que torna o movimento da água no solo restrito ou muito restrito e apresenta taxa de transmissividade da água muito baixo. O solo é constituído com mais de 40% de argila e menos que 50% de areia.

Fonte: modificado de USDA-NRCS (2007).

O parâmetro de retenção varia espacialmente durante às mudanças no tipo de solo, uso do solo, manejo e declividade e de forma temporal em função das alterações no conteúdo de água no solo. A retenção é definida como:

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5-7)$$

onde, CN é o valor da Curva Número para o dia (adimensional). Varia de 0 a 100 e reflete o tipo de solo e o uso do solo. Quanto maior o valor de CN, maior o escoamento superficial.

Vazão de Pico

A vazão de pico é a máxima taxa de escoamento superficial que ocorre em um evento de precipitação. Ela é um indicador do potencial erosivo de uma precipitação e é usado para estimar a perda de sedimentos na bacia hidrográfica (Neitsch et al, 2005). O modelo SWAT calcula a vazão de pico por meio do método racional modificado, como apresentado na Equação 5-8.

$$Q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{sup} \times A}{2.6 \times t_{conc}} \quad (5-8)$$

onde, na qual Q_{pico} é a vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$), α_{tc} é a fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração da bacia (adimensional), Q_{sup} é o escoamento superficial (mm), A é a área da sub-bacia (km^2), e t_{conc} é o tempo de concentração da sub-bacia (h).

Tempo de Concentração

O tempo de concentração é o tempo total de um evento de precipitação no qual toda a bacia contribui para a vazão na exutória da bacia hidrográfica. Em outras palavras, o tempo de concentração é definido como o tempo que uma gota de chuva escoar do ponto mais remoto da bacia até sua exutória.

O tempo de concentração é calculado pela soma dos tempos de escoamento terrestre (o tempo que leva para a água escoar do ponto mais remoto da sub-bacia até alcançar o canal) e escoamento no canal (o tempo que leva para a água escoar dos canais das sub-bacias até suas respectivas exutórias).

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (5-9)$$

onde, t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (horas), t_{ov} é o tempo de concentração do escoamento terrestre (horas), e t_{ch} é o tempo de concentração do escoamento no canal (horas).

O tempo de concentração do escoamento terrestre pode ser calculado a partir da fórmula abaixo.

$$t_{ov} = \frac{(L_{SLP})^{0,6} \times n^{0,6}}{1,48 \times slp^{0,2}} \quad (5-10)$$

onde, L_{SLP} é o comprimento do declive da sub-bacia (metros), n é o coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia e slp é a declividade média da sub-bacia ($m.m^{-1}$). Em todas as simulações foi adotado o valor de 0,035 para o coeficiente de Manning (n).

O tempo de concentração do escoamento no canal pode ser calculado a partir da seguinte fórmula.

$$t_{ch} = \frac{0,62 \times L \times n^{0,78}}{A^{0,128} \times (slp_{ch})^{0,278}} \quad (5-11)$$

onde, L é o comprimento do canal do ponto mais distante até a exutória da sub-bacia (km), n é o coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia (adimensional), A é a área da sub-bacia (km^2), e slp_{ch} é a declividade do canal ($m.m^{-1}$).

Percolação

A Percolação é calculada para cada camada (horizonte) no perfil do solo. A água é percolada somente se a quantidade de água exceder a capacidade de campo para aquela camada e a camada inferior não estiver saturada.

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \times \left(1 - \exp \times \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (5-12)$$

onde, $W_{perc,ly}$ é a quantidade de água que percola para a próxima camada (mm), $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm), Δt é a duração do passo de tempo (horas) e TT_{perc} é o tempo de propagação na camada do solo (horas).

O volume de água disponível para a percolação nas camadas do solo é calculado conforme as fórmulas seguintes.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (5-13)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se } SW_{ly} < FC_{ly} \quad (5-14)$$

onde, SW_{ly} é o conteúdo de água na camada do solo (mm) e FC_{ly} é o conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo (mm).

O tempo de percolação é único para cada camada do solo e é calculado segundo a fórmula apresentada a seguir.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (5-15)$$

onde, TT_{perc} é o tempo de percolação (h), SAT_{ly} é a quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado (mm) e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada na camada (mm.h^{-1}).

Escoamento Lateral (Sub-superficial)

O Escoamento lateral pode ser significativo em áreas onde os solos possuem alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e uma base impermeável ou semipermeável. Neste caso, a precipitação irá percolar verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água que fica compreendida acima da camada impermeável forma uma zona saturada. Esta zona é fonte de água para o escoamento lateral (sub-superficial).

O modelo SWAT incorpora um modelo de armazenamento cinemático para o escoamento sub-superficial desenvolvido por Sloan et al.(1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Este

modelo de armazenamento cinemático é baseado na equação do balanço de massa (balanço de massa líquida) onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle.

Para a aproximação da onda cinemática no escoamento lateral saturado é assumido que a linha de escoamento na zona saturada é paralela ao limite impermeável e o gradiente hidráulico igual à declividade da base.

A fórmula para estimar o escoamento sub-superficial está apresentada a seguir.

$$Q_{lat} = 0,024 \times \left(\frac{2 \times SW_{ly,excess} \times K_{sat} \times slp}{\phi_d \times L_{hill}} \right) \quad (5-16)$$

onde, Q_{lat} é a quantidade de água que escoar sub-superficialmente (mm), $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável de água na camada de solo (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹), slp é a declividade média da sub-bacia (m.m⁻¹), ϕ_d é a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm⁻¹) e L_{hill} é o comprimento do declive (metros).

Escoamento Subterrâneo

Segundo Dingman (1994), um aquífero é uma unidade geológica que pode armazenar certa quantidade de água e transmiti-la a uma taxa maior o bastante para ser hidrologicamente significativa.

O modelo SWAT simula os dois tipos de aquífero: raso (não-confinado) e profundo (confinado). O aquífero raso ou não-confinado contribui para o escoamento no canal ou trechos das sub-bacias. Já o aquífero profundo ou confinado, apenas é assumido que contribui para o escoamento de água fora da bacia hidrográfica simulada (Arnold et al., 1993).

O escoamento de base ou subterrâneo somente entra no trecho do canal se a quantidade de água armazenada no aquífero exceder um valor limiar especificado pelo usuário (aq_{shchng}). A resposta do estado estacionário do escoamento subterrâneo até a recarga é:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \times K_{sat}}{(L_{gw})^2} \times h_{wtbl} \quad (5-17)$$

onde, Q_w é o escoamento subterrâneo (de base) no canal principal no dia i (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm.dia^{-1}), L_{gw} é a distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (metros), e h_{wtbl} é o altura do lençol freático (metros).

O escoamento subterrâneo pode ser calculado de duas formas: a) quando ocorre recarga, e b) quando não ocorre recarga.

As fórmulas para o escoamento subterrâneo com recarga estão apresentadas a seguir.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \times \exp[-\alpha_{gw} \times \Delta t] + w_{rchrq,sh} \times (1 - \exp[-\alpha_{gw} \times \Delta t])$$

se $aq_{ch} > aq_{shthr,q}$ (5-18)

$$Q_{gw,i} = 0$$

se $aq_{ch} \leq aq_{shthr,q}$ (5-19)

onde, $Q_{gw,i}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm), $Q_{gw,i-1}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia $i-1$ (mm), K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}), α_{gw} é a constante de recessão de escoamento de base, Δt é o passo de tempo (valor igual à 1), $w_{rchrq,sh}$ é a quantidade de água de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm), aq_{ch} é a quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i (mm) e $aq_{shthr,q}$ é o nível limiar de água no aquífero raso para que ocorra contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

Já para o escoamento subterrâneo quando não ocorre a recarga do aquífero, as fórmulas são as apresentadas abaixo.

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \times \exp[-\alpha_{gw} \times t]$$

se $aq_{ch} > aq_{shthr,q}$ (5-20)

$$Q_{gw,i} = 0$$

se $aq_{ch} \leq aq_{shthr,q}$ (5-21)

onde, Q_{gw} é o escoamento subterrâneo no canal principal no tempo t (mm), $Q_{gw,0}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no início da recessão ($t = 0$) (mm), α_{gw} é a constante de recessão de escoamento de base, t é o tempo passado desde o início da recessão (valor igual à 1), aq_{z_0} é a quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i (mm) e $aq_{z_{limiar}}$ é o nível limiar de água no aquífero raso para que ocorra contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

Evapotranspiração

A Evapotranspiração é um termo coletivo que inclui todos os processos do qual a água da superfície terrestre é convertida em vapor de água. Ela inclui a evaporação das copas de árvores, transpiração, sublimação e evaporação pelo sol.

O modelo permite calcular a evapotranspiração potencial por três métodos: a) Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989), b) Priestley-Taylor (Priestley-Taylor, 1972), e c) Hargreaves (Hargreaves et al., 1985).

O método de Penman-Monteith necessita de dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Este método combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, o estreito mecanismo requerido para remover o vapor de água e os termos aerodinâmicos e de resistência superficial. A Equação 5-22 representa o método de Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \frac{\rho_{air} \times c_p \times [e_s^0 - e_z]}{r_a}}{\Delta + \gamma \times (1 + r_a / r_a)} \quad (5-22)$$

onde, λE é o fluxo de densidade do calor latente ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), E é a altura da taxa de evaporação ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), Δ é a declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura, H_{net} é a radiação líquida ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor do chão ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), ρ_{air} é a densidade do ar ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p é o calor específico a pressão constante ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), e_s^0 é a pressão de saturação do vapor no ar na altitude z (kPa), e_z é a pressão de vapor da água no ar na altitude z

(kPa), γ é a constante psicrométrica (kPa.°C⁻¹), r_c é a resistência de interceptação vegetal (s.m⁻¹) e r_a é a resistência aerodinâmica (s.m⁻¹).

Determinada a evapotranspiração potencial, o modelo calcula a evapotranspiração real. O modelo SWAT calcula primeiramente a evaporação de toda a precipitação interceptada pela cobertura vegetal, depois a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de evaporação do solo.

A evaporação é determinada a partir da evapotranspiração potencial separada em duas condições. Se a evapotranspiração potencial (E_o) é menor que a quantidade de água livre mantida nas copas (R_{int}), então é utilizada a Equação 5-23. Se a evapotranspiração potencial (E_o) é maior que a quantidade de água livre mantida nas copas (R_{int}) é utilizada a Equação 5-24.

$$E_a = E_{can} = E_o \rightarrow R_{int(f)} = R_{int(i)} - E_{can} \quad (5-23)$$

$$E_a = R_{int(f)} \rightarrow R_{int(f)} = 0 \quad (5-24)$$

onde, E_a é a quantidade de evapotranspiração real que ocorre numa bacia hidrográfica (mm.d⁻¹), E_{can} é a quantidade de evaporação da água livre nas copas (mm.d⁻¹), E_o é a evapotranspiração potencial (mm.d⁻¹), $R_{int(i)}$ é a quantidade inicial de água livre mantida nas copas (mm.d⁻¹) e $R_{int(f)}$ é a quantidade final de água livre mantida nas copas (mm.d⁻¹).

A transpiração é calculada pela Equação 5-22 quando o método de Penman-Monteith é selecionado para calcular a evapotranspiração potencial.

A quantidade de evaporação do solo é estimada pela utilização de funções exponencial conforme a profundidade do solo e da quantidade de água. Portanto, o SWAT divide a demanda de evaporação entre as diferentes camadas. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água que pode ser evaporada é calculada pela seguinte equação.

$$E_{solo,z} = E_s'' \times \frac{z}{z + \exp(2,374 - 0,00713 \times z)} \quad (5-25)$$

onde, $E_{solo,z}$ é a demanda de evaporação na profundidade z (mm), E_g^m é a evaporação máxima da água no solo (mm.d^{-1}), e z é a profundidade da camada do solo a partir da superfície (mm).

Erosão – Produção de Sedimentos

A erosão causada pela chuva e pelo escoamento total de água na bacia hidrográfica é estimada com a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (*Modified Universal Soil Loss Equation* – MUSLE). A MUSLE é uma versão modificada da Equação Universal de Perda de Solos (*Universal Soil Loss Equation* – USLE) desenvolvido por Wischmeier e Smith (1965, 1978).

A USLE estima a erosão bruta anual média em função da energia da precipitação, do manejo, dos usos do solo, do tipo do solo e do relevo. Já a MUSLE utiliza a quantidade de escoamento para simular a erosão bruta e a produção de sedimentos, representando a energia utilizada na desagregação e transporte de sedimentos. Essa alteração de fórmulas resulta em alguns benefícios: a) a precisão do modelo aumenta pelo fato de que o escoamento é uma função das condições umidade antecedente, assim como a energia da chuva; b) a taxa de transporte é eliminada pois o fator que representa a energia é o escoamento e não somente a precipitação utilizada na USLE apenas na desagregação; e c) permite que seja utilizada em eventos isolados.

$$SED = 11,8 \times (Q_{sup} \times Q_{pico} \times A_{hru})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (5-26)$$

onde, SED é a produção de sedimentos (ton.dia^{-1}), Q_{sup} é o volume de escoamento superficial (mm.ha^{-1}), Q_{pico} é a vazão de pico ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), A_{hru} é a área da unidade de resposta hidrológica (HRU) (ha), K é o fator de erodibilidade do solo, C é o fator de cobertura e manejo, P é o fator de práticas conservacionistas, LS é o fator topográfico, e $CFRG$ é o fator de fragmento grosseiro.

O fator de erodibilidade do solo (K) foi determinado pela equação desenvolvida por Wischmeier et al. (1971) (Neitsch *et al.*, 2005).

$$K_{USLE} = \frac{0,00021 \times M^{1,14} \times (12 - OM) + 3,25 \times (C_{soilstr} - 2) + 2,5 \times (C_{perm} - 3)}{100} \quad (5-27)$$

onde, K_{USLE} é o fator de erodibilidade do solo, M é o parâmetro de tamanho das partículas, OM é a porcentagem de matéria orgânica (%), $C_{soilstr}$ é o código de estrutura do solo utilizado na classificação do solo, e C_{perm} é a classe de permeabilidade do perfil.

A permeabilidade é definida como a capacidade do solo em transmitir água e ar entre os mais restritos horizontes quando úmidos. Segundo Neitsch et al. (2005), as classes de permeabilidade são baseadas na menor condutividade hidráulica saturada do perfil. Os valores para o parâmetro C_{perm} estão apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Classes de C_{perm} .

C_{perm}	Condutividade Hidráulica Saturada
1	Rápido (> 150 mm.h ⁻¹)
2	Moderado a rápido (50-150 mm.h ⁻¹)
3	Moderado (15-50 mm.h ⁻¹)
4	Lento a moderado (5-15 mm.h ⁻¹)
5	Lento (1-5 mm.h ⁻¹)
6	Muito Lento (< 1 mm.h ⁻¹)

Fonte: Retirado de Neitsch et al. (2005).

Os valores de $C_{soilstr}$ são adotados a partir Tabela 5-4 (Neitsch et al., 2005)

Tabela 5-4 – Classes de $C_{soilstr}$

$C_{soilstr}$	Definição para cada solo
1	Grânulos muito finos
2	Grânulos finos
3	Grânulos médios ou grossos
4	Grânulos em blocos, em placas, prismático ou maciço

Fonte: Retirado de Neitsch *et al.* (2005).

O parâmetro do tamanho das partículas (M) é calculado como apresentado a seguir.

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \times (100 - m_c) \quad (5-28)$$

onde, m_{silt} é a porcentagem de silte no solo (partículas com diâmetro entre 0,002-0,05 mm), m_{vfs} é a porcentagem de ária muito fina no solo (partículas com diâmetro entre 0,05-0,10 mm), e m_c é a porcentagem de argila no solo (partículas com diâmetro menor que 0,002 mm).

A porcentagem de matéria orgânica (MO) é calculada pela fórmula seguinte.

$$MO = 1,72 \times orgC \quad (5-29)$$

onde, MO é a porcentagem de matéria orgânica no horizonte (%) e $orgC$ é a porcentagem de carbono orgânico no horizonte (%).

O fator de cobertura e manejo (C) é definido como a taxa de perda do solo em condições específica num determinado estágio da cultura. O SWAT calcula o valor diário de C dependendo da variação da cobertura vegetal durante o ciclo de crescimento da planta.

$$C_{USLE} = \frac{\exp\{[\ln(0,8) - \ln(C_{USLE,mm})] \times \exp[-0,00115 \times rsd_{surf}]\}}{\ln[C_{USLE,mm}]} \quad (5-30)$$

onde, C_{USLE} é o fator de cobertura e manejo, $C_{USLE, mn}$ é o valor mínimo para o fator de cobertura e manejo, rsd_{surf} é a quantidade de resíduo na superfície do solo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

O valor mínimo do fator de cobertura e manejo ($C_{USLE, mn}$) é calculado conforme a Equação 5-31.

$$C_{USLE, mn} = 1,463 \times \ln(C_{USLE, aa}) + 0,1034 \quad (5-31)$$

onde, $C_{USLE, aa}$ é o fator anual médio para o fator de cobertura e manejo.

O fator de práticas conservacionistas (P) é definido como a taxa de perda de solo com uma específica prática conservacionista, esta prática pode ser plantio em nível, terraceamento e plantio em faixas. O plantio em nível fornece quase completa proteção contra a erosão de precipitações com intensidade baixa a moderada, mas pouca ou nenhuma proteção contra eventos intensos. Os valores de P para determinada declividade do solo (%) é mostrado na Tabela 5-5.

Tabela 5-5 – Relação entre declividades do solo e valores de P apresentado por Wischmeier e Smith (1978).

Declividade do solo (%)	P
1 a 2	0,60
3 a 5	0,50
6 a 8	0,50
9 a 12	0,60
13 a 16	0,70
17 a 20	0,80
21 a 25	0,90

O fator topográfico (LS) é a taxa esperada de perda do solo para uma condição de terreno uniforme com declividade de 9% e 22,1 metros de comprimento do declive. Este fator é calculado conforme a equação apresentada a seguir.

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22,1}\right)^m \times (65,41 \times \text{sen}^2(\alpha_{hill}) + 4,56 \times \text{sen}(\alpha_{hill}) + 0,065) \quad (5-32)$$

onde, L_{hill} é o comprimento da encosta (m), m é o termo exponencial, e α_{hill} é o ângulo da declividade da encosta. O termo exponencial é calculado pela Equação 5-33.

$$m = 0,6 \times (1 - \exp[-35,835 \times slp]) \quad (5-33)$$

onde, slp é a declividade da unidade de resposta hidrológica (m.m^{-1}).

A relação entre α_{hill} e slp é expressa pela Equação 5-34.

$$slp = \tan(\alpha_{hill}) \quad (5-34)$$

onde, slp é a declividade do unidade de resposta hidrológica (m.m^{-1}).

O fator de fragmento grosseiro (CFRG) pode ser determinado pela Equação 5-35.

$$CFRG = \exp(-0,053 \times rock) \quad (5-35)$$

onde, $CFRG$ é o fator de fragmento grosseiro e $rock$ é a porcentagem de cascalho na primeira camada do solo (%).

O fator de erosividade da precipitação pode ser determinado pela Equação 5-36.

$$EI_{USLE} = E_{STORM} \times I_{30} \quad (5-36)$$

onde, EI_{USLE} é o fator de erosividade da precipitação ($0,017 \text{ ton.cm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), E_{STORM} é a energia total de tormenta ($0,017 \text{ ton.m}^{-2}$) e I_{30} é a intensidade máxima de 30 minutos (mm.h^{-1}).

Crescimento Vegetal

As condições de cobertura vegetal e de resíduos das culturas são essenciais para a estimativa do desprendimento e transporte de partículas do solo. O SWAT estima diariamente o crescimento de plantas pela aplicação de uma versão simplificada do modelo de crescimento de planta EPIC (Williams et al., 1984). Este modelo utiliza os conceitos de desenvolvimento fenológico da planta com base na unidade de calor acumulada diariamente (graus/dia), do índice de colheita e do potencial de biomassa e do ajustamento do estresse devido a água e temperatura. O SWAT simula o crescimento de culturas anuais e perenes.

Manejo agrícola

A principal meta da modelagem ambiental é avaliar o impacto das atividades humanas em certo sistema. O centro desta avaliação está na pontualização das práticas de manejo do solo e da água que são exercidas dentro de certo sistema. O componente manejo agrícola fornece sub-modelos que simulam plantio, colheita, aplicações de irrigação, nutrientes, pesticidas e operações de cultivo.

O componente manejo agrícola pode ser dividido em duas seções. A primeira considera as condições iniciais de práticas de manejo que nunca sofrem alteração durante a simulação, e a segunda enumera uma programação de operações de manejo que ocorrem em tempos específicos.

Propagação no canal principal

A propagação no canal principal consiste nos componentes: (i) propagação da vazão líquida; (ii) propagação da vazão sólida; e (iii) propagação química. A descrição detalhada dos componentes do método de propagação pode ser consultada em Arnold et al. (1995). A propagação química não foi utilizada neste estudo.

Propagação da Vazão Líquida no Curso d'Água

A propagação da água pelo curso d'água é realizada pelo método do armazenamento variável que foi desenvolvido por Williams (1969). Os dados requeridos pelo modelo incluem comprimento, declividade, profundidade, declividade lateral e o parâmetro de rugosidade de Manning (n) do curso d'água. Além de necessitar de declividade e n da margem de inundação. A taxa de escoamento e a velocidade média são calculadas a partir da equação de Manning e o tempo de propagação é computado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade. O fluxo a partir do curso d'água é ajustado para a perda por transmissão, evaporação e fluxo de retorno.

Propagação da Vazão Sólida no Curso d'Água

O transporte de sedimentos nos cursos d'água é função de dois processos que ocorrem simultaneamente: i) deposição; e ii) degradação. A componente deposição é baseada na velocidade de queda e a componente degradação tem como base o conceito de força de escoamento desenvolvido por Bagnold (1977).

A deposição no curso d'água através das sub-bacias é baseada na velocidade de queda das partículas de sedimentos. A velocidade de queda é calculada como função do diâmetro das partículas fundamentada na Lei de Stokes.

A degradação é determinada pela força de escoamento. A força de escoamento é definida por Bagnold (1977) como o produto da densidade de água, da taxa de vazão e da declividade da água superficial.

O SWAT utiliza equações simplificadas. A máxima quantidade de sedimentos que pode ser transportada a partir de um segmento do curso d'água é uma função da velocidade da vazão de pico.

Reservatórios

O SWAT simula quatro tipos de corpos d'água: açudes, áreas alagáveis, depressões e reservatórios. As três primeiras são localizadas dentro da sub-bacia, e fora do canal principal. Já os reservatórios são localizados no canal principal e assim recebem água de todas as sub-bacias à montante.

O balanço hídrico calculado para o reservatório locado na bacia é realizado pela Equação 5-37.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} + V_{seep} \quad (5-37)$$

onde, V é o volume de água no reservatório no final do dia (m^3), V_{stored} é o volume de água armazenado no reservatório no começo do dia (m^3), V_{flowin} é o volume de água que entra no reservatório durante o dia (m^3), $V_{flowout}$ é o volume de água que sai do reservatório durante o dia (m^3), V_{pcp} é o volume de chuva que cai no reservatório durante o dia (m^3), V_{evap} é o volume de água que é removido do reservatório pela evaporação durante o dia (m^3), e V_{seep} é o volume de água que é perdido pelo fundo do reservatório durante o dia (m^3).

Entrada de dados no SWAT

A entrada de dados é realizada através da interface desenvolvida entre o SWAT e o ArcView, denominada ArcSWAT. A Figura 5-2 apresenta o fluxograma de operação do modelo SWAT.

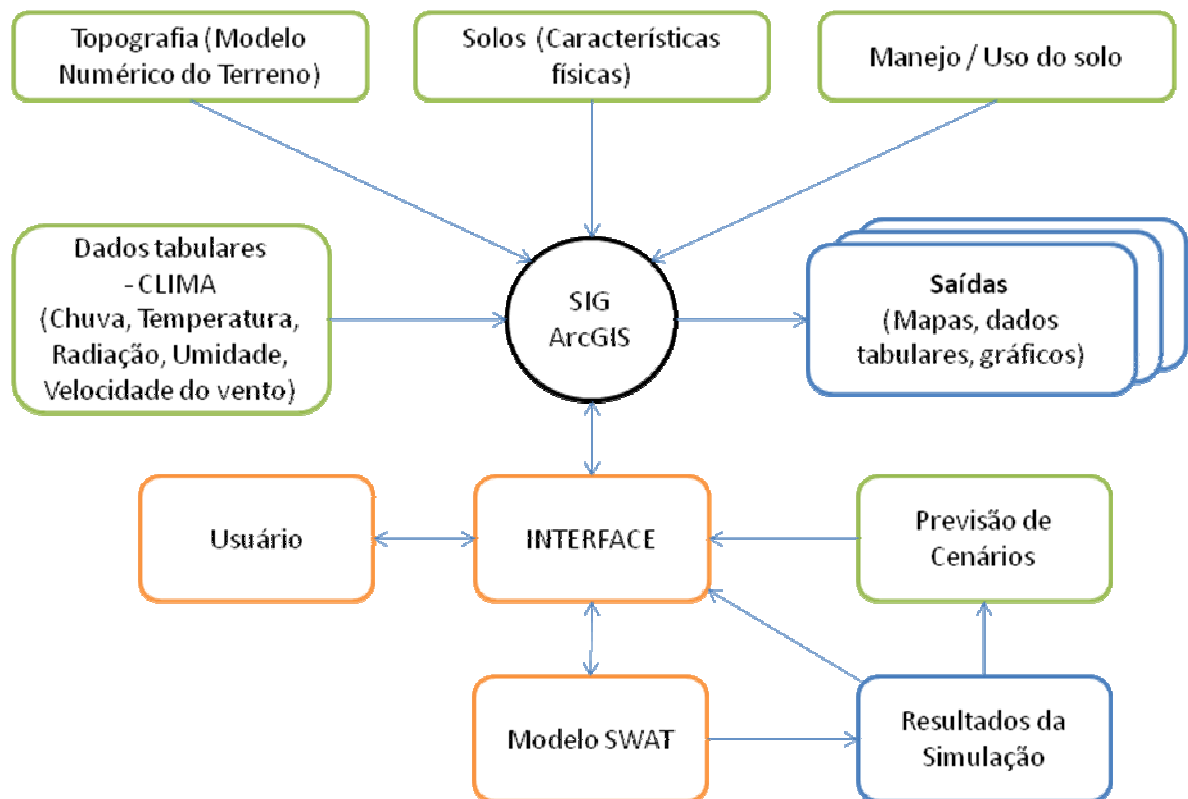


Figura 5-2 – Procedimentos para geração da base de dados e simulações do modelo SWAT via SIG (Adaptado de Machado, 2002).

5.2 Métodos

5.2.1 Seleção da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Preto é uma das sub-bacias da bacia do Alto Rio Negro que faz parte do projeto desenvolvido pelo Laboratório de Hidrologia (LabHidro) “Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Alto Rio Negro - Região Sul - Brasileira”. O objetivo deste projeto é monitorar a vazão líquida e sólida nos rios e alguns parâmetros meteorológicos em pequenas bacias hidrográficas que fazem parte da bacia do Alto Rio Negro, localizada na divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina, a fim de compreender o comportamento dos processos hidrossedimentológicos em nível de bacias caracterizadas pela Floresta Ombrófila Mista (Floresta de Araucária), pelo reflorestamento de pinus e atividade agro-pastoril. Além disso, o projeto objetiva também modelar esses processos em diferentes usos do solo, utilizando modelos hidrológicos distribuídos, como o modelo SWAT, objeto deste estudo.

5.2.2 Geração dos Planos de Informação

5.2.2.1 Geração do Modelo Numérico do Terreno (MNT)

O modelo digital de elevação consiste na representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno, vinculada a uma superfície real. Essa superfície, em geral, é contínua e o fenômeno que ela representa pode ser variado. Dentre as aplicações de um MNT pode-se citar armazenamento de dados altimétricos para produzir mapas topográficos, de declividade, aspecto e de exposição, entre outros (Burrough, 1986):

No processo de modelagem numérica do terreno podem-se distinguir duas etapas: i) aquisição de um conjunto de dados amostrais representativos do fenômeno de interesse (solo, cotas altimétricas, precipitação, temperaturas, etc.), ii) interpolação dos dados amostrados, ou seja, o modelo propriamente dito que envolve a elaboração de uma estrutura de dados e a definição da superfície de ajuste, visando obter uma representação contínua do fenômeno a partir dos dados amostrados.

Para a representação do relevo da bacia do Rio Preto foi gerado um modelo digital de elevação (caso específico de MNT para dados topográficos) a partir de curvas de nível em formato vetorial, obtidas de cartas topográficas digitais, disponibilizadas pela EPAGRI/CIRAM (2008), na escala 1:50.000, projeção UTM, Datum vertical de Imbituba-SC e horizontal SAD-69, fuso 22S.

Para elaboração do MDE foi utilizado o método de redes triangular irregular (TIN - *Triangular Irregular Network*) baseado no critério de Delaunay. Esse método é utilizado para representar modelos de estruturas contínuas. Para isso, foram utilizados arquivos digitais de curvas de nível (isolinhas), com equidistância de 20 m, e pontos cotados. O MDE foi gerado com uma resolução de células de 30 m, por meio do algoritmo de triangulação (TIN) disponibilizado no SIG ArcGis 9.2.

5.2.2.2 Solos

O mapa de solos da bacia do Rio Preto foi elaborado com base no levantamento de solos realizado em 2004 pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM/EPAGRI, 2004) em escala 1:250.000.

5.2.2.3 Uso e Cobertura do Solo

Para a elaboração do mapa de uso do solo da bacia do Rio Preto, foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5, referentes às órbitas/ponto 220/78, 221/78 e 220/79, com data de julho de 2007.

As imagens de satélite, quando não corrigidas geometricamente, apresentam uma série de distorções espaciais (variações da altitude, posição, deslocamento devido ao relevo, instabilidade da plataforma que carrega os sensores, entre outros) não possuindo, portanto, uma precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos nelas representados. Isto significa que a posição de objetos presentes na imagem sem correção geométrica nem sempre pode ser considerada correta (Crosta, 1992).

A correção geométrica consiste em reorganizar os *pixels* das imagens em relação a um sistema de projeção cartográfica de modo que assumam as propriedades de escala e de projeção de um mapa (Novo, 1992; Crosta, 1992; Centeno, 2003).

Assim, a correção geométrica das imagens foi realizada por meio do processo de reamostragem dos *pixels*, empregando uma transformação baseada em pontos de controle (pontos de posição conhecida). Os pontos de controle foram obtidos a partir das cartas topográficas (escala 1:50.000, projeção UTM, DATUM SAD-69, Fuso 22S) que abrangem a área de estudo e em campo por meio de GPS (Sistema de Posicionamento Global).

Para determinar o valor dos *pixels* da nova imagem, empregou-se o método de reamostragem por interpolação pelo vizinho mais próximo. Este método preserva o valor do pixel original e é apropriado quando se pretende realizar uma classificação digital para a determinação do uso do solo (Crosta, 1999).

O erro médio para as três cenas utilizadas neste estudo foi de aproximadamente, 1,37 m, portanto, aceitável para imagens com 30m de resolução, como é o caso das imagens Landsat/TM-5. Desta forma, foram obtidas imagens georreferenciadas, com projeção UTM.

A etapa seguinte consistiu na classificação automática das imagens, objetivando a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo da bacia. Para esse estudo foram definidas 6 classes de uso do solo:

- i) Reflorestamento: essa classe corresponde às áreas com reflorestamento de espécies exóticas como, pinus e eucalipto;
- ii) Vegetação nativa: nessa classe estão representadas as áreas com Floresta Ombrófila Mista nos diferentes estágios de crescimento e de regeneração;
- iii) Pastagem: a classe de pastagem contempla áreas de pastagem natural e plantada;
- iv) Água: representa os corpos de água em geral, como rios, córregos, lagos naturais e artificiais;
- v) Solo Exposto: essa classe abrange áreas de solo exposto, em época de preparo para o plantio e estradas.
- vi) Agricultura: corresponde às áreas com diferentes tipos de culturas anuais cultivadas na região;

A partir da definição das classes de uso e cobertura do solo, foram coletadas amostras de treinamento (conjuntos de *pixels*) representativas de cada uma, por meio de digitalização em tela, dos padrões de uso do solo. Em seguida, foi feita uma classificação automática, utilizando o método de Máxima Verossimilhança (MaxVer). Segundo Richards (1999), a classificação por máxima verossimilhança é uma das técnicas de classificação supervisionada mais utilizadas em dados de sensoriamento remoto. A função de decisão MaxVer considera a probabilidade “a priori” igual para todas as classes. Este método descreve os valores dos *pixels* de uma amostra de treinamento por uma função de densidade de probabilidade. Assim, o classificador examina a probabilidade de um pixel pertencer a uma determinada classe e o classifica na que tiver maior probabilidade (Crosta, 1999).

A função decisão é apresentada a seguir pela Equação 5-38.

$$G_i(x) \propto -\frac{1}{2} \cdot \ln \Sigma_i - \frac{1}{2} \cdot (x - \mu_i)' \times inv(\Sigma_i) (x - \mu_i) \quad (5-38)$$

Onde: Σ_i é a matriz variância-covariância das classes, x e μ são os vetores de média de CD de todas as classes (x) e vetor de média em cada classe, nas diferentes bandas (m). Os parâmetros da função de decisão são obtidos através das amostras de treinamento.

Para conferência das áreas de uso e ocupação do solo obtidas por meio das imagens de satélite, foram feitos levantamentos de campo com GPS, onde foram coletados pontos de amostragem em cada uso do solo. Posteriormente foi realizada a conferência dos dados de uso do solo obtidos no campo com os determinados pelo algoritmo de classificação das imagens.

5.2.3 Dados Tabulares

5.2.3.1 Clima

O modelo SWAT requer dados médios mensais de parâmetros meteorológicos para o gerador climático. Portanto, foram realizados estes cálculos para a estação meteorológica pertencente à bacia hidrográfica em estudo e estão apresentados no Quadro 5-1.

Quadro 5-1– Parâmetros mensais requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.

Parâmetros	
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIN_YRS	Número de anos dos dados meteorológicos observados que foram utilizados para calcular o RAIN_HHMAX
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês.
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês.
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia ⁻¹)
PCPSKW	Coefficiente Skew para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês

RAINHHMX	Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês ($^{\circ}\text{C}$)
WNDVAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s^{-1})

A evapotranspiração potencial (ETP) pode ser estimada no modelo por três modos: a) Hargreaves, b) Priestley-Taylor, e c) Penman-Monteith. Para este trabalho foi utilizado o método de Penman-Monteith para estimar a ETP.

5.2.3.2 Solos

Os dados tabulares de solos requeridos pelo modelo SWAT são divididos em duas partes: i) parâmetros do tipo de solo; e ii) parâmetros da camada do solo.

- i) Parâmetros do tipo de solo são os seguintes: a) nome do solo; b) número de camadas; c) grupo hidrológico do solo; d) profundidade total; e) porosidade do solo.
- ii) Parâmetros de cada camada são os seguintes: a) profundidade da camada; b) densidade do solo na camada; c) capacidade de água disponível na camada; d) carbono orgânico; e) condutividade hidráulica da camada; f) porcentagem de argila; g) porcentagem de silte; h) porcentagem de areia; i) porcentagem de rocha; j) albedo; e k) fator de erodibilidade da camada (K).

Os dados de solos foram retirados do levantamento de reconhecimento de solos de Santa Catarina realizado pela EMBRAPA em 2004 (EMBRAPA, 2004a). Os dados não retirados deste levantamento (quantidade de água disponível na camada de solo - θ_v , fator de erodibilidade do solo - K_{USLE} e matéria orgânica - MO) foram calculados conforme estão apresentados a seguir.

Rawls (1995) desenvolveu uma fórmula por meio de regressão linear a partir de 5320 horizontes de 1323 lugares em 12 estados americanos para descrever a retenção de água no solo.

Sabendo-se que a capacidade de água disponível no solo é a diferença entre o valor da capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, o valor da capacidade de água disponível na camada de solo foi calculado a partir da seguinte fórmula.

$$\theta_V = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (5-39)$$

onde, θ_V é a quantidade de água disponível na camada de solo em volume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), θ_{CC} é a capacidade de campo do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) e θ_{PMP} é o ponto de murcha permanente do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente são calculados segundo a fórmula proposta por Rawls (1982).

$$\theta = a + (b \times \text{areia}) + (c \times \text{silte}) + (d \times \text{argila}) + (e \times MO) + (f \times \rho_b) \quad (5-40)$$

onde, θ é a quantidade de água na camada de solo em volume ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), **areia** é a porcentagem de areia presente no solo, **silte** é a porcentagem de silte presente no solo, **argila** é a porcentagem de argila presente no solo, **MO** é a porcentagem de matéria orgânica do solo, ρ_b é a densidade do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) e **a, b, c, d, e** e **f** são constantes determinadas pela regressão linear realizada por Rawls (1982). A quantidade de matéria orgânica (**MO**) foi calculada pela Equação 5-29.

Os valores encontrados por Rawls (1982) para as constantes **a, b, c, d, e** e **f** estão apresentados na Tabela 5-6.

Tabela 5-6 – Valores das constantes encontradas por Rawls (1982).

Parâmetros	Capacidade de campo (-33 kPa)	Ponto de murcha permanente (-1500 kPa)
<i>a</i>	0,2576	0,0260
<i>b</i>	-0,0020	+
<i>c</i>	+	+
<i>d</i>	0,0036	0,0050
<i>e</i>	0,0299	0,0158
<i>f</i>	+	+

+ valores estatisticamente insignificantes para o cálculo da quantidade de água no solo, segundo Rawls (1982).

Para o cálculo do fator de erodibilidade para cada tipo de solo foi utilizada a equação apresentada por Wischmeier (1971) (Equação 5-41).

$$K_{USLE} = \frac{0,00021 \times M^{1,14} \times (12 - MO) + 3,25 \times (C_{soilstr} - 2) + 2,5 \times (C_{perm} - 3)}{100} \quad (5-41)$$

onde, M é a um valor que depende da quantidade de argila, silte e areia e é calculada pela Equação 5-41, MO é a porcentagem de matéria orgânica do solo, $C_{soilstr}$ é o código de estrutura do solo utilizado na classificação do solo, e C_{perm} é a classe de permeabilidade do perfil.

O cálculo de M está apresentado na Equação 5-42.

$$M = (m_{SILTE} + m_{AMF}) \times (100 - m_C) \quad (5-42)$$

onde, m_{SILTE} é a porcentagem de silte, m_{AMF} é a porcentagem de areia muito fina e m_C é a porcentagem de argila.

O restante dos dados relativos a solos foram retirados das características dos solos do levantamento do perfil de solo disponibilizado pela EMBRAPA (2004). Foram adotados os seguintes perfis para os respectivos tipos de solo:

- Cambissolo Háplico alumínico (CXa): perfil E239;
- Nitossolo Bruno alumínico (NBa): perfil E199;
- Latossolo Bruno alumínico (LBA): perfil E121; e
- Neossolo Litólico distrófico (RLd): perfil E120.

5.2.3.3 Reservatórios

Os dados tabulares dos reservatórios existentes na bacia do Rio Preto foram inseridos no banco de dados do modelo são de dois tipos: i) características do reservatório; e ii) manejo do reservatório.

- i) As características do reservatório são os seguintes: a) mês de início de operação do reservatório; b) ano de início de operação do reservatório; c) área superficial quando o nível do reservatório está no nível emergencial; d) volume quando o nível do reservatório está no nível emergencial; e) área superficial quando o nível do reservatório está no nível principal; f) volume quando o nível do reservatório está no nível principal; g) concentração inicial de sedimentos; h) concentração normal de sedimentos; i) diâmetro mediano do sedimento; e j) condutividade hidráulica de fundo do reservatório.
- ii) Já os dados de manejo do reservatório são: a) tipo de simulação da vazão de saída do reservatório; b) vazão média de saída no vertedouro; c) início do mês seco; e d) fim do mês seco. Estes dados somente são incluídos no SWAT somente pela adoção dos valores médios anuais de vazão na simulação.

Os dados de volume dos dois reservatórios localizados na área de estudo foram obtidos a partir de levantamentos batimétricos realizados com um ADCP (Figura 5-4), juntamente com um GPS Topográfico de frequência simples (L1) (Figura 5-3). Os dados levantados com GPS foram pós-processados aplicando o método de posicionamento relativo estático utilizando os dados da estação de referência (base) de Campos Novos (SC) para aumentar a precisão das coordenadas dos pontos onde foram levantadas as cotas batimétricas.



Figura 5-3 – Coleta das coordenadas com o GPS topográfico de frequência simples.

O sistema "Mini" RiverSurveyor (comumente chamado de mini-ADCP ou mini-ADP, conforme for o fabricante do aparelho) tem um diâmetro de 10 cm e pesa cerca de 4 kg (Figura 5-5 (a)). O pequeno diâmetro reduz significativamente os distúrbios causados pelo fluxo durante o arraste do transdutor na água. Isto é uma importante vantagem para medição em águas rasas. O mini-ADCP pode ser utilizado tanto em um barco ou em um sistema chamado de RiverCat *Integrated Catamaran System* (ou seja, Sistema Integrado Catamaran) do qual foi utilizado por esse estudo (Figura 5-4 e 5-5 (b)).



Figura 5-4 – Levantamento batimétrico no reservatório 1 utilizando o ADCP com o Catamaran.

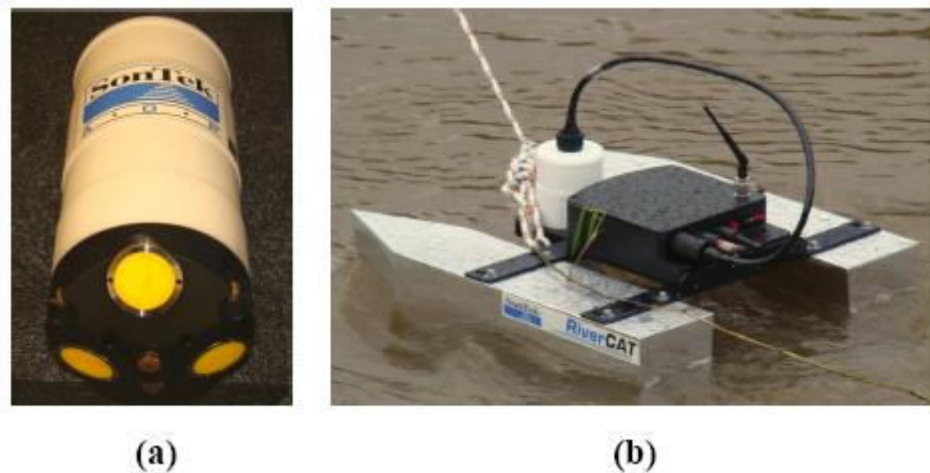


Figura 5-5 – (a) RiverSurveyor "Mini" System, 1.5 MHz; (b) RiverCat Integrado com Sistema Catamaran com GPS interno.

O RiverCat é um sistema próprio para coleta de dados de vazão em rios. Ele é projetado para o uso em rios onde medições com barco são difíceis ou inseguras. A medição pode ser feita simplesmente rebocando o aparelho de uma passagem qualquer próxima do rio, ligado a duas cordas por duas pessoas cada uma de um lado do rio ou ainda usando um sistema de roldanas, com feito nesse estudo. O sistema RiverCat é composto pelo mini-ADCP e por um modem eletrônico (pacote de alimentação tipo “caixa preta” alojado no catamaran). Em tempo real os dados do RiverCat são enviados via rádio modem ao computador que através de um software

próprio grava os dados no disco rígido. Este mini-ADCP opera entre 12-24 volts, nas frequências de 1,5 MHz e 3,0 MHz e possui medição máxima de 6 metros de profundidade.

Com os dados obtidos com o ADCP e o GPS topográfico, foi possível realizar a interpolação com a inclusão dos dados batimétricos e altimétricos nos softwares computacionais ArcGIS e Surfer.

Para o cálculo da vazão média anual dos dois reservatórios, foi adotada uma proporcionalidade entre as áreas de abrangência dos reservatórios e a área total da bacia, ponto onde existem valores medidos de vazão em um longo período de tempo.

5.2.4 Calibração do modelo SWAT

Com o objetivo de calibrar o modelo, foi escolhido o período de dados de 14/12/1993 à 31/12/1997 como apresentado na Figura 5-6.

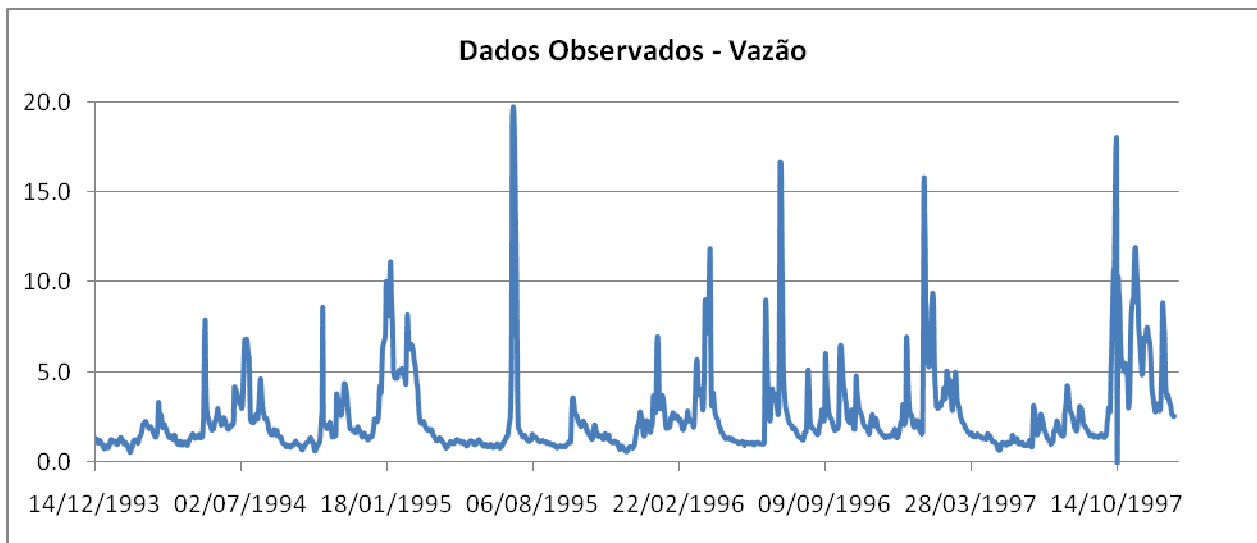


Figura 5-6 – Dados observados de vazão utilizados na calibração do modelo.

No período de calibração, as entradas do modelo são variadas até que um ajuste aceitável é obtido. O modelo então é rodado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e um ajuste será determinado (Arnold *et al.*, 2000). Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado para situações semelhantes às que se quer aplicá-lo. Os

resultados da verificação indicarão se o modelo será capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração (Machado, 2002).

Para este estudo foi utilizado apenas os dados de vazão para a calibração. Apesar de também simular o parâmetro sedimento, os dados observados deste não foram inseridos, pois a quantidade de dados disponíveis no HIDROWEB, da Agência Nacional de Águas (ANA), é significativamente irrelevante, ou seja, é muito pequena e inviável para calibração do modelo.

Para possibilitar a calibração manual e automática e verificar a influência dos parâmetros de entrada, foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada no modelo SWAT. Os resultados da análise estão apresentados no item 6.6.

5.2.4.1 Análises estatísticas para avaliação do desempenho do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo, os dados diários de vazão simulados pelo SWAT foram comparados estatisticamente com os dados observados na bacia hidrográfica do Rio Preto através do coeficiente de Nash e Sutcliffe, NASH, (Equação 5-43) e o desvio dos dados simulados em relação aos dados observados (Dv) (Equação 5-44).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (5-43)$$

onde, NASH é o coeficiente de Nash e Sutcliffe (adimensional), E_m é o evento monitorado (observado), E_s é o evento simulado, \bar{E} é a média do evento observado no período da simulação e n é o número de eventos.

$$Dv = \left(\frac{E - E^*}{E} \right) \times 100 \quad (5-44)$$

onde, Dv é o desvio padrão, E é o evento monitorado (observado) no período analisado e E^* é o evento simulado no mesmo período.

O valor de NASH pode variar desde o negativo infinito até um (1,0), sendo este último o indicativo de que o modelo está com um perfeito ajuste. Já para D_v , o valor varia entre zero (0) e cem (100), sendo que o valor zero (0) indica o perfeito ajuste para este método de avaliação, ou seja, não há desvio entre dados monitorados e simulados.

5.2.5 Taxa de Transferência de Sedimentos

Segundo Silva et al (2003) e Carvalho (2008), a Taxa de Transferência de Sedimento (*SDR* – *Sediment Delivery Ratio*) é a relação entre a quantidade de carga sólida medida na seção transversal do curso d'água e a quantidade total de erosão da bacia contribuinte (Equação 5-45).

$$SDR = \frac{Sed}{E} \quad (5-45)$$

onde, *Sed* é a quantidade de sedimentos transportada em um período pré-determinado ($t.ha^{-1}$) e *E* é a erosão bruta produzida na respectiva bacia hidrográfica em um mesmo período ($t.ha^{-1}$).

Para este estudo foram calculadas as taxas de transferência de sedimentos para todas as bacias com o intuito de verificar o efeito do seu tamanho sobre a produção de sedimentos.

5.2.6 Simulação de cenários

Neste estudo foram escolhidos cinco cenários de uso e cobertura do solo para a bacia do Rio Preto. Os cenários têm por objetivo verificar a mudança de uso e cobertura do solo bem como da operação dos reservatórios na dinâmica hidrossedimentológica, verificada pelos hidrogramas e sedimentogramas. Os cenários simulados foram:

- Cenário 1: Uso e cobertura atual (áreas com mata nativa, agricultura, pastagem, reflorestamento de pinus e outros);
- Cenário 2: Sem ação antrópica (com mata nativa em toda área de estudo);
- Cenário 3: Estágio avançado de degradação (agricultura);
- Cenário 4: Reflorestamento em toda a bacia;

- Cenário 5: Uso e cobertura atual sem a intervenção dos reservatórios.

É importante ressaltar que a adoção destes cenários avalia a mudança do uso do solo e a operação dos reservatórios sobre a dinâmica hidrossedimentológica, não avaliando as modificações devido ao tipo de solo e nem a mudanças de dados climatológicos.

6 Resultados

6.1 Modelo Numérico do Terreno (MNT)

Como resultado obteve-se o modelo digital de elevação da bacia do Rio Preto (Figura 6-1), onde foi observado que a altitude máxima é de 1040 m, mínima de 800 m (exutória da bacia em estudo), apresentando média de 910 m de altitude.

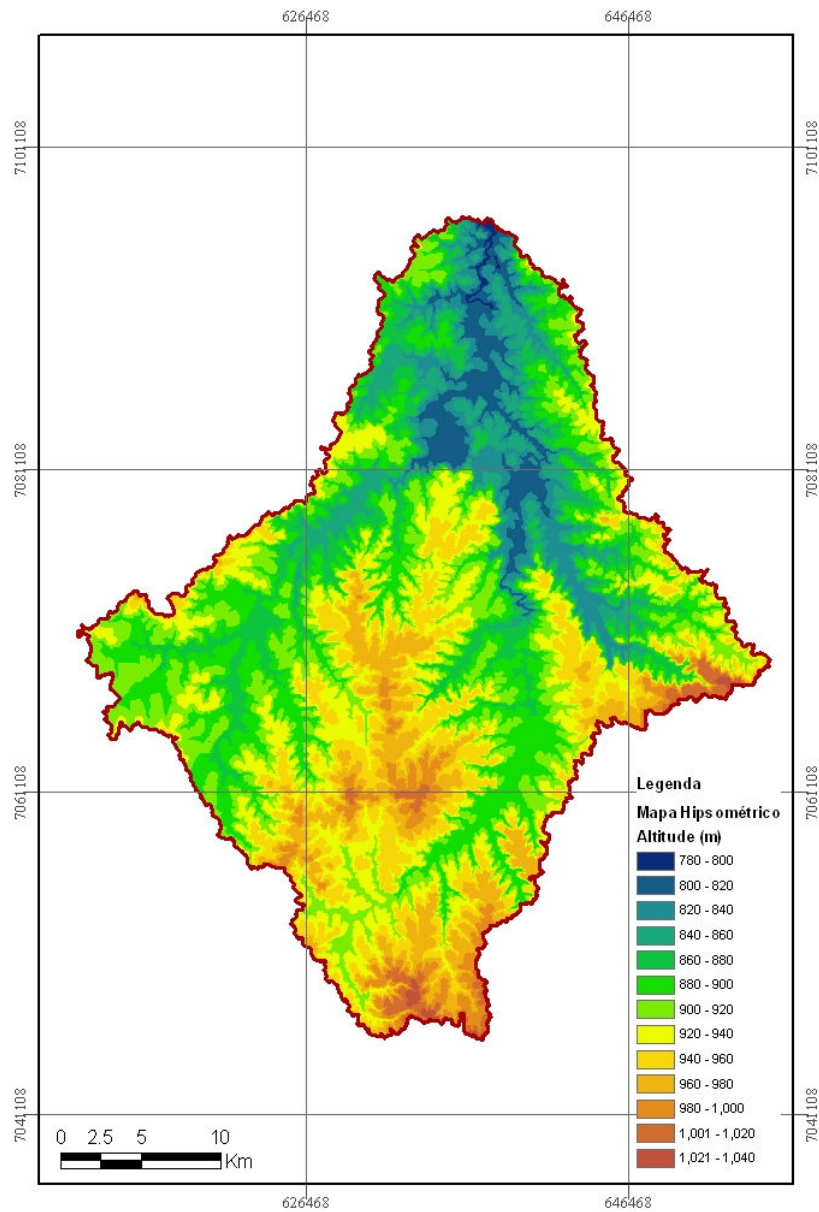


Figura 6-1 – Modelo digital de elevação da bacia do Rio Preto.

6.2 Uso e Cobertura do Solo

A classificação supervisionada (Figura 6-2) permitiu identificar 6 classes de uso e cobertura do solo: 1) Reflorestamento; 2) Vegetação Nativa; 3) Pastagem; 4) Água; 5) Solo Exposto; e 6) Agricultura. Esta figura mostra a distribuição das classes de uso na bacia do Rio Preto.

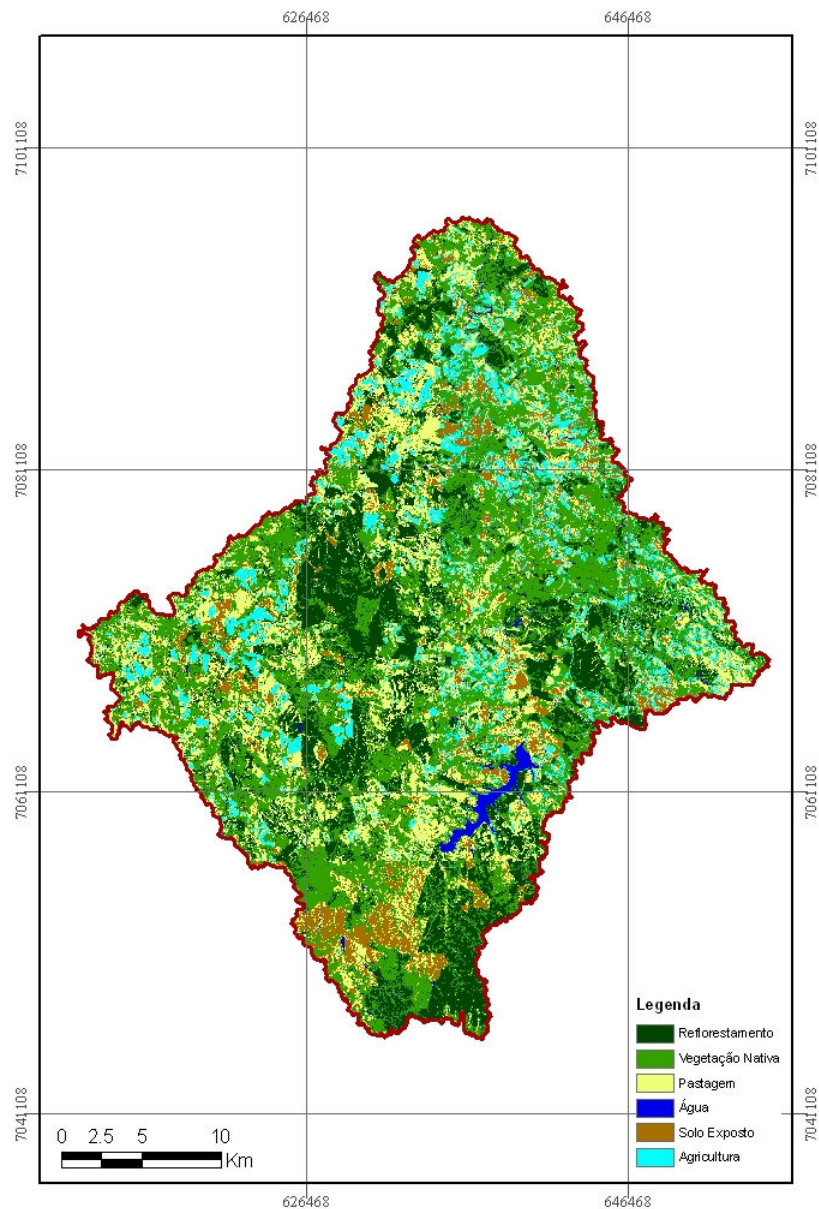


Figura 6-2 – Mapa de uso e cobertura do solo da bacia do Rio Preto.

A Tabela 6-1 apresenta as classes de uso e cobertura do solo e suas respectivas áreas (Km²) e porcentagens que cada uso do solo ocupa na bacia do Rio Preto.

Tabela 6-1– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC).

Uso do Solo	Área (Km²)	%
Vegetação Nativa	382,20	38,20
Pastagem	234,39	23,43
Reflorestamento	206,93	20,68
Agricultura	93,15	9,31
Solo Exposto	72,74	7,27
Água	10,97	1,10
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-2 e a Tabela 6-1 observa-se que na bacia o uso atual predominante é de vegetação nativa, perfazendo 38,20% da área total, seguido de pastagem (23,43%) e de reflorestamento (20,68%) considerando que a tomada da imagem do satélite Landsat TM-5 foi realizada no mês de julho de 2007. Verifica-se que 7% da área apresentam solo exposto e 9,31% coberto por culturas anuais. Os corpos de água ocupam 1,1% (10,97 ha) da área total.

6.3 Solos

Os solos da bacia do Rio Preto foram classificados conforme a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2005). A Tabela 6-2 apresenta as áreas (Km²) e as porcentagens que cada solo ocupa na bacia estudada.

Tabela 6-2– Classes de solo na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC).

Classes de Solo	Área (Km²)	%
Cambissolo Háptico alumínico - CXa	858,61	85,83
Nitossolo Bruno alumínico - NBa	120,21	12,02
Latossolo Bruno alumínico - LBa	16,81	1,66
Neossolo Litólico distrófico - RLd	0,37	0,04
Água	4,41	0,44
Total	1000,41	100

O mapa de solos da bacia do Rio Preto está apresentado na Figura 6-3.

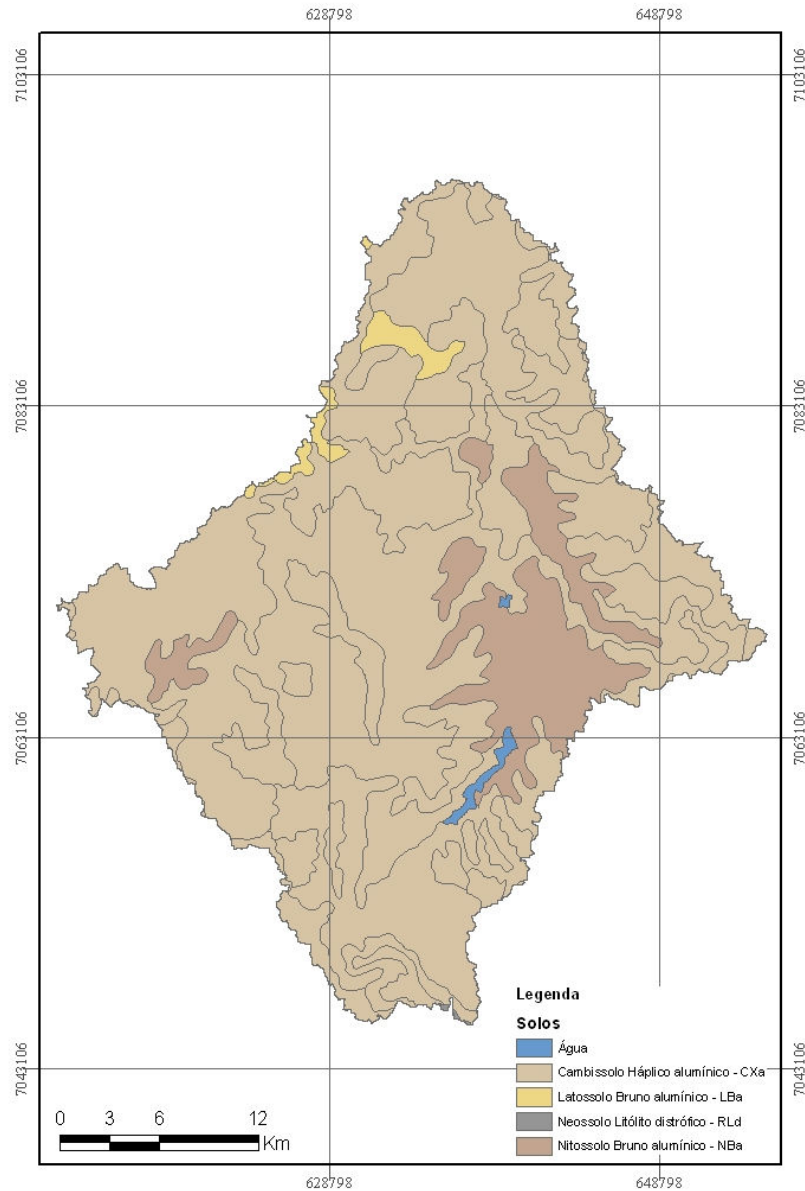


Figura 6-3 – Classes de solos da bacia do Rio Preto (EPAGRI/CIRAM, 2002)

Analisando a Figura 6-3 e a Tabela 6-2 verifica-se que a classe de Cambissolo Háplico aluminico (CXa) ocupa 85,83% da área total da bacia, seguido do Nitossolo Bruno aluminico com 12,02%, Latossolo Bruno aluminico com 1,66% e Neossolo Litólico distrófico com 0,04%.

6.4 Dados tabulares

6.4.1 Clima

Os resultados da análise das medições da estação meteorológica da EPAGRI para a bacia do Rio Preto referente aos parâmetros requeridos pelo modelo SWAT (descritas no Quadro 5-1 do item 5.2.3.1) estão apresentados nas Tabelas 6-3 e 6-4.

Tabela 6-3– Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT.

Mês	TMPMN	TMPMX	TMPSTDMN	TMPSTDMX	PCPMM	PCPSTD	PCPD
Janeiro	12.70	31.82	2.07	1.62	224.17	102.02	17.67
Fevereiro	12.51	31.21	2.06	0.78	149.96	49.57	15.67
Março	11.37	30.89	2.30	1.38	138.29	64.71	14.72
Abril	6.13	29.06	3.44	1.05	108.84	77.11	10.11
Mai	2.45	26.63	2.63	1.48	127.99	139.38	9.72
Junho	2.30	25.23	2.32	1.29	126.76	59.63	9.22
Julho	1.13	25.96	1.05	1.54	139.98	70.32	9.50
Agosto	1.19	28.86	1.29	2.04	104.24	90.10	7.33
Setembro	3.33	29.83	2.33	2.93	174.22	96.39	13.11
Outubro	7.58	30.81	2.30	1.16	187.32	60.24	14.67
Novembro	8.64	31.61	1.59	1.72	141.93	63.38	13.00
Dezembro	10.52	32.44	2.18	1.72	171.38	75.31	13.94

Tabela 6-4– Valores dos parâmetros mensais para a estação meteorológica utilizada nas simulações no modelo SWAT (cont.)

Mês	PCPSKW	PR_W1	PR_W2	DEWPT	RAINHHMX	WNDVAV	SOLARAV
Janeiro	0.20	0.89	0.65	13.60	34.25	2.70	15.98
Fevereiro	0.20	1.03	0.59	12.86	22.91	2.52	18.47
Março	1.20	0.73	0.60	10.76	21.13	2.47	10.83
Abril	1.33	0.56	0.43	7.32	16.63	2.34	9.89
Mai	2.39	0.47	0.47	6.50	19.56	2.16	10.33
Junho	0.25	0.45	0.45	4.81	19.37	2.04	9.96
Julho	0.15	0.48	0.46	4.61	21.39	2.27	9.86
Agosto	1.14	0.33	0.43	7.09	15.93	2.29	14.33
Setembro	0.17	0.62	0.62	9.51	26.62	2.89	14.83
Outubro	-0.28	0.74	0.57	10.13	28.62	2.85	17.32
Novembro	0.36	0.74	0.52	12.06	21.68	3.24	19.82
Dezembro	0.60	0.67	0.59	13.42	26.18	2.91	13.47

6.4.2 Solos

Os resultados dos cálculos necessários para os dados de entrada no modelo SWAT no que diz respeito aos solos estão apresentados nas Tabelas 6-5, 6-6 e 6-7 estão representados por camadas A e B. Estes dados foram retirados do levantamento de reconhecimento de solos de Santa Catarina realizado pela EMBRAPA em 2004 (EMBRAPA, 2004a) ou, quando não medidos por este levantamento, foram estimados a partir deles.

Tabela 6-5– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT

Parâmetros	Cambissolo	Nitossolo	Latossolo	Neossolo
Nome	CXa	NBa	LBa	RLd
Número de Horizontes	2	2	2	1
Grupo Hidrológico	C	C	C	C
Profundidade Total [mm]	180	180	250	60

**Tabela 6-6– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT
(cont.)**

Parâmetros	Cambissolo	Nitossolo
Profundidade da camada (cm)	30 (A)	30 (A)
	180 (B)	180 (B)
Densidade (mg.l ⁻¹)	1,3	1,3
Capacidade de água disponível (mm _{AGUA} .mm _{SOLO})	0,1980 (A)	0,2311 (A)
	0,1567 (B)	0,1393 (B)
Condutividade hidráulica saturada (mm.hr ⁻¹)	1,3	1,3
Argila (%)	65 (A)	65 (A)
	66 (B)	76 (B)
Silte (%)	25 (A)	32 (A)
	22 (B)	31 (B)
Areia (%)	10 (A)	3 (A)
	12 (B)	3 (B)
Rocha (%)	0	0
Albedo	0,15 (A)	0,15 (A)
	0,10 (B)	0,10 (B)
Fator K – USLE	0,1278	0,1225
Amostra	E239 (Mafra)	E199 (Rio Negrinho)

(A) 1ª. camada de solo; (B) 2ª. camada de solo.

Tabela 6-7– Valores dos parâmetros de entrada para a base de dados de solos no modelo SWAT (cont.).

Parâmetros	Latossolo	Neossolo
Profundidade da camada (cm)	50 (A)	50
	180 (B)	
Densidade (mg.l^{-1})	1,3	1,3
Capacidade de água disponível ($\text{mm}_{\text{AGUA}} \cdot \text{mm}_{\text{SOLO}}$)	0,2004 (A)	0,1792
	0,1450 (B)	
Condutividade hidráulica saturada (mm.hr^{-1})	1,3	3,2
Argila (%)	71 (A)	30
	80 (B)	
Silte (%)	26 (A)	42
	17 (B)	
Areia (%)	3 (A)	28
	3 (B)	
Rocha (%)	0	0
Albedo	0,15 (A)	0,15
	0,10 (B)	
Fator K – USLE	0,1130	0,3789
Amostra	E121 (Canoinhas)	E120 (Taió)

(A) 1ª. camada de solo; (B) 2ª. camada de solo.

6.5 Reservatórios

As Figura 6-4 e Figura 6-5 apresentam as coordenadas dos dados medidos de profundidade para os reservatórios 1 e 2, respectivamente.

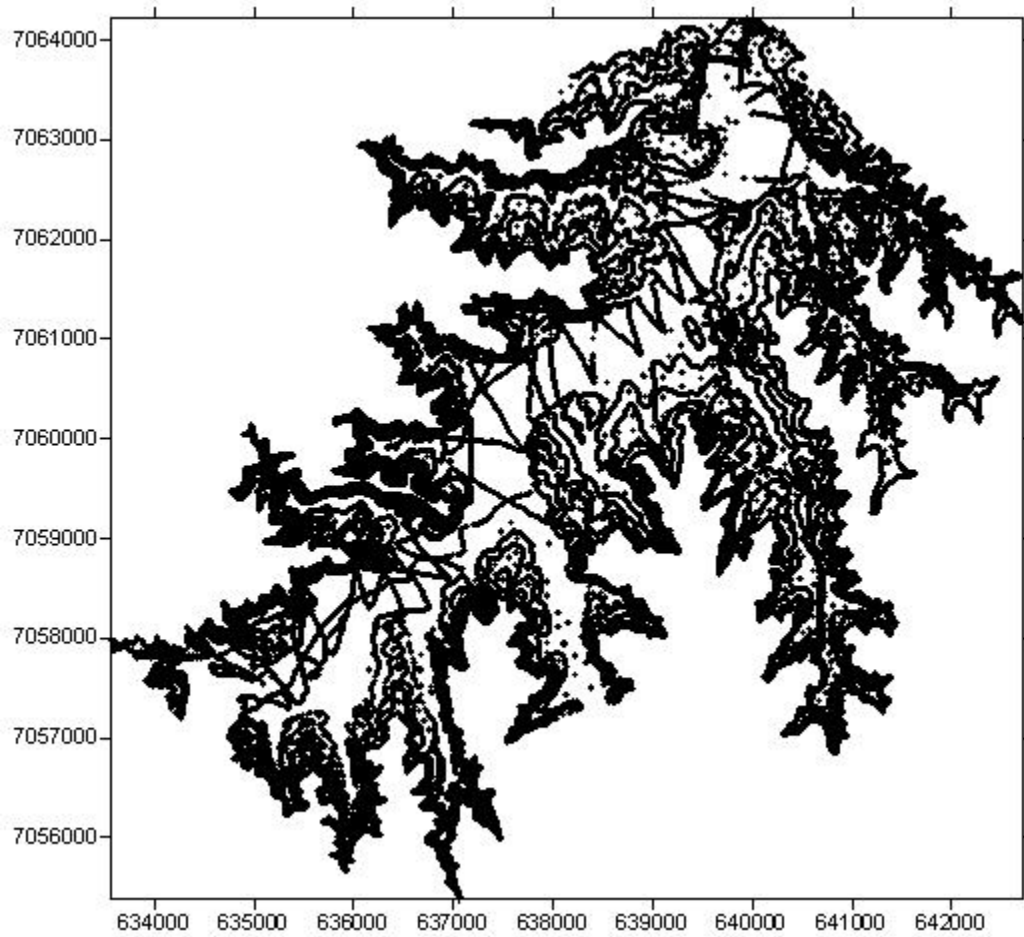


Figura 6-4 – Pontos medidos de profundidade, latitude e longitude para o reservatório 1.

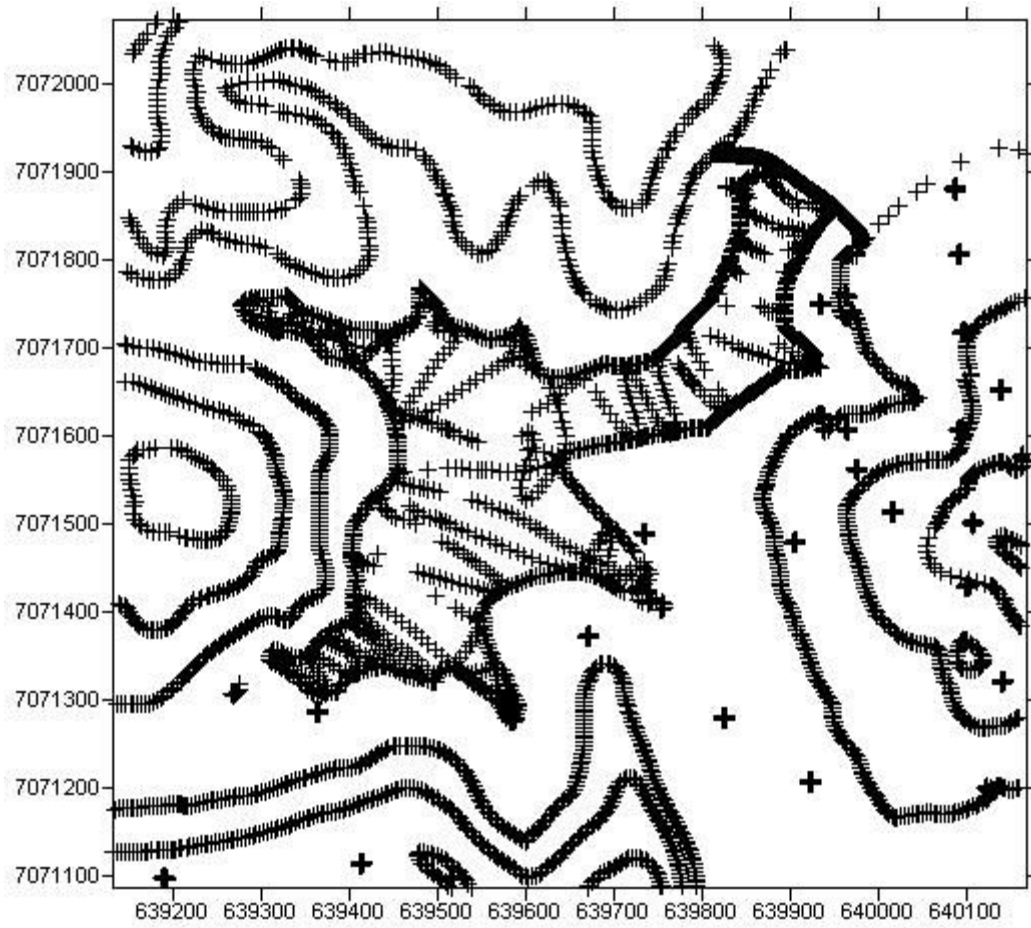


Figura 6-5 – Pontos medidos de profundidade, latitude e longitude para o reservatório 2.

A Figura 6-6 apresenta a interpolação realizada com os dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 1 pelo ArcGIS.

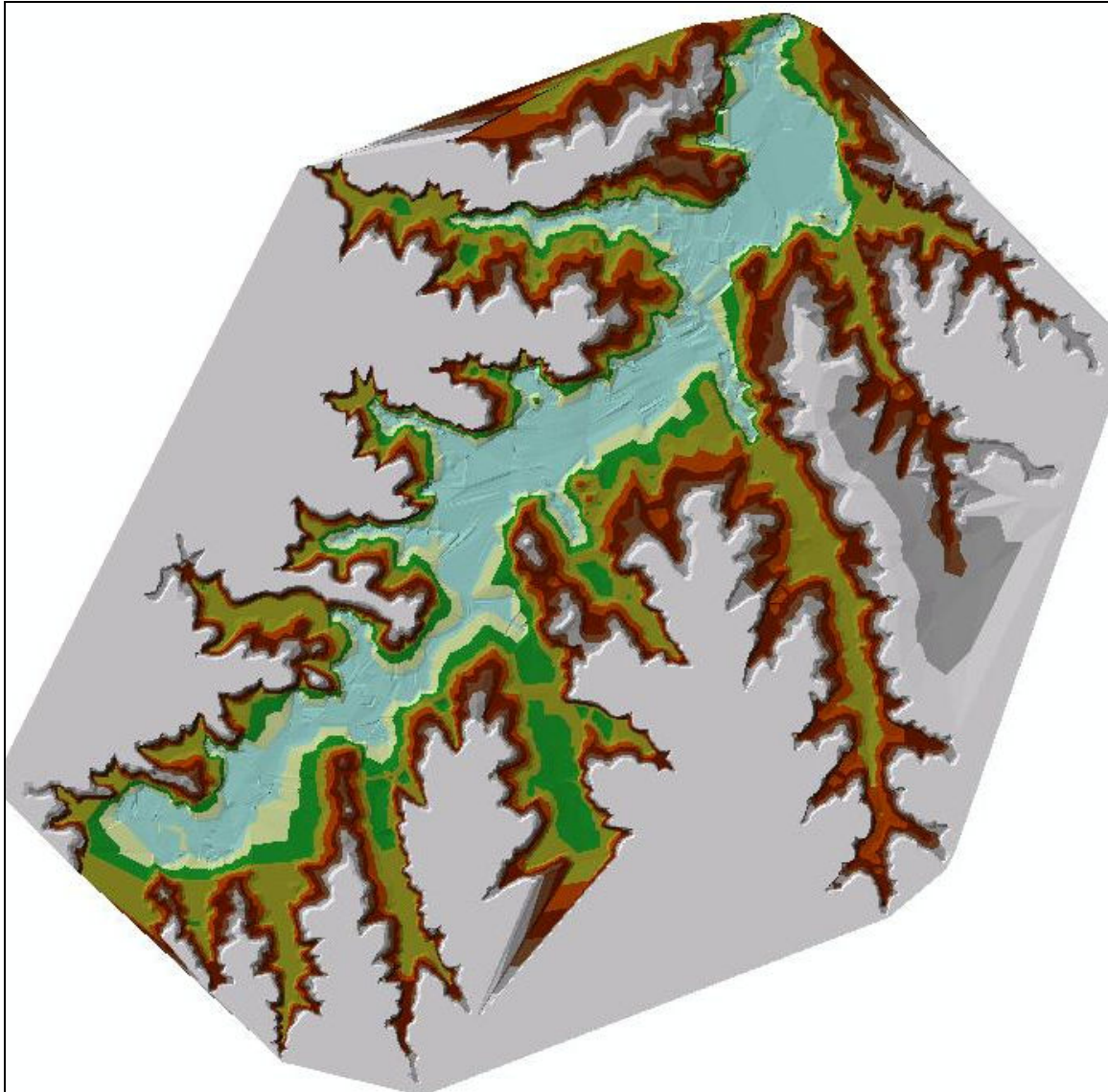


Figura 6-6 – Interpolação dos dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 1.

A Figura 6-7 apresenta a interpolação realizada com os dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 2 pelo ArcGIS.

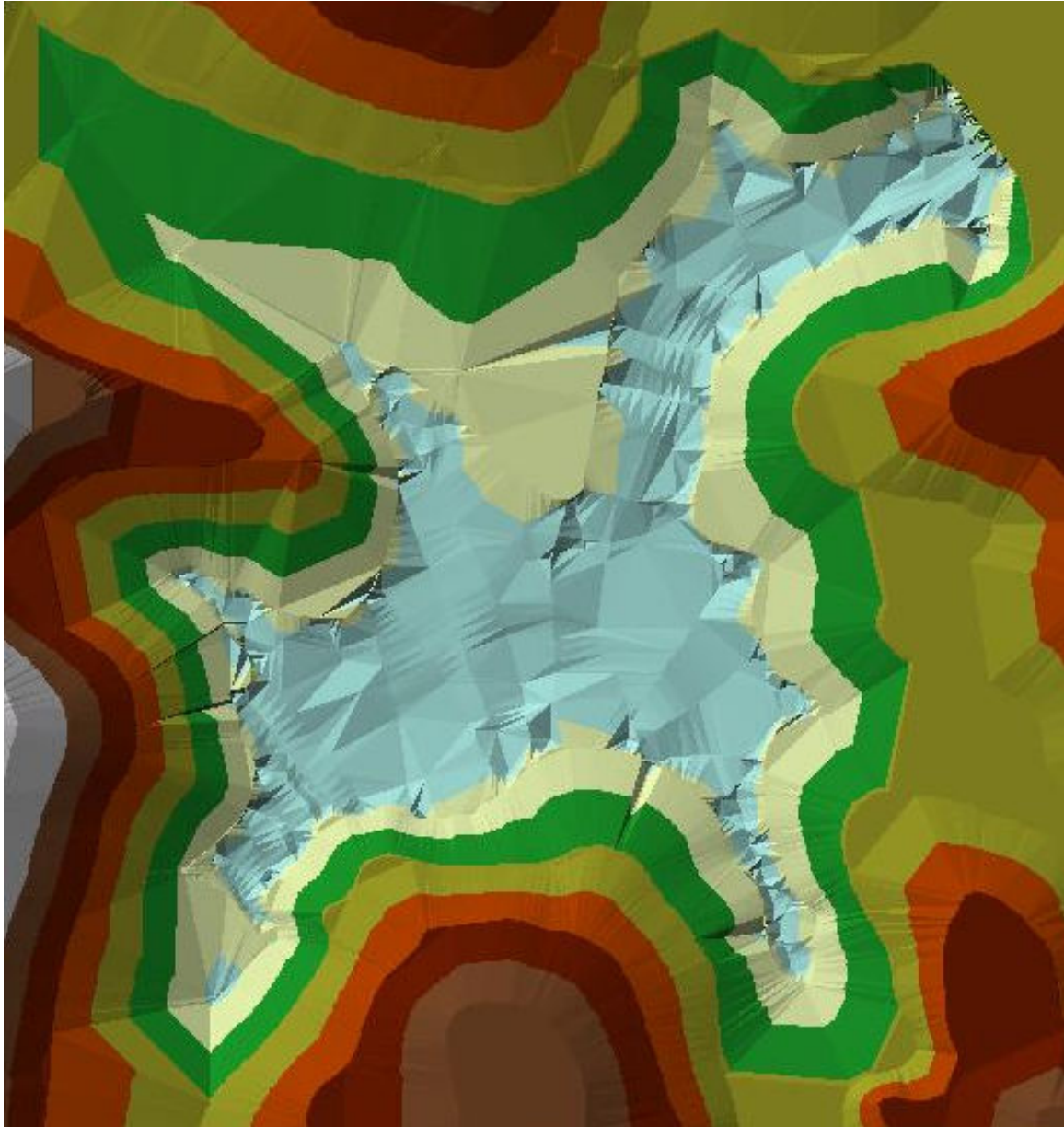


Figura 6-7 – Interpolação dos dados batimétricos e altimétricos para o reservatório 2.

Na realização da batimetria ocorreram casos onde a profundidade era maior que o valor máximo de medição do ADCP (6 metros) e assim o equipamento não conseguia anotar a medição. Outro problema ocorrido foi na velocidade do barco, pois ocorriam casos onde a velocidade do barco ficava acima do limite de medição do ADCP e as ondas não conseguiam ser

captadas pelo equipamento. As Figura 6-8 e Figura 6-9 mostram regiões (marcadas em vermelho nas figuras) onde ocorreram os problemas na medição de profundidade com o ADCP. Todos estes problemas interferem na estimativa de volume de água dos reservatórios, visto que a medição da profundidade não é a real ou a que realmente encontramos no reservatório medido.

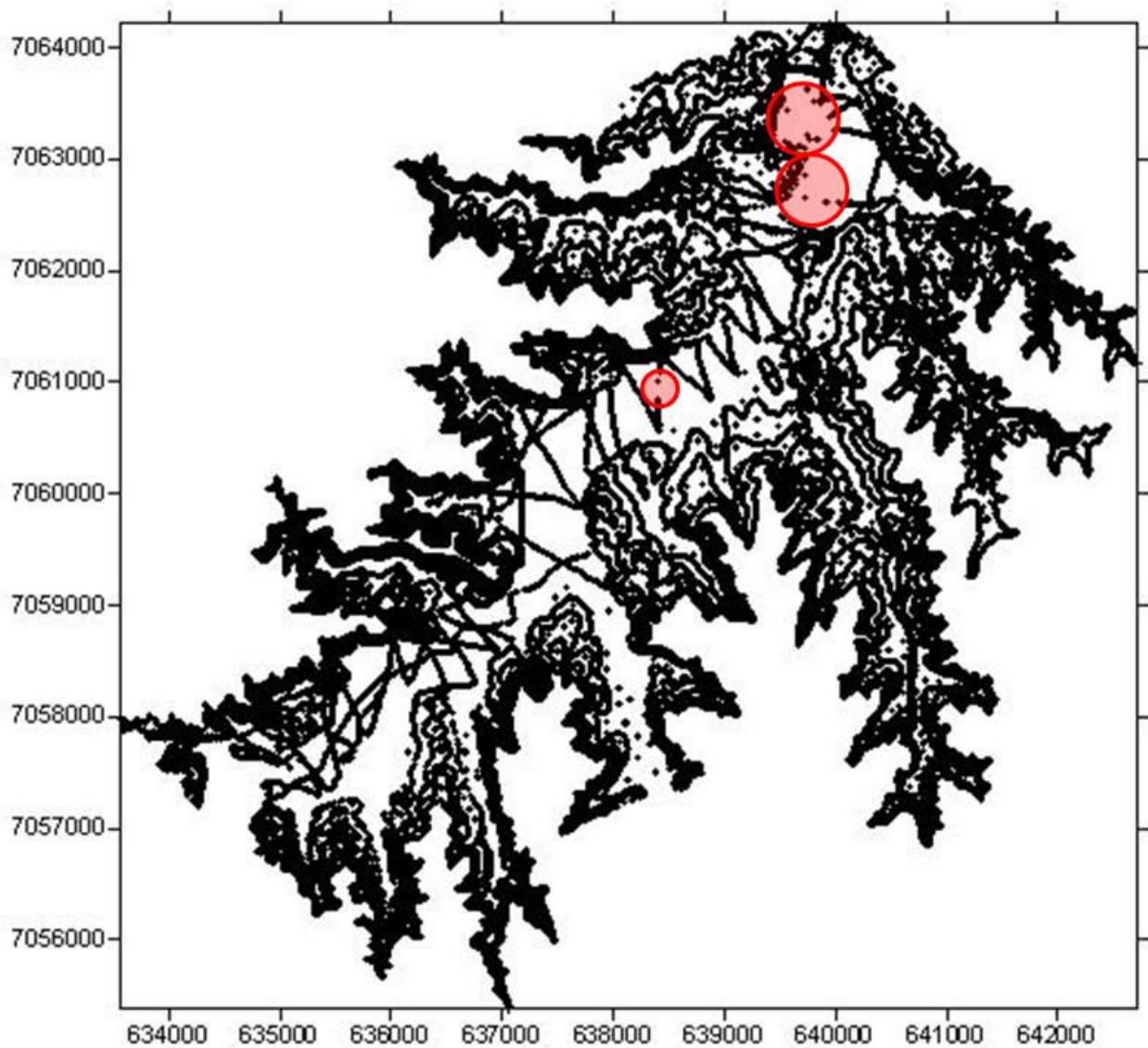


Figura 6-8 – Regiões com problemas de medição da profundidade no reservatório 1.

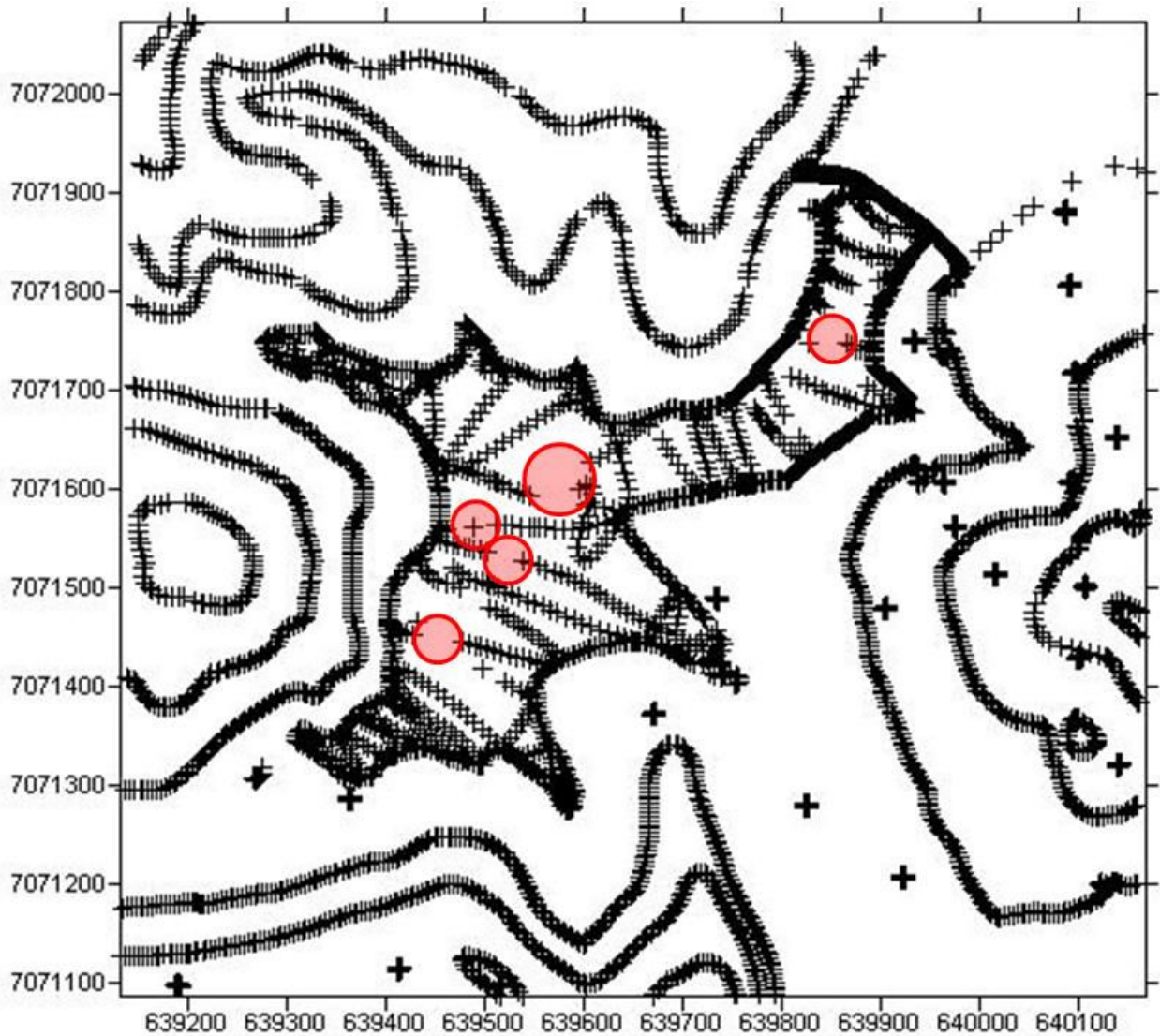


Figura 6-9 – Regiões com problemas de medição da profundidade no reservatório 2.

As vazões médias anuais foram calculadas fazendo-se uma aproximação com as área de influência da bacia hidrográfica de cada reservatório, visto que não haviam estações de medição nas saídas dos dois reservatórios. Assim, foi calculada a média do período de dez/93 à dez/97 (Figura 6-10) para a exutória da bacia do Rio Preto.

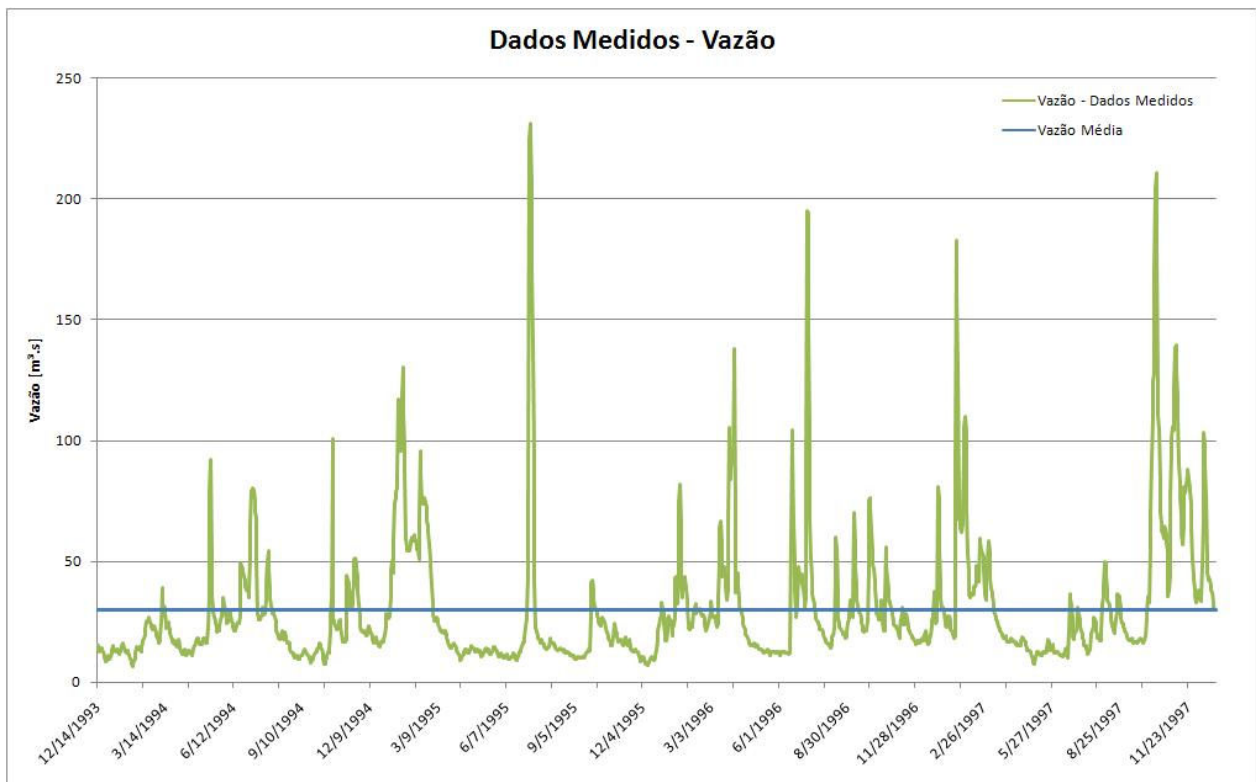


Figura 6-10 – Vazão monitorada no período de dez/93 à dez/97 e vazão média da bacia do Rio Preto.

Adotando a proporção das áreas das bacias hidrográficas chegou-se nos seguintes valores conforme a Tabela 6-8.

Tabela 6-8– Valores de área de abrangência e vazão dos reservatórios 1 e 2.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	Vazão (m ³ .s)
Bacia do Rio Preto	1000,41	29,88
Reservatório 1	199,71	5,97
Reservatório 2	300,76	8,98

Os valores calculados de volume e a vazão média anual de cada reservatório estão apresentados na Tabela 6-9.

Tabela 6-9– Valores de volume e vazão calculados para os reservatórios 1 e 2.

Parâmetro	Reservatório 1	Reservatório 2
RES_EVOL [10 ⁴ m ³]	4546,41	44,0624
RES_RR [m ³ .s]	5,89	8,86
RES_ESA [ha]	694,1427	13,9263

Todos os parâmetros requeridos para os dois reservatórios foram adotados e/ou calculados (Tabela 6-10).

Tabela 6-10– Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial (sem calibração), manual e automática.

Parâmetro	Descrição	Reservatório 1	Reservatório 2
MORES	Mês de início de operação do reservatório	Dezembro	Dezembro
IYRES	Ano de início de operação do reservatório	1993	1993
RES_ESA [ha]	Área superficial do reservatório como nível de água emergencial	694,1427	13,9263
RES_EVOL [10^4m^3]	Volume do reservatório como nível de água emergencial	3000	44
RES_PSA [ha]	Área superficial do reservatório como nível de água normal	650	13
RES_PVOL [10^4m^3]	Volume do reservatório como nível de água normal	100	10
RES_VOL [10^4m^3]	Volume do reservatório como nível de água normal	100	10
RES_RR [$\text{m}^3.\text{s}$]	Vazão média anual de saída do reservatório	5,97	8,98

Para o reservatório 1 foi medido um volume de $4546,41 \times 10^4 \text{ m}^3$, porém adotou-se um valor de $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ de água, visto que, este é o volume máximo permitido pelo modelo. Isto evidencia uma limitação do modelo em relação a influência de reservatórios maiores que $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$.

Os outros parâmetros requeridos pelo modelo SWAT foram suprimidos, uma vez que não foram medidos e nem obtidos por métodos matemáticos.

6.6 Calibração e Análises Estatísticas para avaliação do desempenho do modelo

Antes da calibração foi necessário realizar a análise de sensibilidade, para verificar os parâmetros de simulação que mais influenciam na dinâmica hidrossedimentológica no modelo SWAT. Os parâmetros encontrados pela análise de sensibilidade foram hierarquizados por ordem de influência e estão apresentados a seguir:

- i) Alpha_BF – Fator de resposta à variações na recarga do aquífero (dias);
- ii) CN2 – Curva número;

- iii) ESCO – Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional);
- iv) Canmx – Armazenamento de água máximo na copa das árvores (mm);
- v) Sol_AWC – Quantidade de água disponível na camada do solo ($\text{mm}_{\text{AGUA}} \cdot \text{mm}^{-1}_{\text{SOLO}}$)
- vi) Revapmn – Profundidade do aquífero superficial para que ocorra percolação ao aquífero profundo;
- vii) GWqmn – Profundidade mínima do aquífero superficial para que ocorra escoamento subterrâneo;
- viii) Sol_z – Profundidade da camada de solo (mm);
- ix) Blai – Índice de área foliar potencial máxima (adimensional);
- x) Ch_K2 – Condutividade hidráulica efetiva no canal principal ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);
- xi) Surlag – Coeficiente de resposta do escoamento superficial (adimensional);
- xii) Ch_N – Coeficiente de Manning (n) para o canal principal;
- xiii) GW_Delay – Período de tempo que a água se move da camada de solo mais profunda até o aquífero superficial;
- xiv) GW_Revap – Coeficiente de escoamento (movimento) de água do aquífero superficial para a zona insaturada.

Após esta análise foi realizada a calibração manual onde foram feitos testes com todos os parâmetros da análise de sensibilidade. Assim, foi observado que os parâmetros que mudaram significativamente o escoamento total de água foram: a) Alpha_BF; b) CN2; c) ESCO; d) Surlag; e e) GW_Delay.

Concluída a calibração manual, foi realizada a calibração automática pelo módulo de calibração automático do SWAT para obtenção dos valores mais adequados para os parâmetros escolhidos.

A Tabela 6-11 apresenta os valores utilizados na simulação inicial (sem calibração) e na calibração manual bem como os resultados obtidos para a calibração automática realizada pelo modelo SWAT.

Tabela 6-11– Valores dos parâmetros utilizados nas simulações inicial (sem calibração), manual e automática.

Parâmetros	Sem Calibração	Calibração	
		Manual	Automática
Alpha_BF	0,048	0,9	1,0
Mata Nativa	77	60	62
Pastagem	79	62	64
CN2			
Reflorestamento	81	67	69
Agricultura	85	72	74
Água	92	92	94
ESCO	0,95	0,70	0,00
Surlag	4	1	0
GW_Delay	31	20	10

Concluído o processo de calibração e obtido os resultados destas simulações, foi possível realizar a análise estatística para avaliação do desempenho do modelo. A Tabela 6-12 apresenta os valores do coeficiente de NASH e Desvio (Dv) para a simulação inicial (sem calibração), com calibração manual e com calibração automática.

Tabela 6-12– Valores de NASH e Dv para as simulações inicial (sem calibração), manual e automática.

Parâmetros	Sem Calibração	Calibração	
		Manual	Automática
NASH	-1,589	-0,375	0,505
Dv	-37,95	-33,70	-4,96

Pela Tabela 6-12, pode-se verificar que ocorreu uma melhora significativa para os dois parâmetros estatísticos analisados (NASH e Dv). Os valores de NASH passaram de -1,589 para -0,375 da simulação inicial para a calibração manual e de -0,375 para 0,505 da simulação com calibração manual para a calibração automática. Já os valores de Dv passaram de -37,95 para -33,70 da simulação inicial para a calibração manual e de -33,70 para -4,96 da simulação com

calibração manual para a calibração automática. Isto evidencia um melhor no ajuste do modelo se comparado com a simulação inicial (apenas com os dados de entrada).

A melhoria no ajuste de modelos foi evidenciada por Lopes (2008) e Machado (2002). Lopes (2008) encontrou valores de NASH e D_v , respectivamente, de -0,59 e -0,22 para calibração manual e, 0,42 e -0,18 para a calibração automática para uma bacia experimental (Nativa 1 com área de 14 ha). Já Machado (2002) encontrou valores de 0,90 e -12,7 para a simulação sem calibração e, 0,92 e -0,70 para a calibração.

A Figura 6-11 apresenta o gráfico de escoamento total na exutória da bacia do Rio Preto no período de 14/12/1993 a 14/12/1997, comparando os dados observados (medidos) de vazão com o escoamento total simulado.

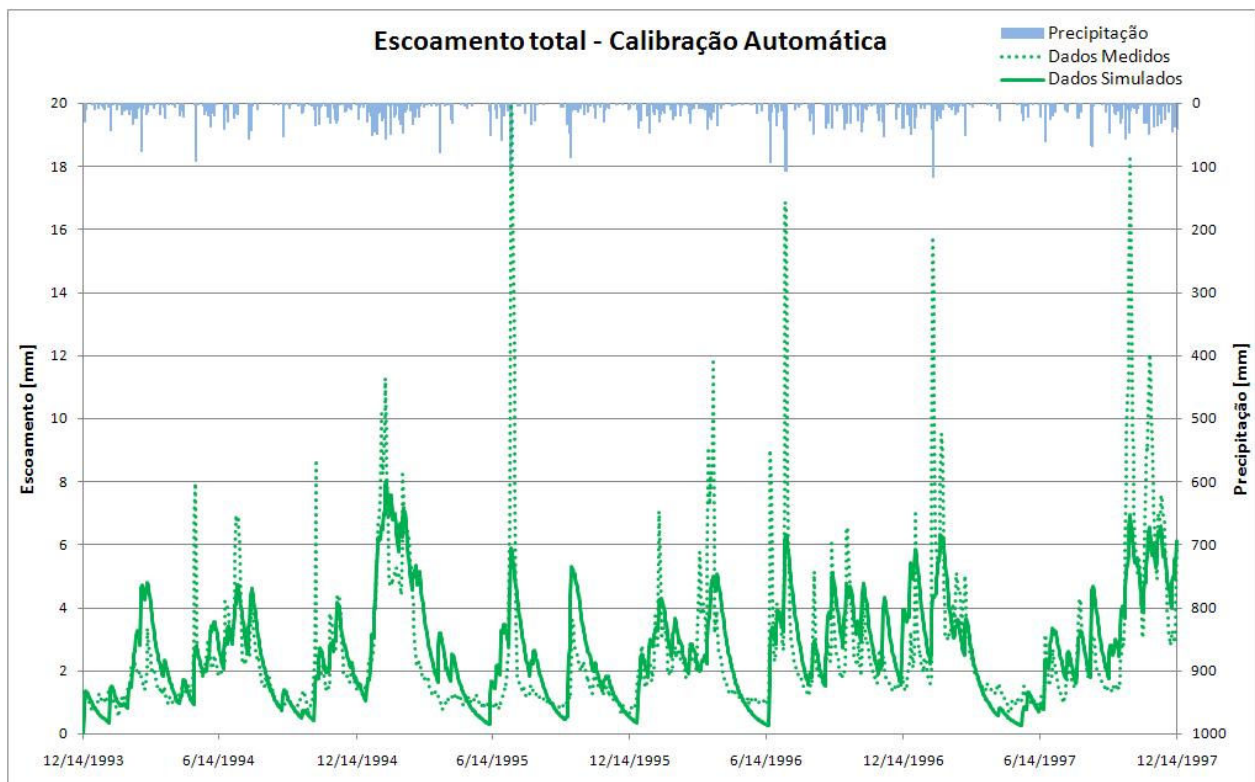


Figura 6-11 – Comparação entre os dados medidos e a simulação automática.

Pela Figura 6-11 foi evidenciado que a calibração automática realizada pelo modelo SWAT subestimou as maiores vazões de pico dos dados medidos (monitorados).

Sabendo-se que as variáveis de clima foram simuladas a partir de apenas uma estação de monitoramento meteorológico, a adoção da não variabilidade espacial destes parâmetros

conseguiu simular os fenômenos reais de clima e conseqüentemente do escoamento total de água na bacia do Rio Preto.

Entendendo que o modelo não demonstrou um ótimo desempenho mas foram os melhores visto que muitos dados de entrada foram estimados para esta bacia, foram adotados os valores da calibração automática (conforme Tabela 6-11) para as simulações dos diferentes cenários apresentados no item 6.7.

6.7 Simulação dos Cenários

Todos os cenários foram simulados com dados de precipitação conforme a Tabela 6-13.

Tabela 6-13– Precipitação anual utilizada nas simulações dos cenários.

Ano	Precipitação Anual
	(mm)
1994	1602,1
1995	1917,9
1996	2244,4
1997	1963,0

Cenário 1

Por considerar que o solo exposto pode estar representando áreas em época de preparo de plantio agrícola e que também não existe uma classe equivalente na base de dados do modelo SWAT, esta classe foi reclassificada como agricultura conforme apresentado na Figura 6-12.

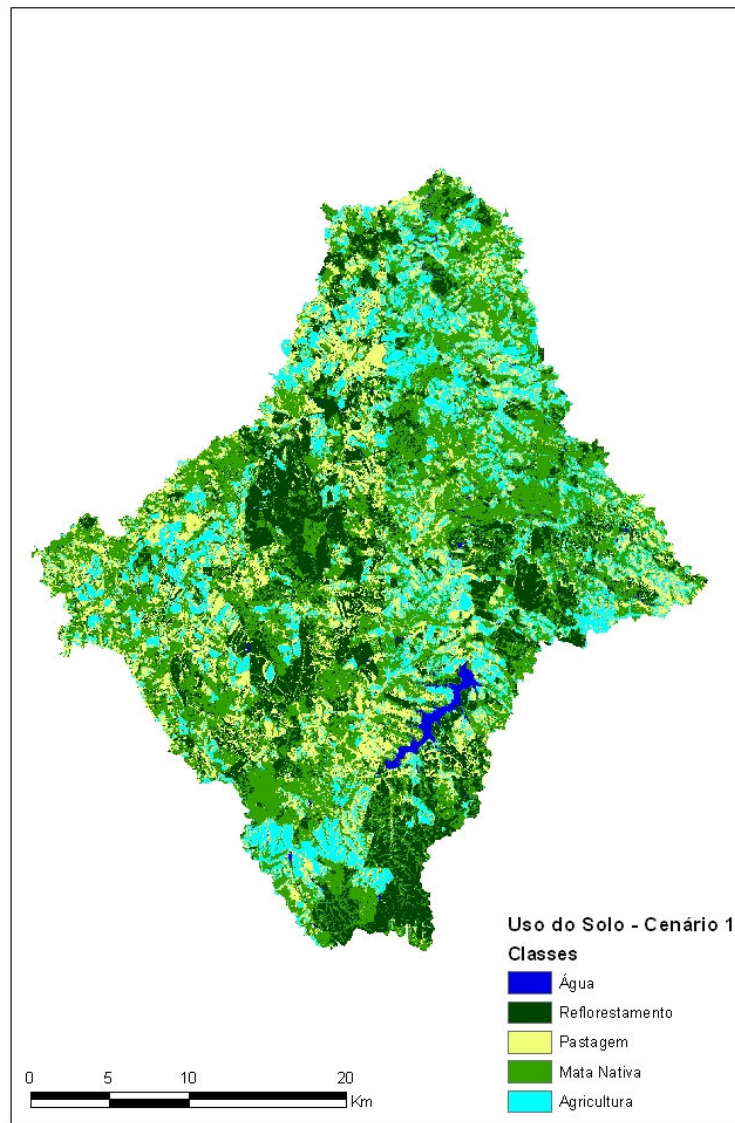


Figura 6-12 – Uso do solo para o cenário 1.

A Tabela 6-14 fornece a distribuição das áreas ocupadas pelos usos do solo reclassificado para o cenário 1 (Uso atual), resultado da supressão do uso solo exposto no modelo SWAT para a bacia do Rio Preto.

Tabela 6-14– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 1.

Uso do Solo	Área (Km²)	%
Mata Nativa	382,20	38,20
Pastagem	234,39	23,43
Reflorestamento	206,93	20,68
Agricultura	165,90	16,58
Água	10,97	1,10
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-12 e a Tabela 6-14 (cenário 1), observa-se que na bacia o uso adotado predominante é de vegetação nativa, perfazendo 38,20% da área total, seguido de pastagem (23,43%) e de reflorestamento (20,68%). A agricultura encontra-se em 16,56% da área total e o restante (1,10%) é apresentado pelos corpos de água.

O Balanço hídrico para o cenário 1 está apresentado no apêndice A.

Cenário 2

A Figura 6-13 apresenta a distribuição espacial do uso do solo para o cenário 2 na bacia do Rio Preto.

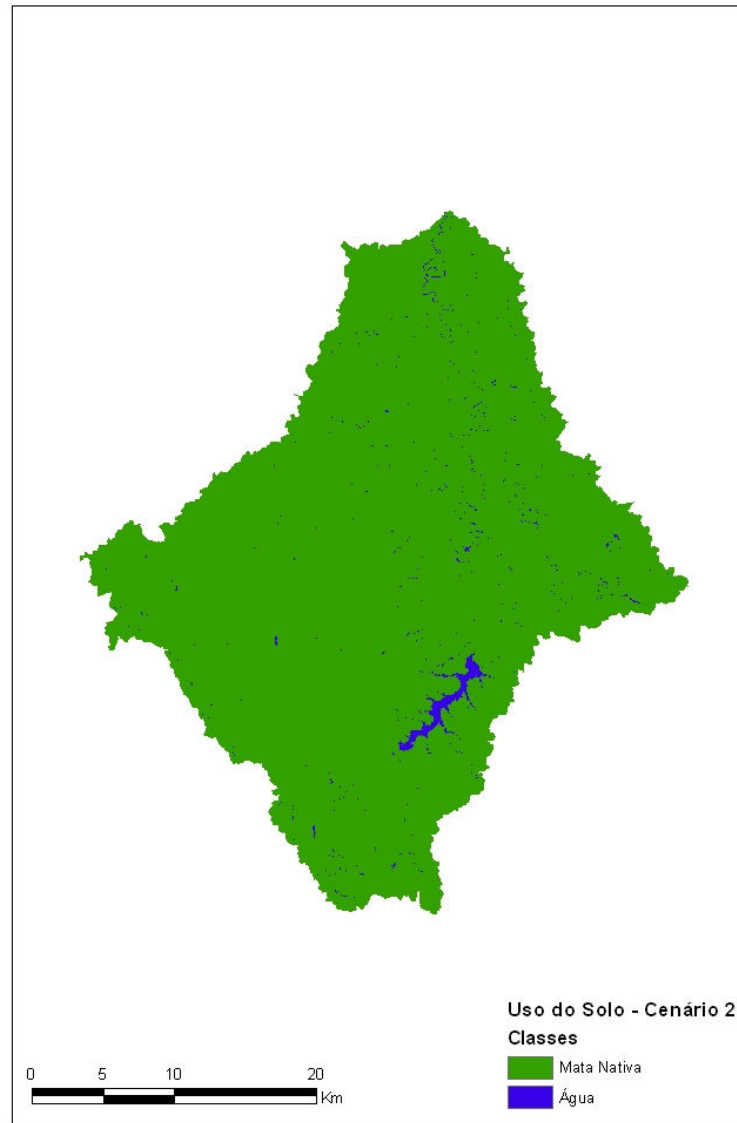


Figura 6-13 – Uso do solo para o cenário 2.

A Tabela 6-15 fornece a distribuição do uso do solo para o cenário 2 na bacia do Rio Preto.

Tabela 6-15– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 2.

Uso do Solo	Área (Km ²)	%
Mata Nativa	989,43	98,90
Água	10,97	1,10
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-13 e a Tabela 6-15 (cenário 2), observa-se que na bacia o uso adotado é de vegetação nativa, perfazendo 98,90% da área total. Os corpos de água ocupam 1,1% (10,97 ha) da área total.

O Balanço hídrico para o cenário 2 está apresentado no apêndice A.

Cenário 3

A Figura 6-14 apresenta a distribuição espacial do uso do solo para o cenário 3 na bacia do Rio Preto.

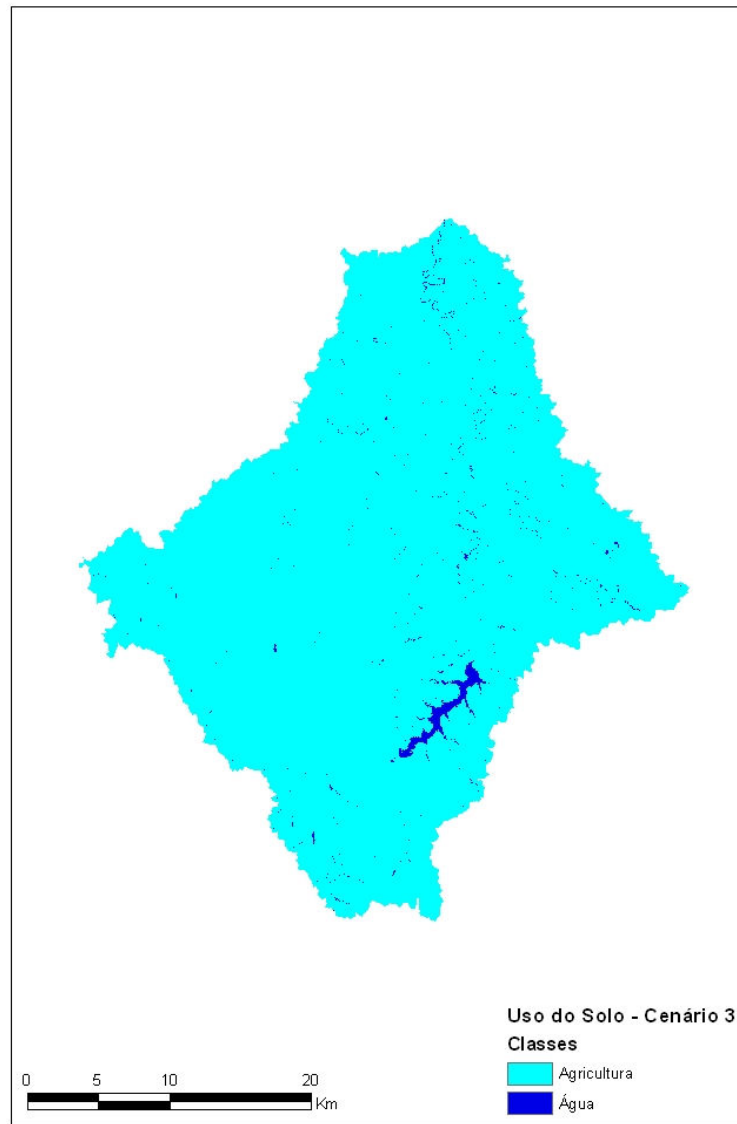


Figura 6-14 – Uso do solo para o cenário 3.

A Tabela 6-16 fornece a distribuição do uso do solo para o cenário 3 na bacia do Rio Preto.

Tabela 6-16– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 3.

Uso do Solo	Área (Km²)	%
Agricultura	989,43	98,90
Água	10,97	1,10
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-14 e a Tabela 6-16 (cenário 3), observa-se que na bacia o uso adotado é de agricultura, perfazendo 98,90% da área total. Os corpos de água ocupam 1,1% (10,97 ha) da área total.

O Balanço hídrico para o cenário 3 está apresentado no apêndice A.

Cenário 4

A Figura 6-15 apresenta a distribuição espacial do uso do solo para o cenário 4 na bacia do Rio Preto.

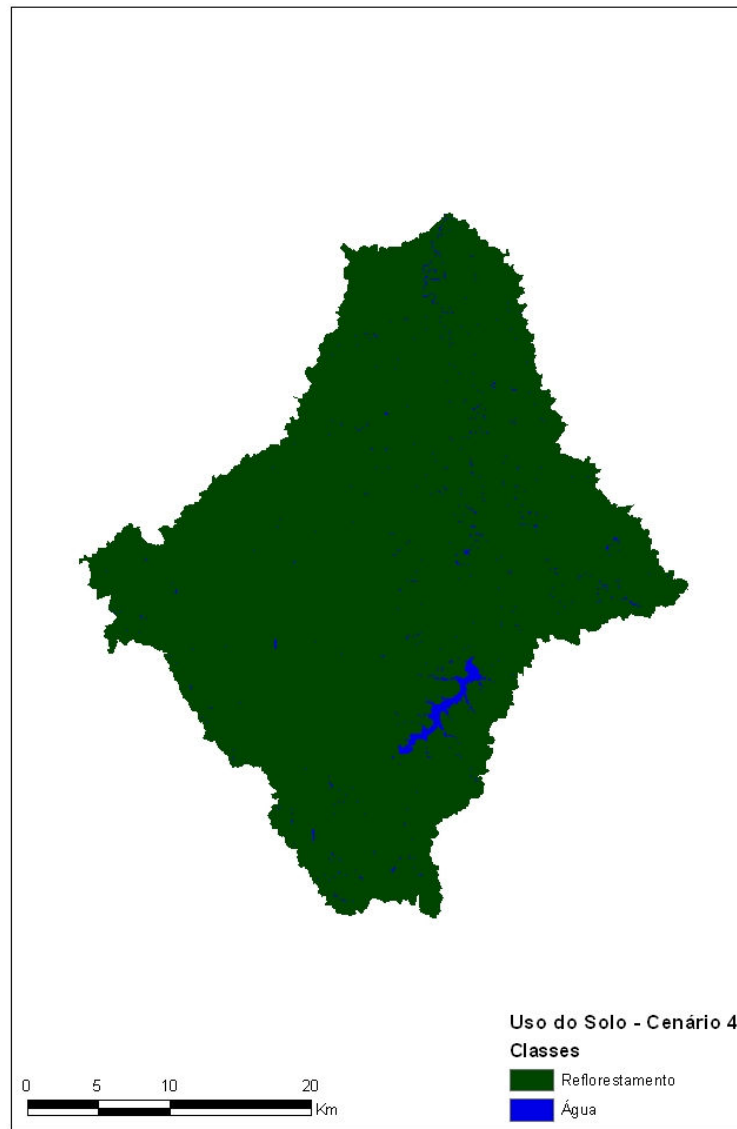


Figura 6-15 – Uso do solo para o cenário 4.

A Tabela 6-17 fornece a distribuição do uso do solo para o cenário 4 na bacia do Rio Preto.

Tabela 6-17– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 4.

Uso do Solo	Área (Km ²)	%
Reflorestamento	989,43	98,90
Água	10,97	1,10
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-15 e a Tabela 6-17 (cenário 4), observa-se que na bacia o uso adotado é de reflorestamento, perfazendo 98,90% da área total. Os corpos de água ocupam 1,1% (10,97 ha) da área total.

O Balanço hídrico para o cenário 4 está apresentado no apêndice A.

Cenário 5

A Figura 6-16 apresenta a distribuição espacial do uso do solo para o cenário 5 na bacia do Rio Preto.

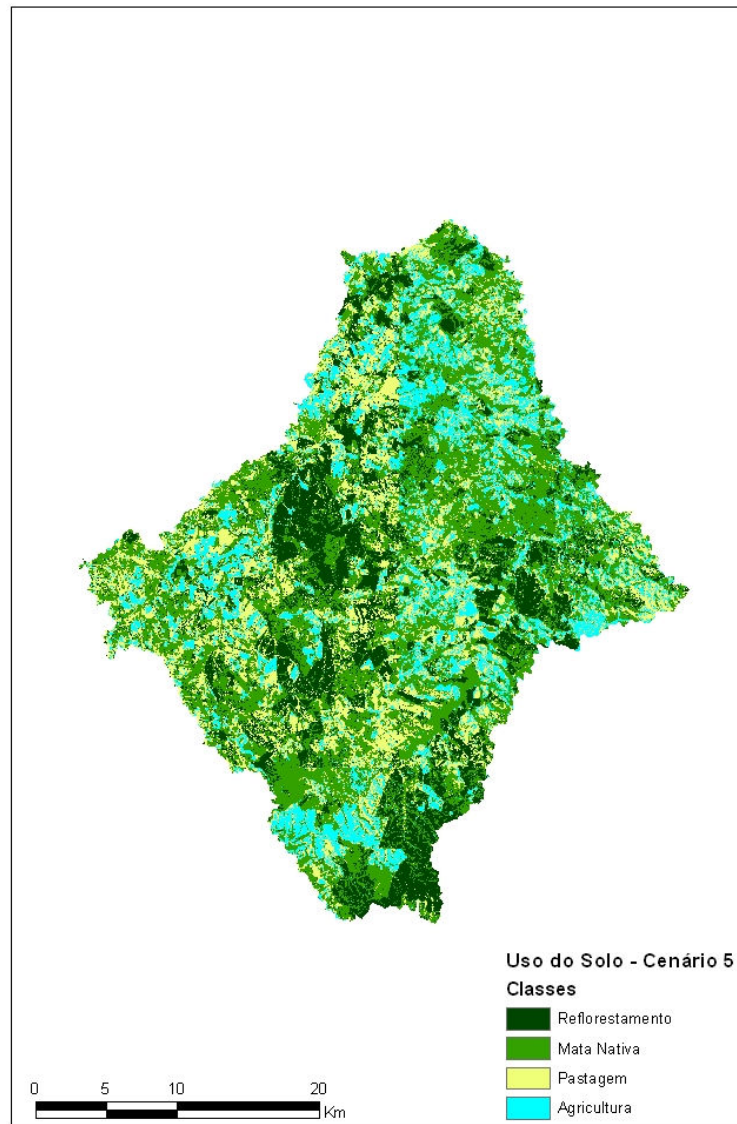


Figura 6-16 – Uso do solo para o cenário 5.

A Tabela 6-18 fornece a distribuição do uso do solo para o cenário 5 na bacia do Rio Preto.

Tabela 6-18– Áreas e porcentagens de cada classe de uso do solo para o cenário 5.

Uso do Solo	Área (Km²)	%
Mata Nativa	393,18	39,30
Pastagem	234,39	23,43
Reflorestamento	206,93	20,68
Agricultura	165,90	16,58
Total	1000,41	100

Analisando a Figura 6-16 e a Tabela 6-18 (cenário 5), observa-se que na bacia o uso adotado predominante é de vegetação nativa, perfazendo 39,30% da área total, seguido de pastagem (23,43%) e de reflorestamento (20,68%). A agricultura encontra-se em 16,56% da área total e o restante (1,10%) é apresentado pelos corpos de água.

O Balanço hídrico para o cenário 5 está apresentado no apêndice A.

6.8 Distribuição Espacial – Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos

Com o objetivo de avaliar a distribuição espacial do escoamento superficial produzido e da produção de sedimentos, os resultados do modelo SWAT foram espacializados para cada sub-bacia e estão separados por cenário simulado.

Para todos os cenários a distribuição espacial está apresentada apenas para o ano de 1996, ano de maior escoamento superficial produzido e de produção de sedimentos.

Cenário 1 (Uso atual)

A Figura 6-17 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 1 no ano de 1996.

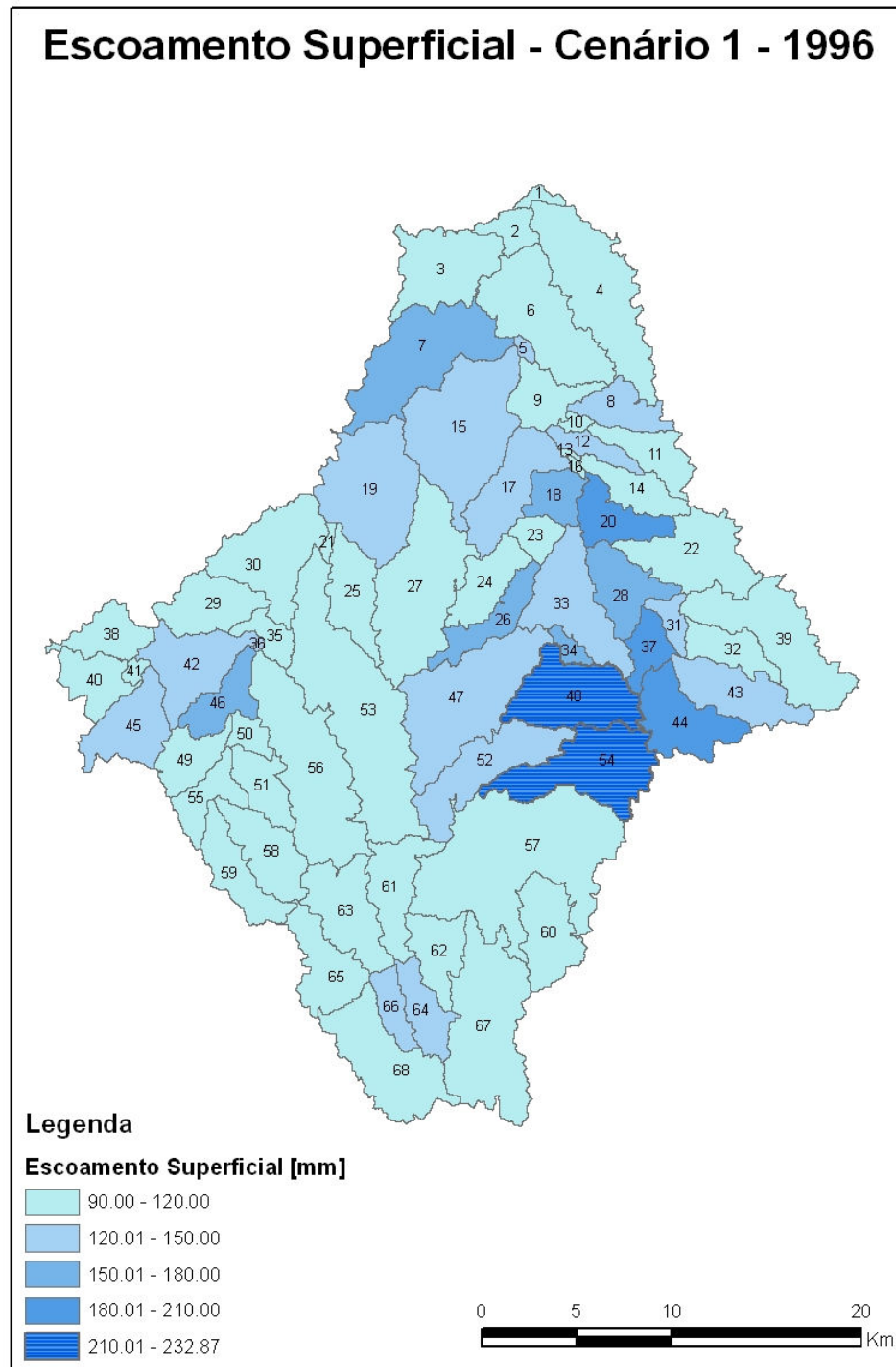


Figura 6-17 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 1.

A Figura 6-18 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 1 no ano de 1996.

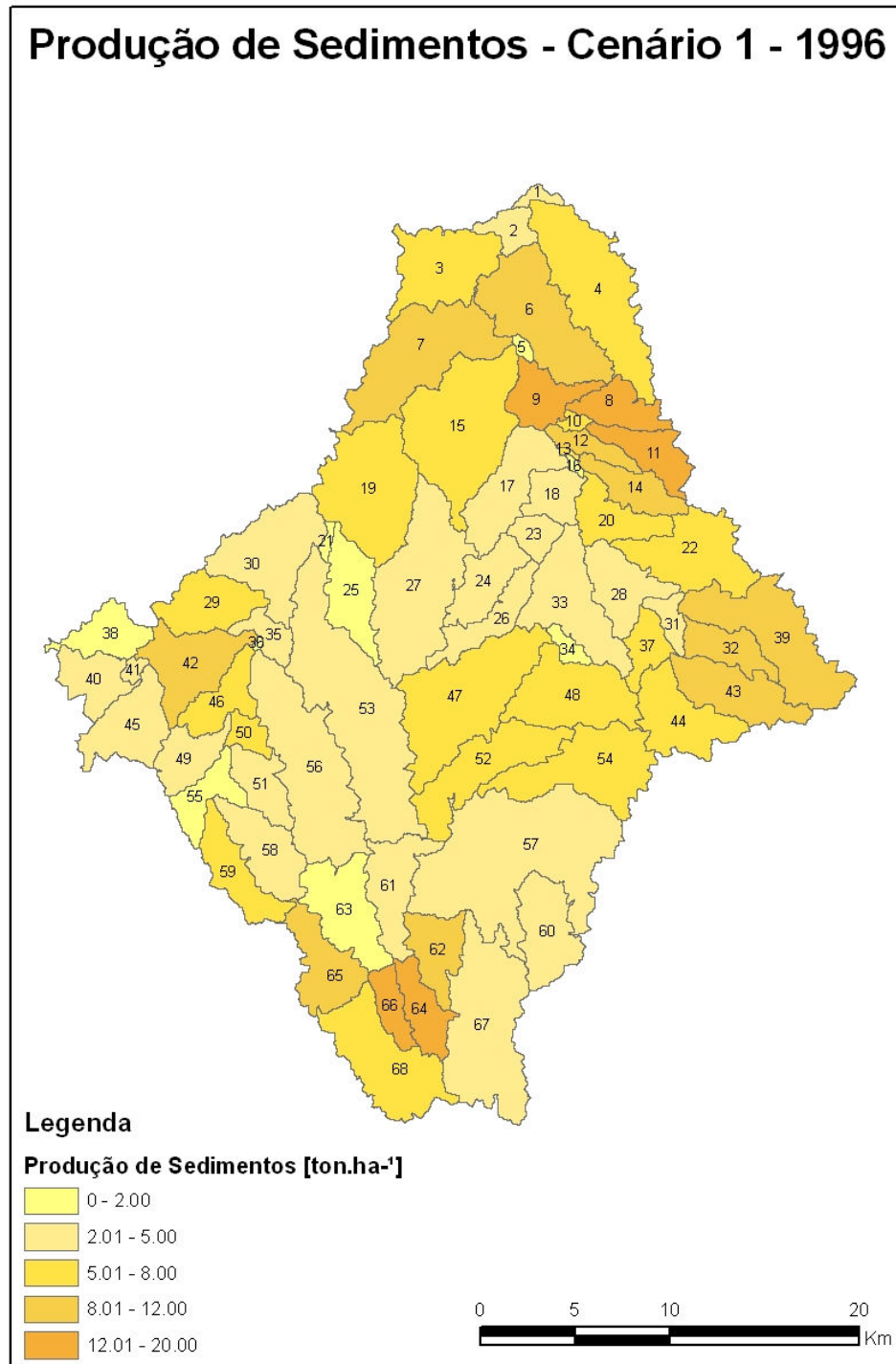


Figura 6-18 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 1.

Cenário 2 (Mata nativa)

A Figura 6-19 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 2 no ano de 1996.

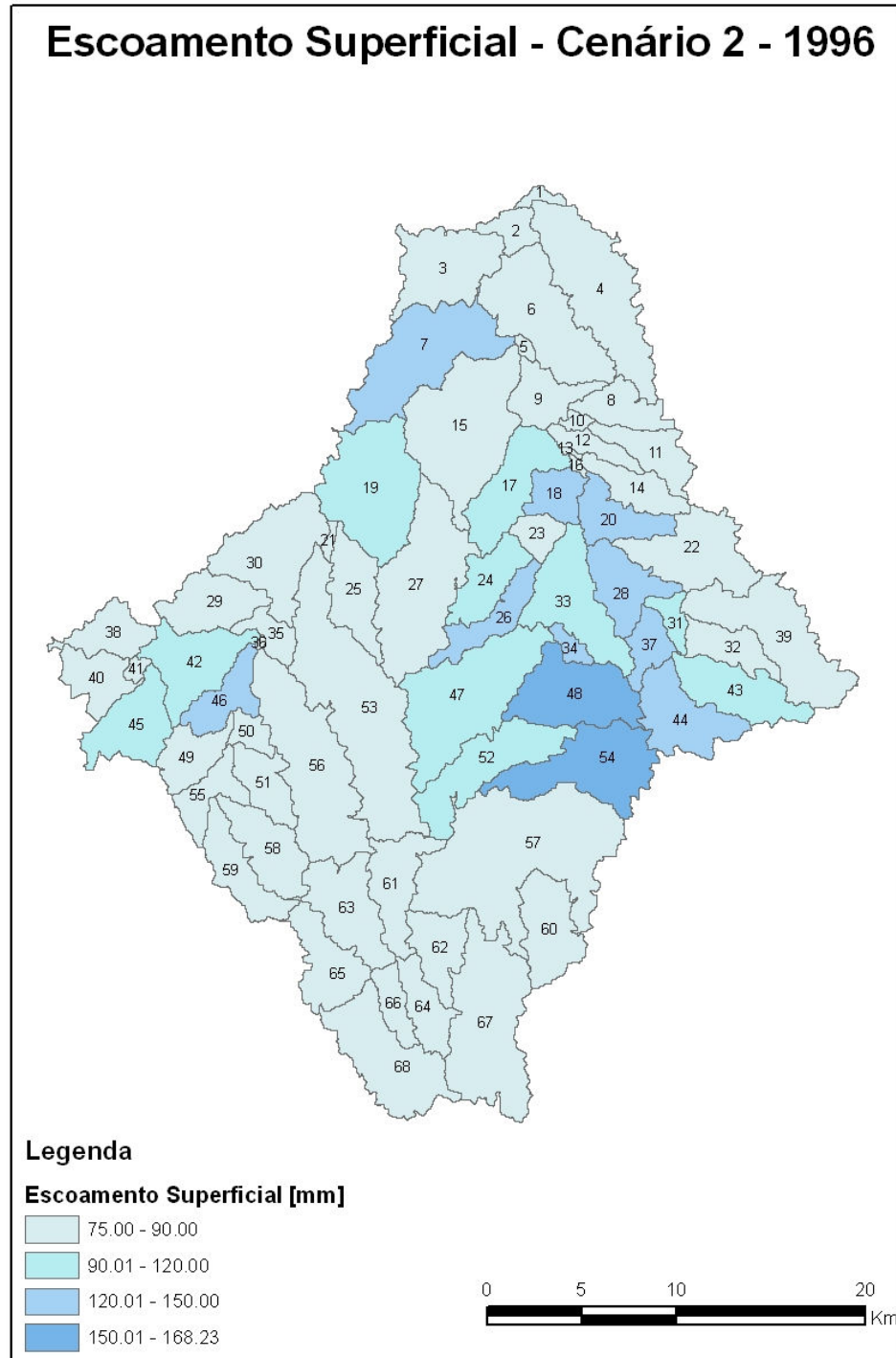


Figura 6-19 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 2.

A Figura 6-20 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 2 no ano de 1996.

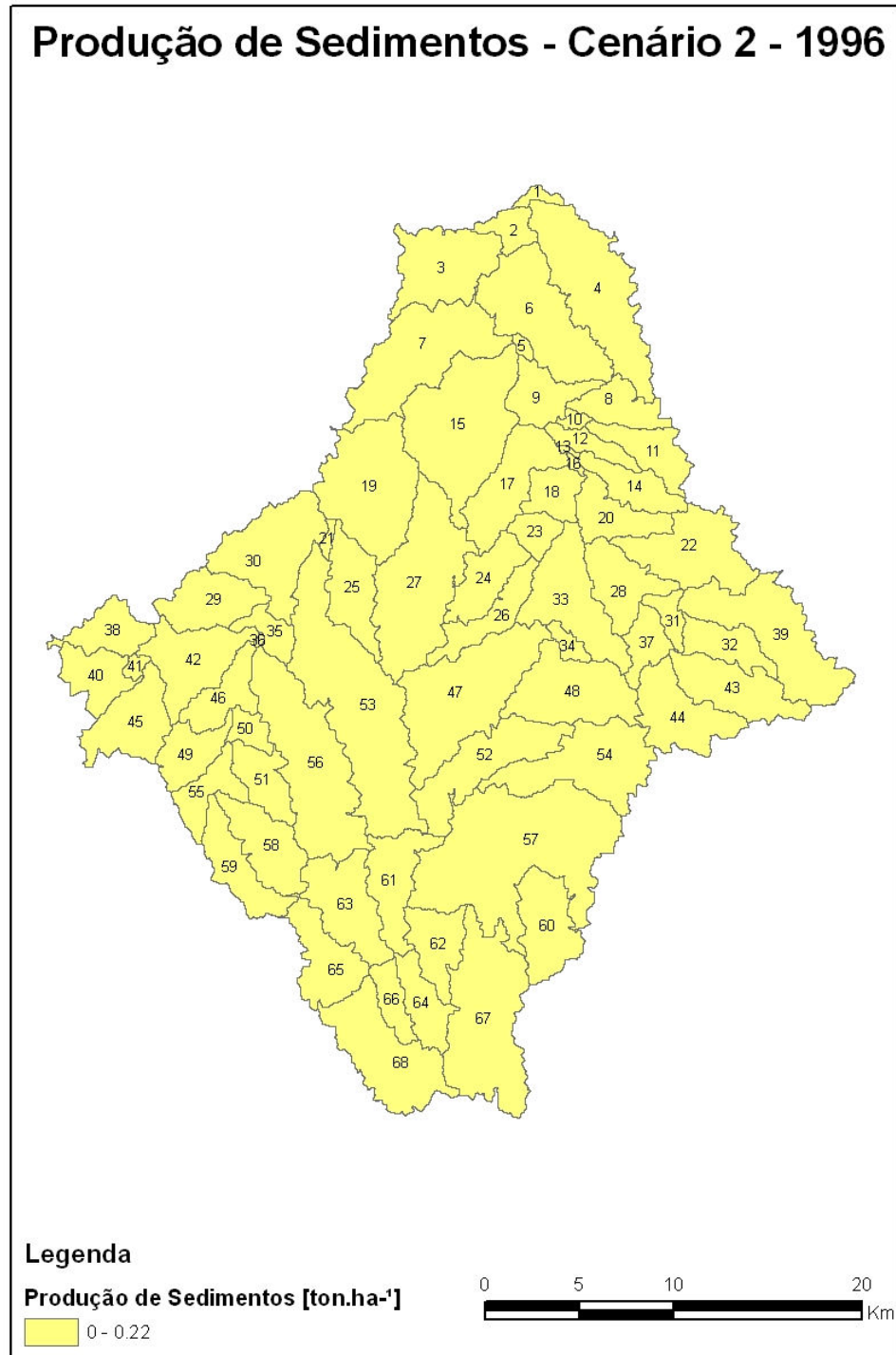


Figura 6-20 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 2.

Cenário 3 (Agricultura)

A Figura 6-21 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 3 no ano de 1996.

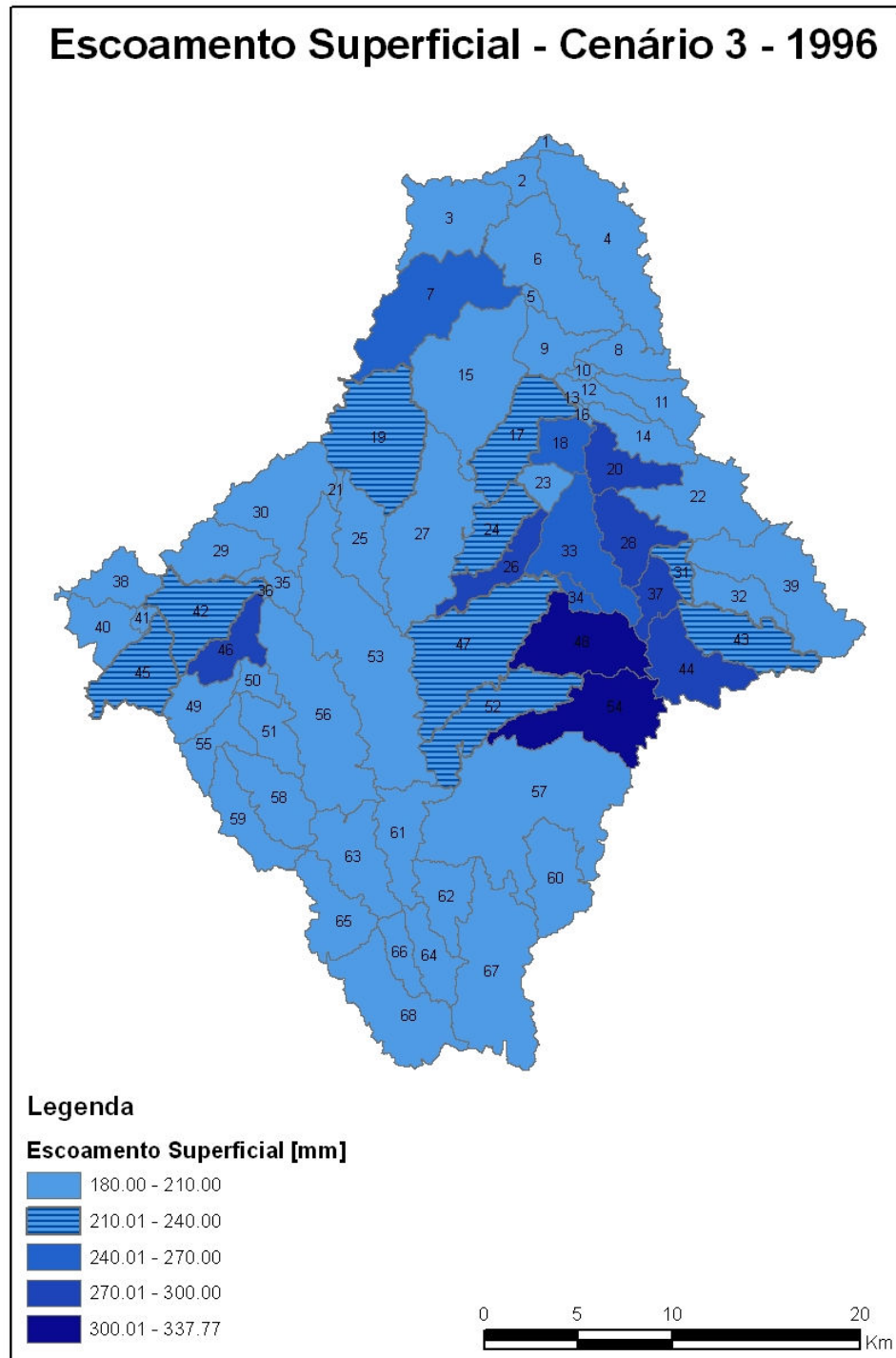


Figura 6-21 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 3.

A Figura 6-22 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 3 no ano de 1996.

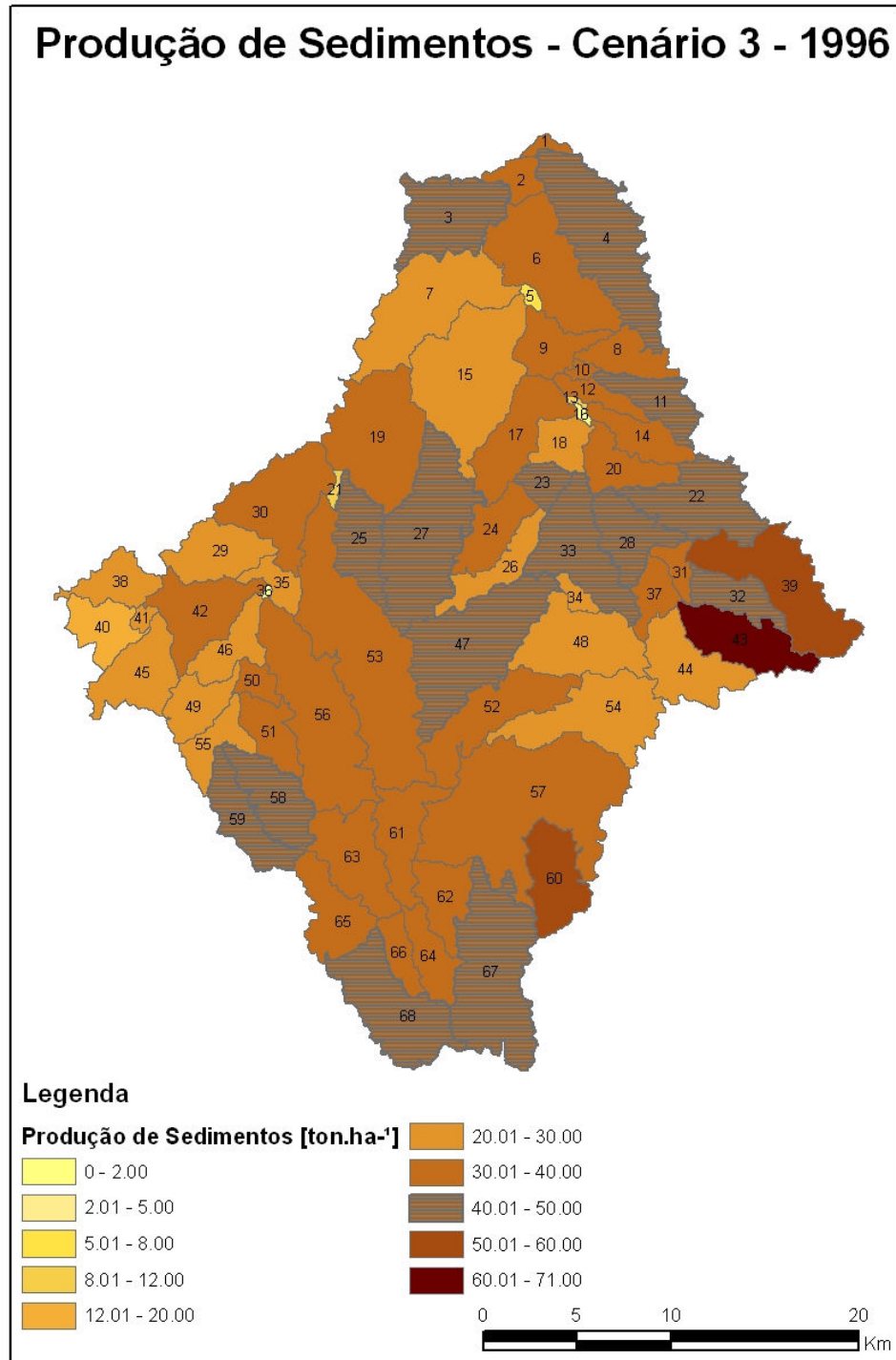


Figura 6-22 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 3.

Cenário 4 (Reflorestamento)

A Figura 6-23 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 4 no ano de 1996.

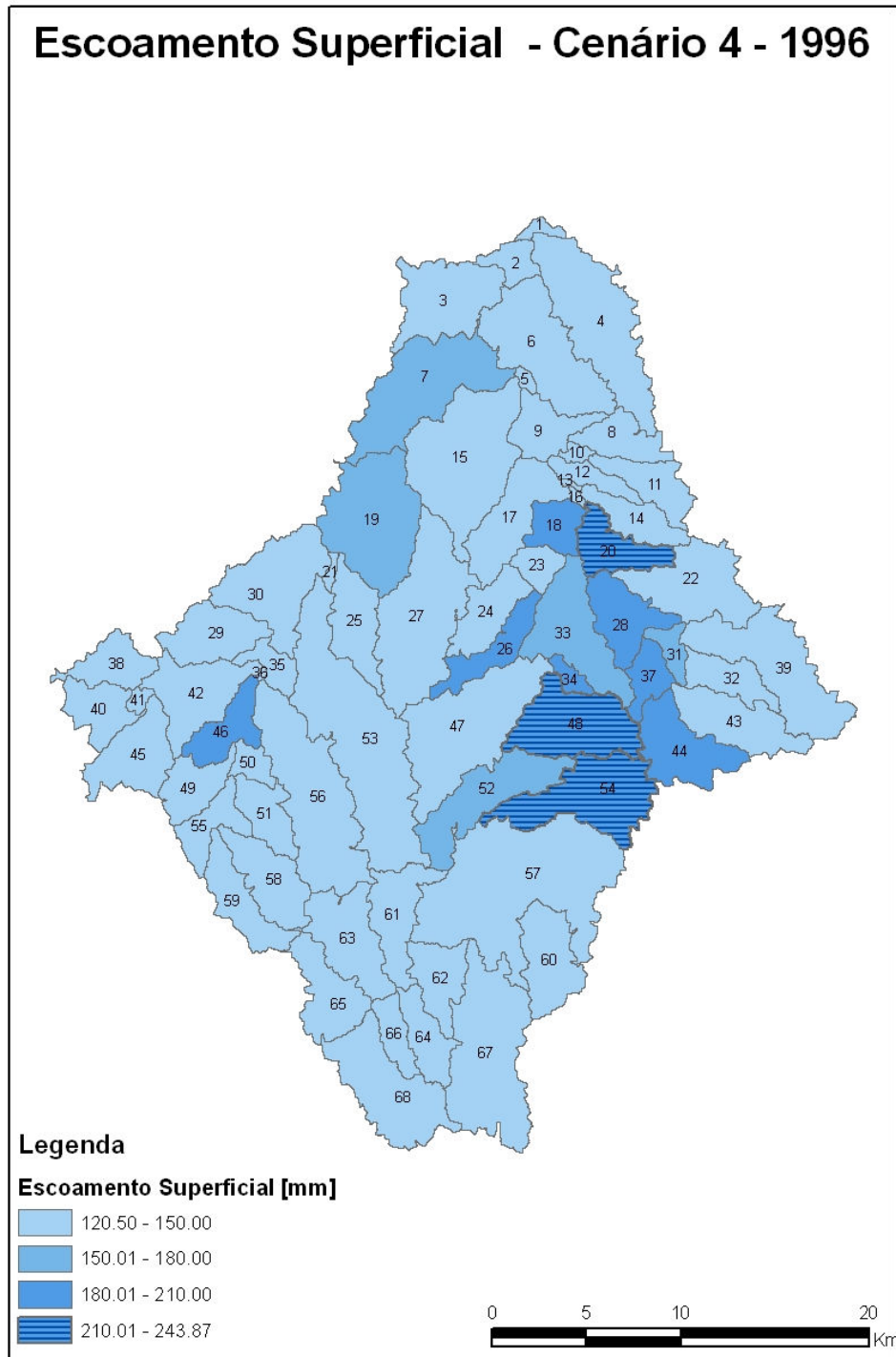


Figura 6-23 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 4.

A Figura 6-24 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 4 no ano de 1996.

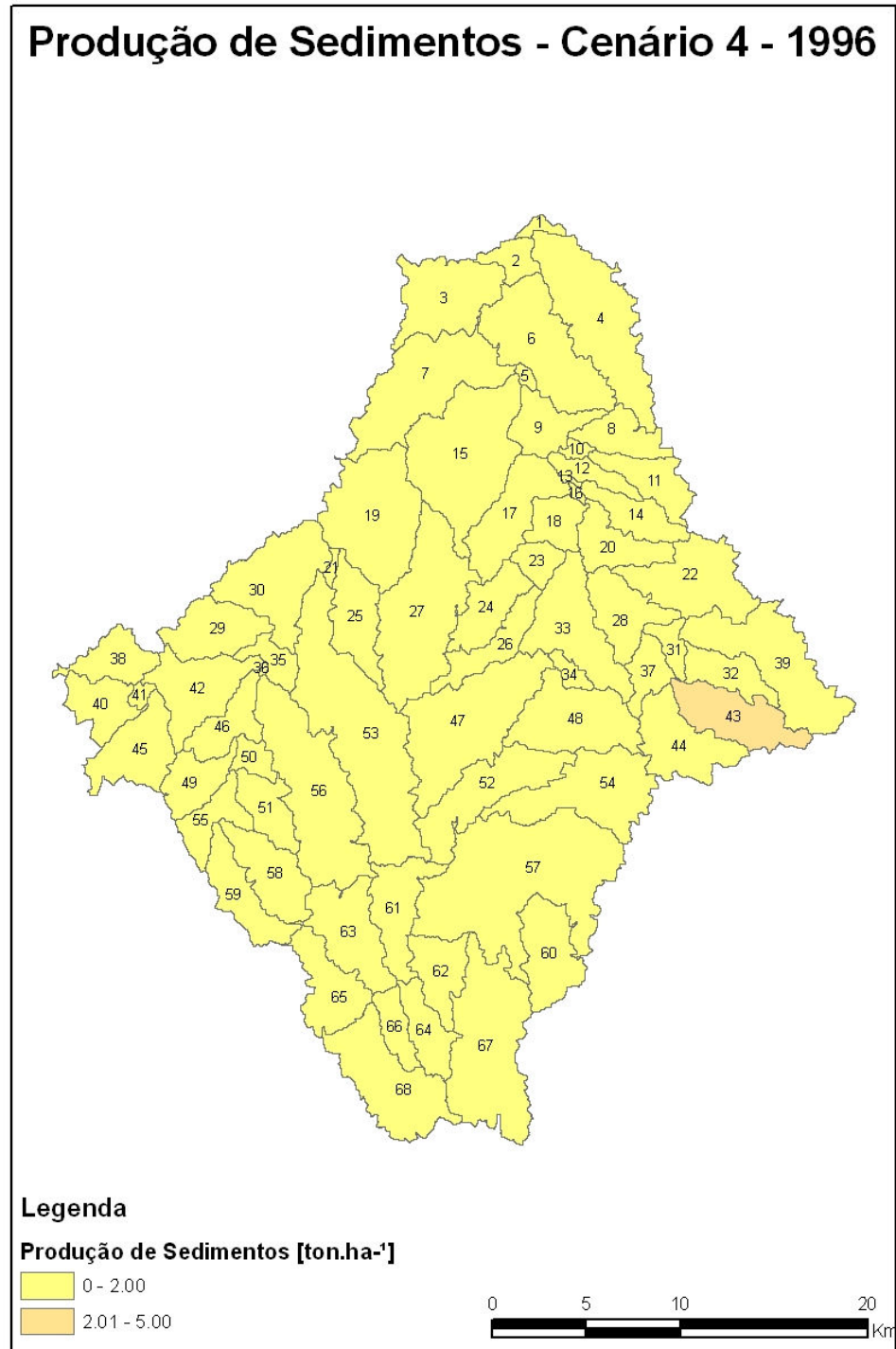


Figura 6-24 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 4.

Cenário 5 (Uso atual sem reservatórios)

A Figura 6-25 apresenta a distribuição espacial do escoamento superficial produzido nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 5 no ano de 1996.

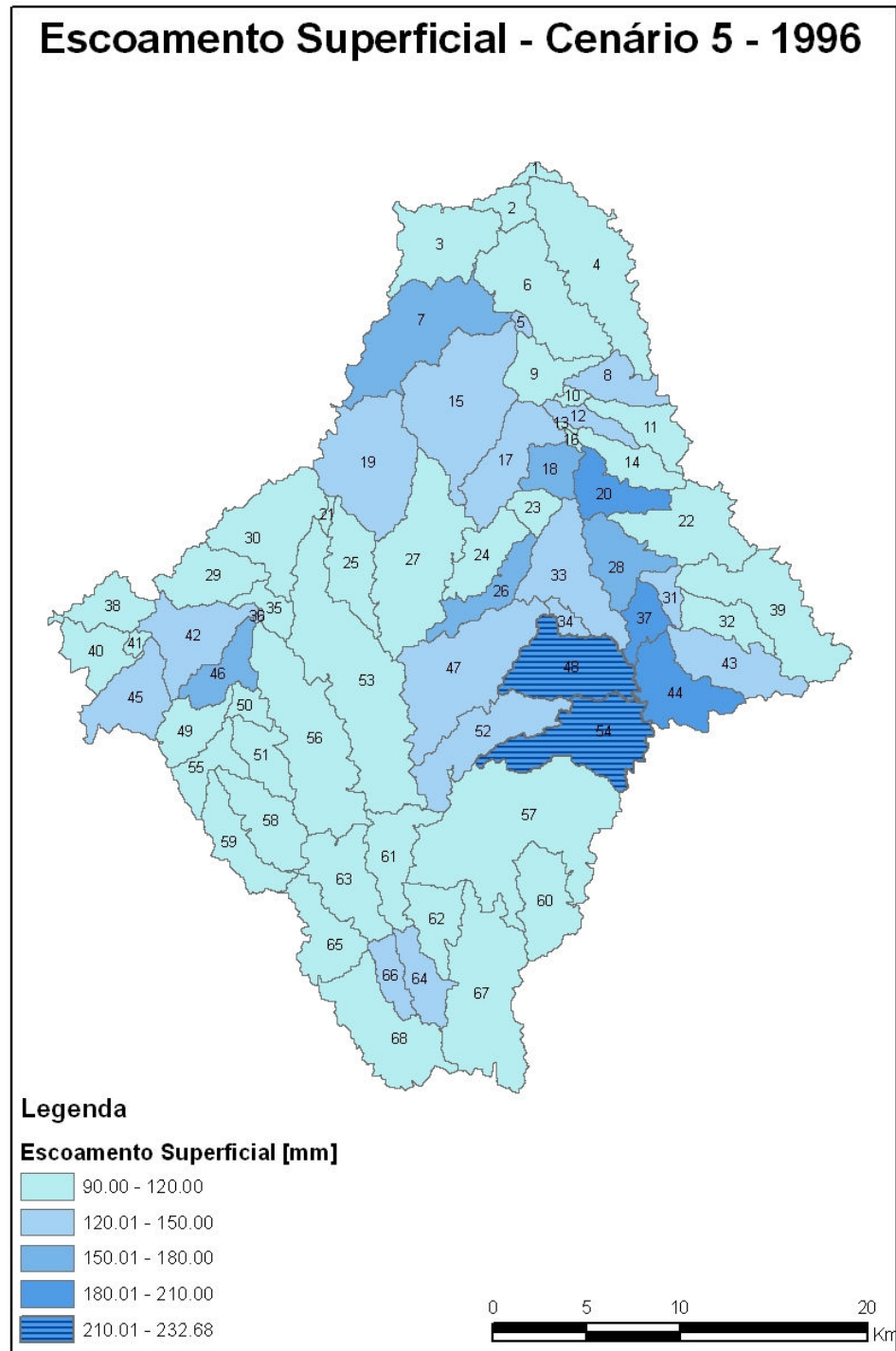


Figura 6-25 – Distribuição espacial do escoamento superficial no ano de 1996 para o cenário 5.

A Figura 6-26 apresenta a distribuição espacial da produção de sedimentos nas sub-bacias hidrográficas do Rio Preto para o cenário 5 no ano de 1996.

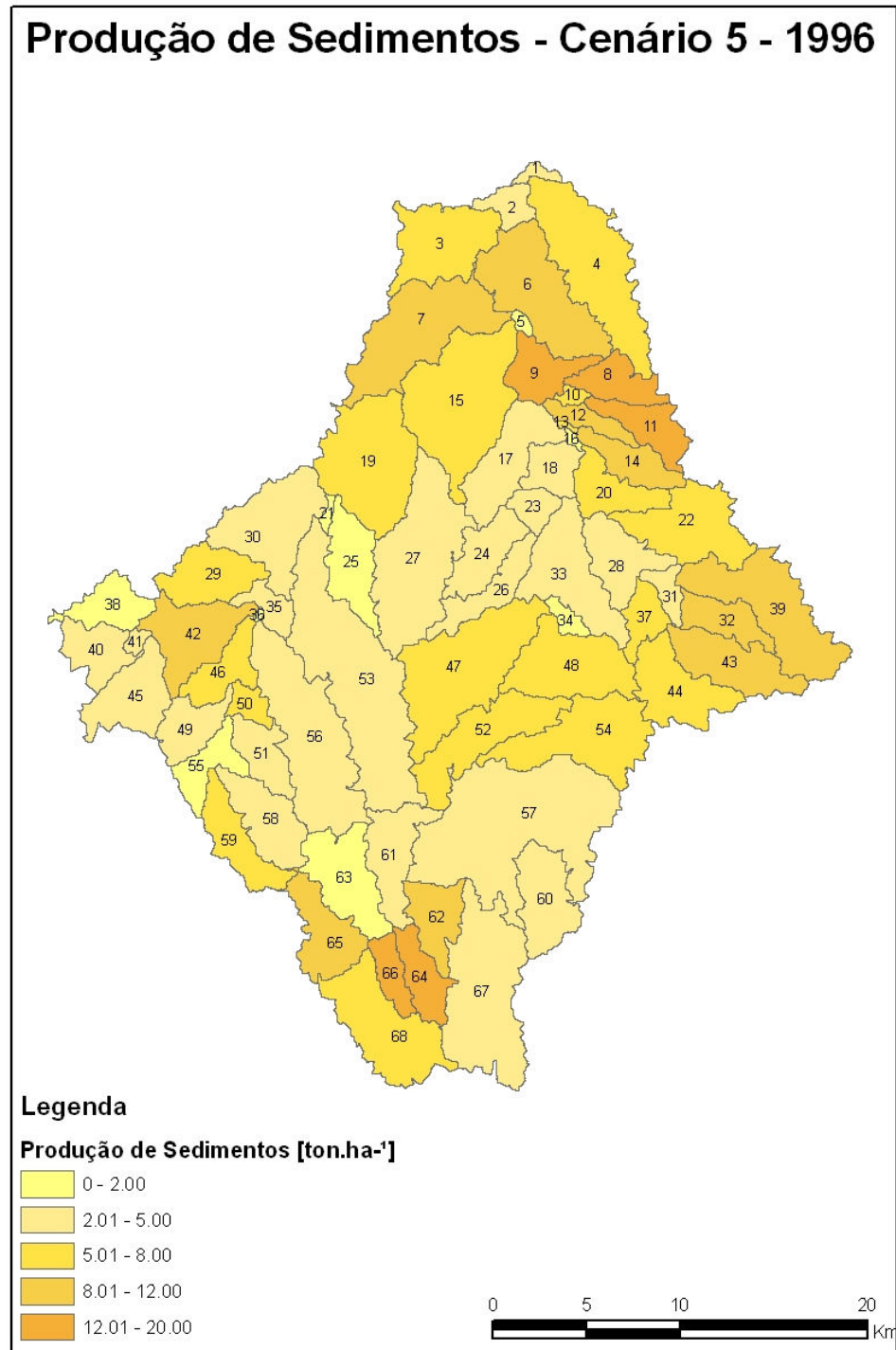


Figura 6-26 – Distribuição espacial da produção de sedimentos no ano de 1996 para o cenário 5.

6.9 Estudo comparativo do escoamento superficial e da produção de sedimentos entre os cenários simulados

6.9.1 Em nível de bacia

Os diversos usos de solo foram melhor avaliados utilizando-se o método de simulação de cenários. Os cinco cenários foram adotados com o intuito de realizar um comparativo entre si, bem como, para verificar as respectivas influências na dinâmica hidrossedimentológica.

A Figura 6-27 apresenta o escoamento total mensal comparativo entre os cenários simulados.

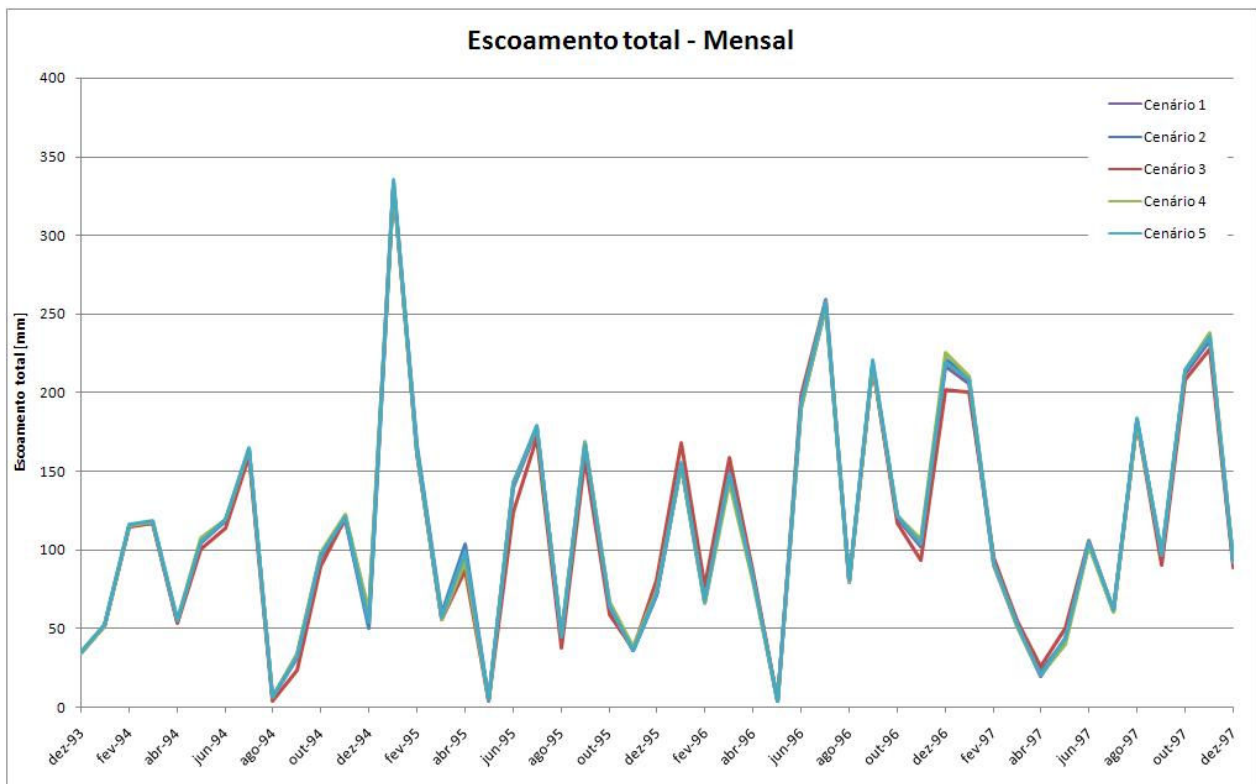


Figura 6-27 – Escoamento total mensal comparativo entre os cenários simulados.

É possível verificar na Figura 6-27 que não houve diferenças significativas entre os cinco cenários avaliados para o escoamento total mensal simulado na bacia. Apenas para o mês de dezembro de 1996 pode ser observada uma redução de aproximadamente 25 mm (variação de 11,25%) no escoamento total entre o cenário 3 (agricultura) e os cenários restantes.

A Figura 6-28 apresenta o escoamento superficial mensal comparativo entre os cenários simulados.

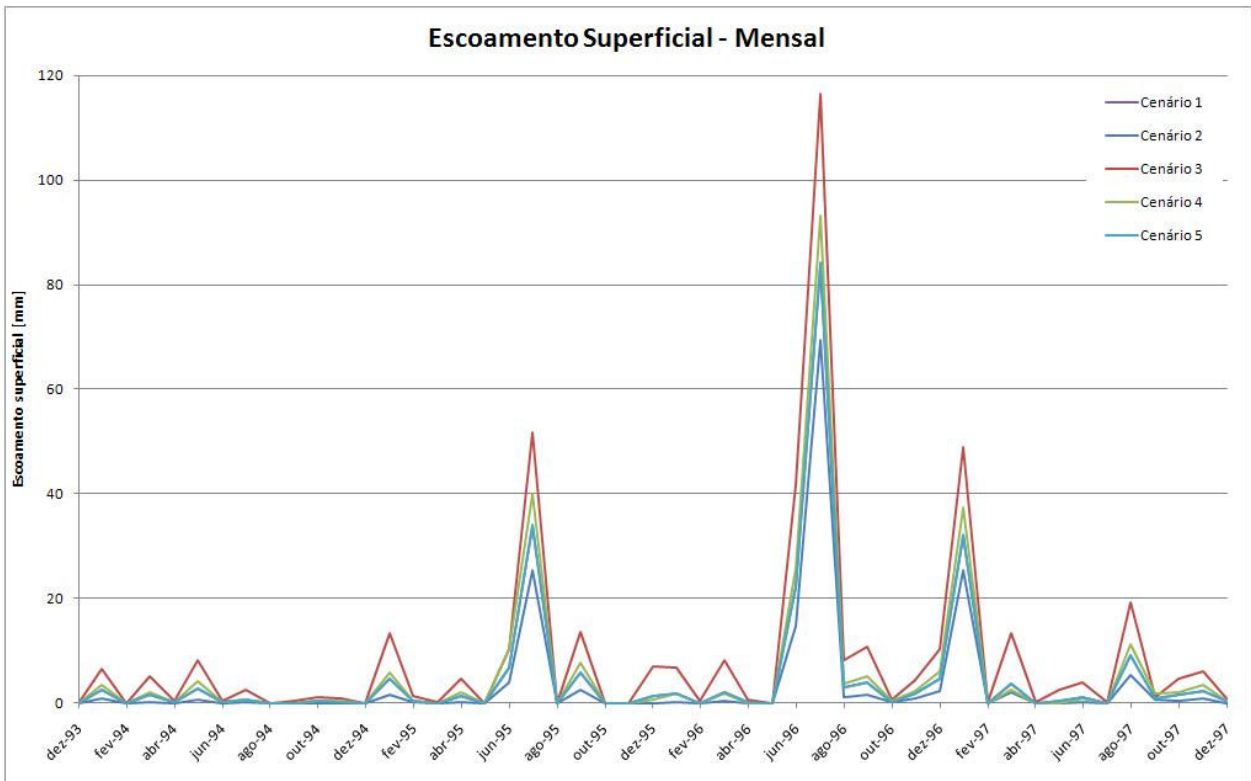


Figura 6-28 – Escoamento superficial mensal comparativo entre os cenários simulados.

A Figura 6-29 apresenta o escoamento superficial anual comparativo entre os cenários simulados.

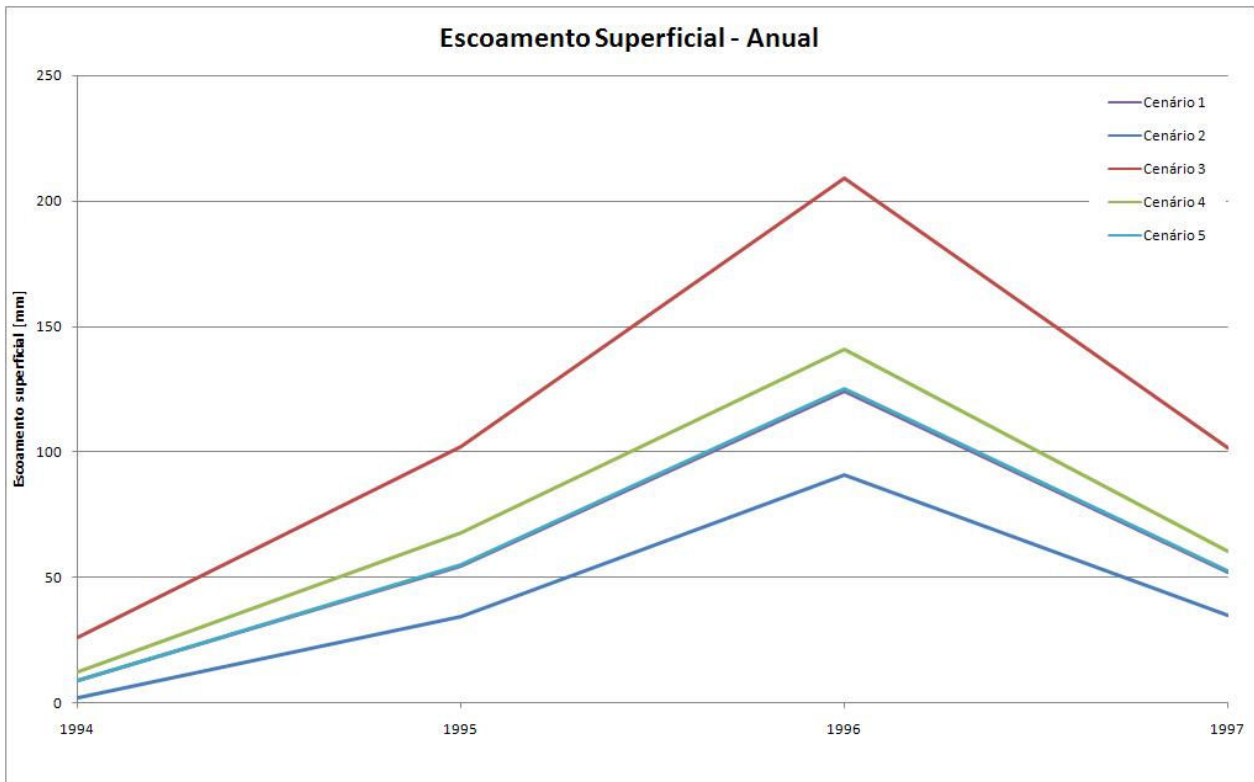


Figura 6-29 – Escoamento superficial anual comparativo entre os cenários simulados.

Comparando os gráficos apresentados nas Figura 6-28 e Figura 6-29, verificou-se que o escoamento superficial se alterou com a modificação no uso do solo entre os diferentes cenários. Entretanto, observa-se que o escoamento total não foi alterado como já apresentado na Figura 6-27.

A maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de escoamento superficial anual (Figura 6-29) foi de 118,17 mm (variação de 57%), entre o cenário 3 (Agricultura) e cenário 2 (Mata nativa) no ano de 1996. Já para as simulações de escoamento superficial mensal, a maior diferença encontrada entre os cenários foi de 47,06 mm (variação de 40%), entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata nativa) no mês de julho de 1996.

Pelas Figura 6-28 e Figura 6-29, nota-se que o cenário 3 (Agricultura) foi o que possuiu maior escoamento superficial de água na bacia. Já o uso do solo que proporcionou menor escoamento superficial foi o cenário 2 (Mata nativa). Esta verificação deve estar diretamente ligada com os valores adotados para a Curva Número (CN) pelo método de calibração automática, visto que para o cenário 3 (Agricultura) possui CN igual à 74 e para o cenário 2 (Mata nativa) possui CN de 62 (valor mínimo para a bacia do Rio Preto). Isso vem a confirmar o

que preconiza o método da Curva Número (CN) desenvolvida pelo Serviço de Conservação de Solos (SCS) dos Estados Unidos (1972;1986).

Os cenários 1 (Uso Atual) e 5 (Uso Atual sem Reservatórios) possuíram praticamente os mesmos valores para escoamento superficial durante todo o período de tempo simulado. Esta insignificante diferença pode ser notada apenas se averiguado os valores absolutos mensais de escoamento superficial de ambos os cenários, conforme apresentado na Tabela 6-19.

Tabela 6-19– Escoamento superficial mensal dos cenários 1 e 5 e diferença absoluta e percentual no escoamento superficial durante o período de simulação.

Ano	Cenário 1	Cenário 5	Diferença (mm)	Diferença (%)
	Escoamento Superficial (mm)	Escoamento Superficial (mm)		
1994	8.9	8.92	0.02	0.22
1995	54.54	54.93	0.39	0.72
1996	124.03	124.96	0.93	0.75
1997	51.98	52.35	0.37	0.71

Na Tabela 6-19, verifica-se que a maior diferença entre os cenários 1 e 5 foi de 0,93 mm, ou seja, uma variação de 0,75%.

As Figura 6-30 e Figura 6-31 apresentam a comparação da produção de sedimentos anual e mensal, respectivamente, entre os cenários simulados.

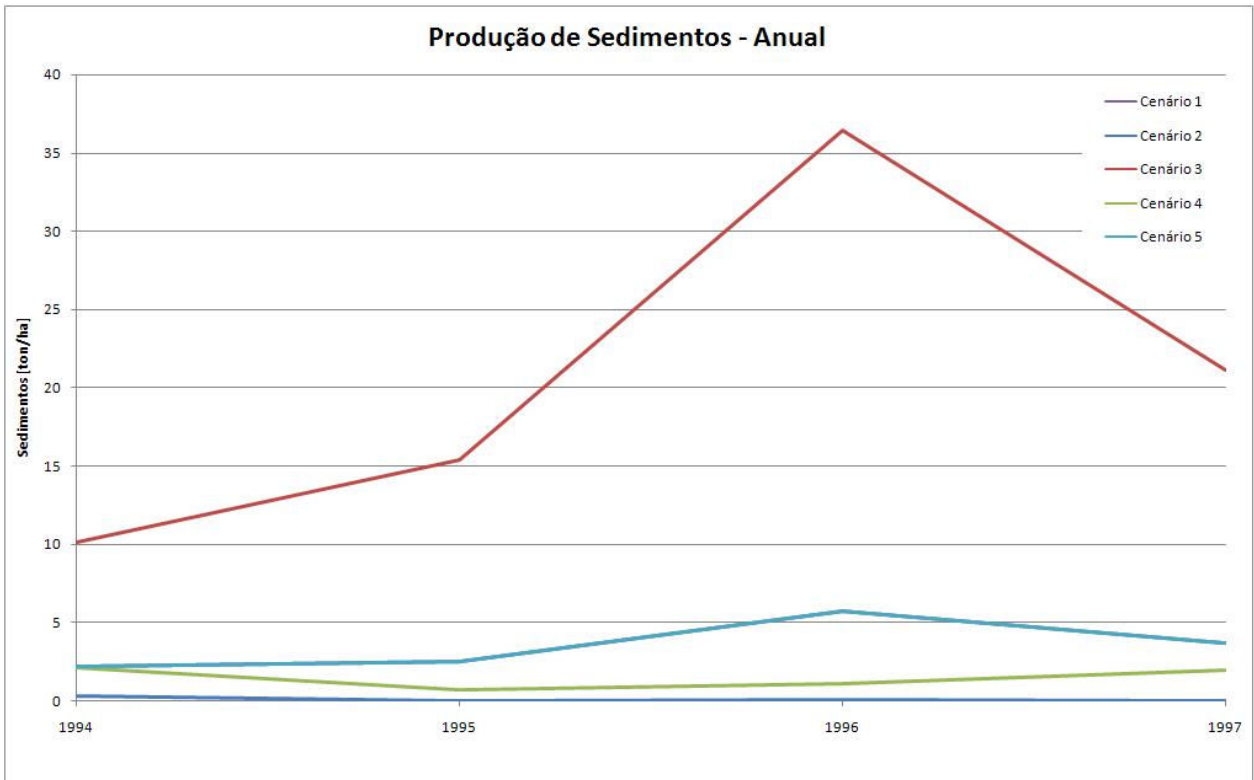


Figura 6-30 – Produção de sedimentos anual comparativo entre os cenários simulados.

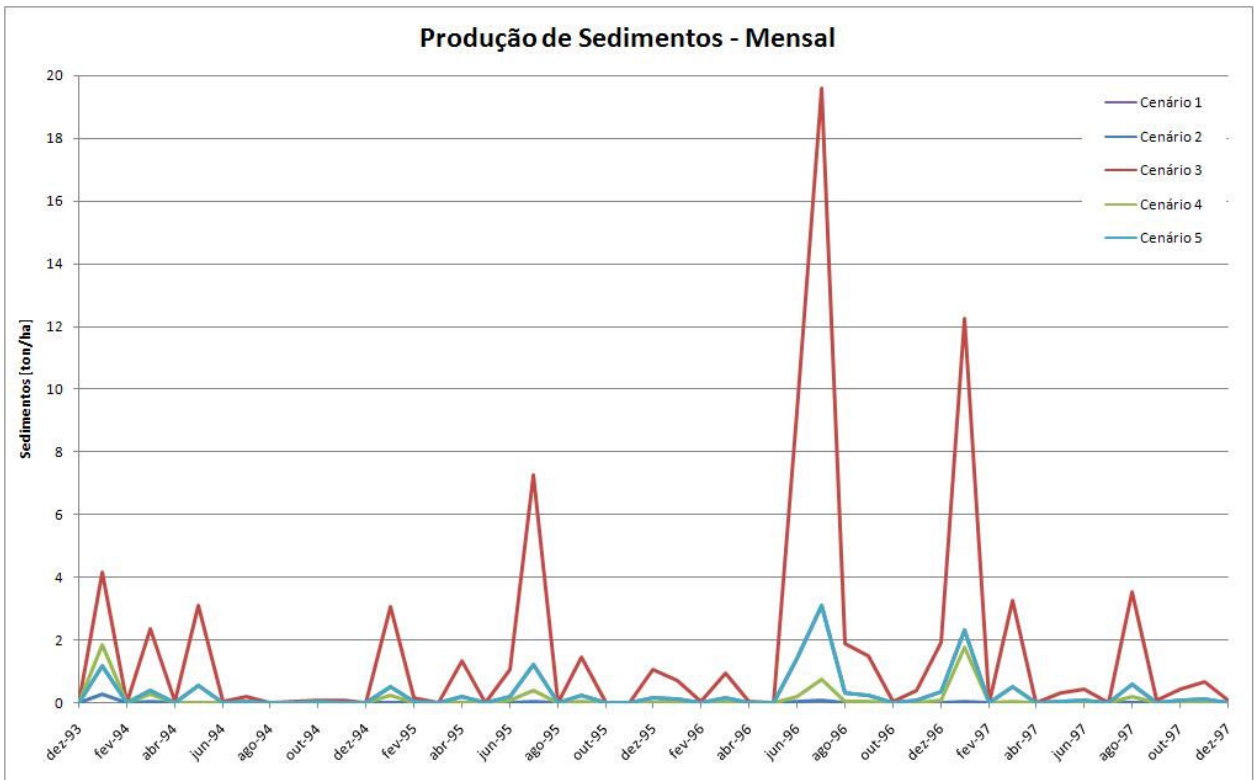


Figura 6-31 – Produção de sedimentos mensal comparativo entre os cenários simulados.

Pela Figura 6-30 é possível verificar que a produção de sedimentos simulados na bacia do Rio Preto possuiu diferenças significativas entre os cenários simulados. A maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de produção de sedimentos anual foi 36,28 ton.ha⁻¹ (variação de 30.230%), entre o cenário 3 (Agricultura) e cenário 2 (Mata Nativa) no ano de 1996. Já para as simulações de produção de sedimentos mensal, a maior diferença encontrada entre os cenários foi de 19,51 ton.ha⁻¹ (variação de 21.777%) entre o cenário 3 (Agricultura) e cenário 2 (Mata Nativa) no mês de julho de 1996.

Se comparados os cenários de uso do solo pelas Figura 6-30 e Figura 6-31, verifica-se que a produção de sedimentos foi muito maior no cenário 3 (agricultura) do que em todos os outros cenários, seguido do cenário 1 (Uso atual) e cenário 5 (Uso atual sem reservatórios) praticamente sobrepostos, do cenário 4 (Reflorestamento) e por fim o cenário 2 (Mata Nativa) com uma produção mínima de sedimentos.

Nas Figura 6-30 e Figura 6-31 verifica-se que a produção de sedimentos é praticamente igual nos cenários 1 (Uso atual) e 5 (Uso atual sem reservatórios).

A Figura 6-32 apresenta a evapotranspiração real anual nos diferentes cenários simulados.

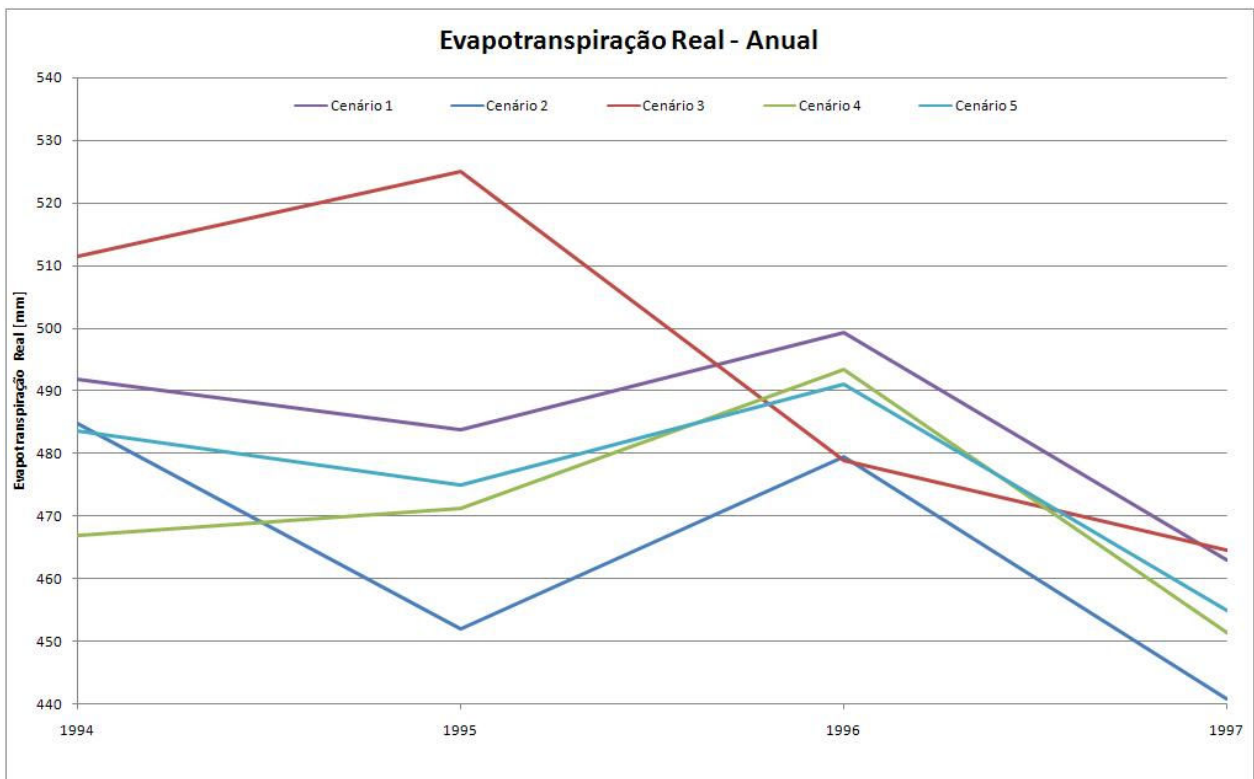


Figura 6-32 – Evapotranspiração real anual comparativo entre os cenários simulados.

O cenário 3 apresenta maior evapotranspiração real na maior parte do período simulado (Figura 6-32). Nos cenários 1 e 5, a evapotranspiração real comportou-se da mesma maneira, diminuindo do ano de 1994 para 1995, aumentando do ano de 1995 para 1996 e voltando a diminuir de 1996 para 1997. Seguindo na seqüência vem o cenário 4 e por ultimo, com menores valores na maior parte do período, o cenário 2.

A Figura 6-33 apresenta a percolação total anual comparativa entre os cenários simulados.

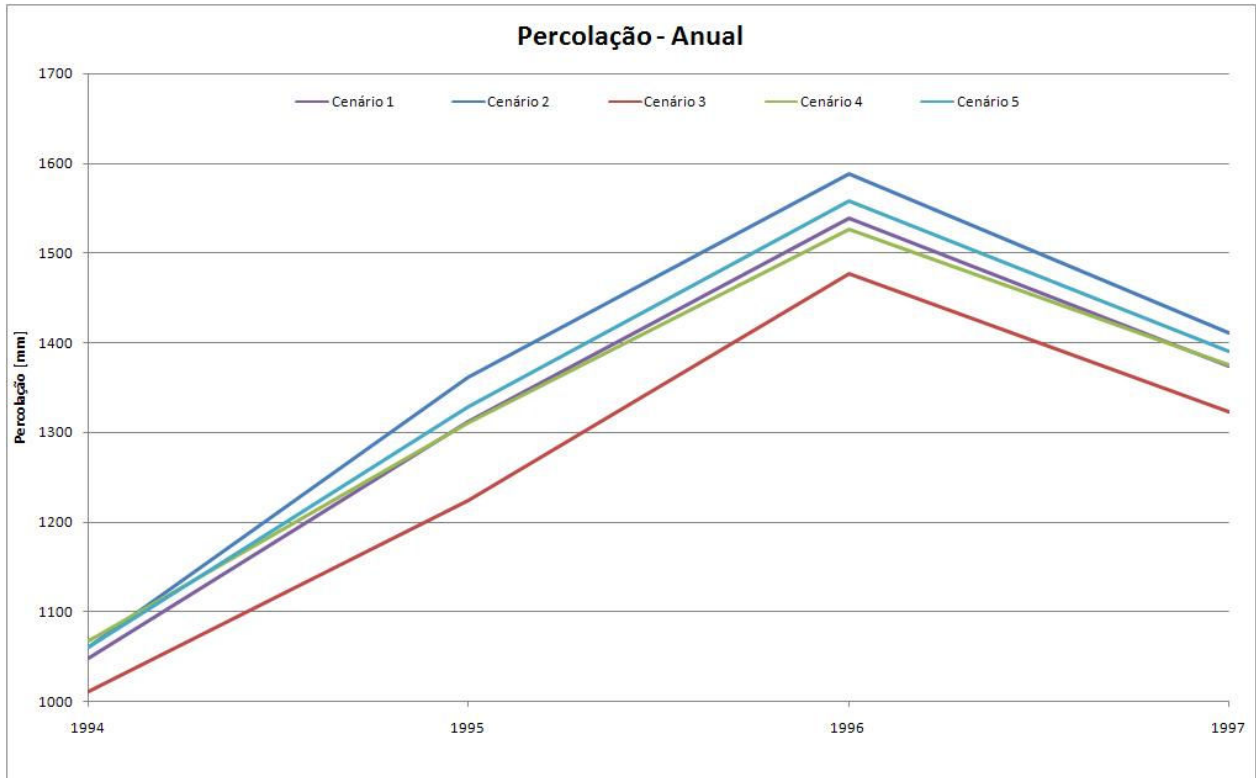


Figura 6-33 – Percolação anual comparativo entre os cenários simulados.

Pode-se verificar pela Figura 6-33 que a percolação simulada foi maior no cenário 2 (Mata nativa) seguido do cenário 5 (Uso atual sem reservatórios), do cenário 1 (Uso atual), do cenário 4 (Reflorestamento) e finalizando com a menor percolação, o cenário 3 (Agricultura).

6.9.2 Em nível de sub-bacia

Com base nos mapas apresentados no item 6.8, foram escolhidas as sub-bacias que apresentam valores maiores e menores, comparativamente, de escoamento superficial e de produção de sedimentos para avaliar a distribuição espacial nos diferentes cenários.

Cenários 1 e 5

Para os cenários 1 e 5, as sub-bacias escolhidas para avaliação do escoamento superficial foram a 48 e a 25 (Tabela 6-20).

Tabela 6-20 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 25.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 25 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Reflorestamento	22.24	Reflorestamento	78.51
Mata Nativa	26.07	Mata Nativa	15.81
Pastagem	26.24	Pastagem	2.88
Agricultura	25.45	Agricultura	2.8
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

* ESC SUP – Escoamento Superficial.

Pela Tabela 6-20 verifica-se que a sub-bacia 48 apresentou maior escoamento superficial, em relação a 25. Isso pode estar sendo influenciado pelo uso do solo com agricultura e reflorestamento. Em relação à agricultura, esta representa 25,45% da área total da sub-bacia 48 e apenas 2,8% da sub-bacia 25. Já o reflorestamento é predominante na sub-bacia 25 (78,51%), e por esta razão o escoamento superficial foi menor. Isso confirma os resultados obtidos nas simulações de escoamento superficial apresentados no item 6.9.1 (Figura 6-28 e Figura 6-29).

Para a avaliação da produção de sedimentos, foram escolhidas as sub-bacias 8 e 25 (Tabela 6-21).

Tabela 6-21 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 8 e 25.

Sub-bacia 8 (SED maior)		Sub-bacia 25 (SED menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Reflorestamento	4.03	Reflorestamento	78.51
Mata Nativa	30.18	Mata Nativa	15.81
Pastagem	27.08	Pastagem	2.88
Agricultura	38.72	Agricultura	2.8
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	100	Cambissolo	100

* SED – Produção de Sedimentos.

Analisando a Tabela 6-21, verifica-se que a sub-bacia 8 apresentou maior produção de sedimentos em relação a 25, sendo que na primeira o uso predominante é agricultura (38,72%) e na segunda, é reflorestamento (78,51%). Isso também confirma os resultados obtidos nas simulações de produção de sedimentos apresentados no item 6.9.1 (Figura 6-30 e Figura 6-31).

Cenário 2

Para o cenário 2, as sub-bacias escolhidas para verificação do escoamento superficial foram as sub-bacias 35 e 48 (Tabela 6-22).

Tabela 6-22 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 35 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Mata Nativa	100	Mata Nativa	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

Na Tabela 6-22 verifica-se que a sub-bacia 48 apresentou maior escoamento superficial, onde o solo predominante é o Nitossolo (86,77%), em relação a sub-bacia 35 que apresentou menor escoamento superficial e o tipo de solo é homogêneo (100% de Cambissolo).

Para a avaliação da produção de sedimentos, foram escolhidas as sub-bacias 35 e 43 (Tabela 6-23).

Tabela 6-23 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 35.

Sub-bacia 43 (SED maior)		Sub-bacia 35 (SED menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Mata Nativa	100	Mata Nativa	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	82	Cambissolo	100
Nitossolo	18		

Observa-se na Tabela 6-23 que a sub-bacia 43 teve maior produção de sedimentos em relação a 35, sendo que na primeira, 82% da área é constituída por Cambissolo e 18% de Nitossolo, e na segunda, o solo é homogêneo (100% de Cambissolo).

Cenário 3

Para o cenário 3, as sub-bacias escolhidas para verificação do escoamento superficial foram as sub-bacias 35 e 48 (Tabela 6-24).

Tabela 6-24 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 35 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Agricultura	100	Agricultura	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

No cenário 3, ocorreu um maior escoamento superficial na sub-bacia onde houve predominância de Nitossolo (sub-bacia 48). Também nesse cenário observa-se um menor escoamento superficial onde 100% da área é constituída de Cambissolo (sub-bacia 35).

Para a avaliação da produção de sedimentos, foram escolhidas as sub-bacias 25 e 43 (Tabela 6-25).

Tabela 6-25 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 25.

Sub-bacia 43 (SED maior)		Sub-bacia 25 (SED menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Agricultura	100	Agricultura	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	82	Cambissolo	100
Nitossolo	18		

Pela Tabela 6-25, observa-se que a sub-bacia 43 apresentou maior produção de sedimentos, sendo constituída por 82% de Cambissolo e 18% de Nitossolo, em relação a sub-bacia 25 que apresenta 100% de Cambissolo.

Cenário 4

Para o cenário 4, as sub-bacias escolhidas para verificação do escoamento superficial foram as sub-bacias 35 e 48 (Tabela 6-26).

Tabela 6-26 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 48 e 35.

Sub-bacia 48 (ESC SUP maior)		Sub-bacia 35 (ESC SUP menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Reflorestamento	100	Reflorestamento	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	13.23	Cambissolo	100
Nitossolo	86.77		

A Tabela 6-26 mostra que o escoamento superficial da sub-bacia 48 foi maior que a 35, sendo que a primeira é composta por 82% de Cambissolo e 18% de Nitossolo, e a segunda por 100% de Cambissolo.

Para a avaliação da produção de sedimentos, foram escolhidas as sub-bacias 35 e 43 (Tabela 6-27).

Tabela 6-27 – Áreas (%) do uso e tipo de solo nas sub-bacias 43 e 35.

Sub-bacia 43 (SED maior)		Sub-bacia 35 (SED menor)	
Uso do Solo	Área (%)	Uso do Solo	Área (%)
Reflorestamento	100	Reflorestamento	100
Solo	Área (%)	Solo	Área (%)
Cambissolo	82	Cambissolo	100
Nitossolo	18		

Os resultados mostrados na Tabela 6-27 permitem observar que a sub-bacia 43 apresentou maior produção de sedimentos em relação a sub-bacia 35, assim como para as mesmas nos cenários 2 e 3.

Observa-se que nos cenários 2, 3 e 4 o que influenciou o escoamento superficial e a produção de sedimentos foi o tipo de solo, pois em cada um desses cenários o uso do solo foi considerado homogêneo.

Considerando somente os dados de solo, esses cenários permitiram avaliar, de uma maneira geral, que as áreas que contém os dois tipos de solo (Nitossolo e Cambissolo) possuíram maior escoamento superficial e produção de sedimentos do que aquelas onde contém somente Cambissolo.

7 Conclusões e Recomendações

7.1 Conclusões

Visando compreender o escoamento superficial e a produção de sedimentos, o presente estudo modelou a dinâmica hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do Rio Preto (SC). Nas condições em que foi realizado esse estudo e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O SWAT permitiu modelar a dinâmica hidrossedimentológica reproduzindo o escoamento superficial e a produção de sedimentos na área de estudo a partir dos dados de entrada requeridos pelo modelo e dos dados de vazão medidos em campo no período de tempo adotado;
- O modelo calibrou automaticamente os parâmetros de entrada mais significantes, obtidos pela análise de sensibilidade e calibração manual para o período de tempo adotado (dez/1993 à dez/1997), adequando o escoamento total simulado aos dados de vazão medidos, assim comprovado pelos valores encontrados de NASH (0,505) e Dv (-4,96). Entretanto, a validação não foi executada, uma vez que, o período simulado para os cenários de uso do solo foram os mesmos utilizados para a calibração manual e automática;
- Para os diferentes cenários de uso e cobertura do solo avaliados, o cenário 3 (Agricultura) apresentou maior escoamento superficial e produção de sedimentos.
- O maior impacto na redução do escoamento superficial e da produção de sedimentos foi obtido pela substituição do uso atual do solo (cenário 1) pela mata nativa (cenário 2). A maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de escoamento superficial anual foi de 118,17 mm (variação de 57%) entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata nativa) no ano de 1996.
- O maior impacto na redução da produção de sedimentos foi obtido pela substituição do uso atual do solo (cenário 1) pela mata nativa (cenário 2); A maior diferença encontrada entre os cenários nas simulações de produção de sedimento anual foi de 36,28 ton.ha⁻¹

(variação de 30.230%), entre os cenários 3 (Agricultura) e 2 (Mata Nativa) também para o ano de 1996.

Considerando a estimativa de diversos dados de entrada que eram inexistentes para a bacia do Rio Preto, o modelo SWAT mostrou-se ser relativamente eficiente, uma vez que permitiu a identificação do melhor cenário de uso do solo para escoamento superficial e produção de sedimentos na bacia do Rio Preto. Entretanto, sugere-se que novos estudos sejam realizados para melhor compreensão da dinâmica hidrossedimentológica, visto que a entrada de dados no modelo deve ser mais ampla e precisa, ou seja, com maior nível de detalhamento de solos e monitoramento de sedimentos para calibração.

7.2 Recomendações

Ao final destas conclusões, a dinâmica hidrossedimentológica na bacia do Rio Preto deve ser mais estudada nos trabalhos posteriores. Assim, podem-se citar os seguintes aspectos:

- O fator declividade também deve ser considerado na avaliação do escoamento superficial e da produção de sedimentos. Somente as características do solo não foram suficientes para uma conclusão mais precisa da sua influência sobre essa avaliação. Para um mesmo solo, porém em diferentes declividades observou-se, visualmente, nos mapas de distribuição espacial que houve mudança nos parâmetros avaliados;
- Utilizar um levantamento de solos da bacia a ser estudada em nível de detalhe, considerando a grande quantidade de dados requeridos no SWAT;
- Calcular a Taxa de Transferência de Sedimentos (*SDR*) para as sub-bacias pertencentes a bacia do Rio Preto, bem como, procurar estudar sua inter-relação com os parâmetros que influem no transporte de sedimentos;
- Calibrar o modelo baseado em medições de sedimentos, ou seja, obtenção de sólidos em suspensão por meio de sensores (turbidímetros);

- Modelagem procurando a inserção de maior quantidade de dados meteorológicos com a instalação de mais estações meteorológicas procurando simular a variabilidade espacial da precipitação e dos fenômenos meteorológicos;
- Modelagem considerando a qualidade de água na bacia do Rio Preto;
- Medição em campo com o equipamento ADCP com uma faixa maior do que o utilizado neste estudo (6 metros);
- Monitoramento da vazão e de sedimento nas saídas dos reservatórios para obtenção de um modelo com melhor desempenho;
- Cálculo dos parâmetros de uso do solo relativos à área de estudo;
- Cenário de simulação considerando a legislação federal com inclusão de Áreas de Proteção Permanente (APPs).

8 Referências Bibliográficas

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling Hydrology and Water Quality in the Pre-alpine/Alpine Thur Watershed Using SWAT. **Journal of Hydrology**. v.333, p. 413-430, 2007.

ACADEMIA DE CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – ACIESP. **Glossário de Ecologia**. 1ª. ed. Publicação ACIESP n° 57 – ACIESP/CNPq/FAPESP/Secretaria de Ciência e Tecnologia, 1987.

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **J. Irrig. and Drain. Eng.**, ASCE, v.112, p.348-368. 1986.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. **Operational estimates of evapotranspiration**. Agron. J., 81:650-662. 1989.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; MAIDMENT, D. R. Continuous-time water and sediment routing model for large basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.121, p.171-183, 1995.

ASHIDA, K.; OKUMURA, T. **Study on sedimentation in reservoirs**. Disaster Prevention Research Institute Annuals – Kyoto University, Kyoto, v. 17B, p. 555-570, 1974. (em japonês com resumo em inglês).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. **Revista Brasileira de Saneamento e Meio ambiente – BIO**. Ano XVI – n° 46. Rio de Janeiro: ABES, 2008.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological Processes**, 19, 563-572, 2005.

BAGNOLD, R. A. **Bedload transport in natural rivers.** Water Resources Research, v.13, p.303-312, 1977.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** 4ª ed. São Paulo: Ícone, 1999. 355p.

BURROUGH, P.A.; MACDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998. 33p

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais.** Curitiba: UFPR, 2003. 219p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais.** 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999. 236p.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DEBELE, B.; SRINIVASAN, R.; PARLANGE, J. Y. **Environmental Modelling and Assessment.** *Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins.* Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00221694>>. Acesso em: 31 de março de 2008.

DE VENTE, J.; POESEN, J.; ARABKHEDRI, M.; VERSTRAETEN, G. The Sediment Delivery Problem Revisited. **Progress in Physical Geography**, v.31, p.155-178, 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina.** Boletim de Pesquisa nº6. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1998. 721p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Levantamento de Reconhecimento de Solos de Santa Catarina**: Embrapa CNPS, 2004a.

EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004b. 745p.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA S.A. – EPAGRI / CENTRO DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS AMBIENTAIS E DE HIDROMETEOROLOGIA DE SANTA CATARINA - CIRAM. **Mapa de Solos – Unidade de Planejamento Regional do Planalto Norte Catarinense (UPR4)**. 2002.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA S.A. – EPAGRI / CENTRO DE INFORMAÇÕES DE RECURSOS AMBIENTAIS E DE HIDROMETEOROLOGIA DE SANTA CATARINA - CIRAM. **Zoneamento Agroecológico**. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/agricultura/zoneAgroecologico.jsp&tipo=agricultura>>. Acesso em: 29 de novembro de 2008.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4ªed. Curitiba: Champagnat, 1997.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340p.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v.1, p.96-99, 1985.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (IBGE). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2ª ed. São José dos Campos: [s.n.], 1998.

KLEIN, R. M. **Mapa Fitogeográfico do Estado de Santa Catarina.** Flora Ilustrada Catarinense. V Parte. 1978.

KOBIYAMA, M. **Manejo de Bacias Hidrográficas - Conceitos básicos.** In: Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal, 1999, Curitiba. Apostila do Curso. Curitiba : Curso de Eng. Florestal - UFPR, 1999. p. 29-31. Disponível em: < <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/bacia.pdf>> . Acesso em: 26 de novembro de 2008.

KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. J. **Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas.** In: Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Eng. Florestal – UFPR, 1999b. p.111-118. (Apostila do curso). Disponível em: < <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/monitoramento.pdf>> . Acesso em: 21 de agosto de 2008.

LINO, J. F. L. **Impactos ambientais causados pela erosão superficial do solo.** 2006. (Não publicado).

LINO, J.F.L.; KOBIYAMA, M; MALUTTA, S. Relação de Sólidos em Suspensão com vazão e precipitação na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Negro, Região Sul do Brasil. **Anais** do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007. 12p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciências do Solo.** Viçosa, v. 27, n. 4, p.727-733, 2003.

MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C. A.. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa, v. 27, n. 4, p.735-741, 2003.

MISHRA, A.; KAR, S.; SINGH, V. P. **Water Resource Management. Prioritizing Structural Management by Quantifying the Effect of Land Use and Land Cover on Watershed Runoff and Sediment Yield**. Disponível em <www.xxx.com.br>. Acesso em: 10 de abril de 2008.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and the environment**. In: The state and movement of water in living organisms, XIXth Simposio Soc. For Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press. 1965. p.205-234.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 200p.

MÜLLER, A. C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995. 412p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation – Version 2005**. Temple: Agricultural Research Service (USDA) & Texas Agricultural Experiment Station (Texas A&M University), 2005. 541p.

NOVO, E.M. L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2ª. ed. São Paulo, SP: Edgar Blücher, 1992. 308p.

PAN, C.; SHANGGUAN, Z. Runoff Hydraulic Characteristics and Sediment Generation in Sloped Grassplots Under Simulated Rainfall Conditions. **Journal of Hydrology**. v.331, p.178-185, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRINHO. Informações gerais. Disponível em: <<http://www.rionegrinho.sc.gov.br/caracteristicas.htm>>. Acesso em: 20 agosto de 2008.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Mon. Weather Rev.**, v.100, p.81-92, 1972.

RAWLS, W. L.; BRAKENSIEK, D. L; SAXTON, K. E. Estimation of soil water properties. **Trans. ASAE**, v.25, p.1316-1320, 1995.

RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2ªed. New York: Springer-Verlag, 1993. 340p.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. **Ciência & Ambiente**. UFSM. v. 24, p. 75-92, jan./junh. 2002.

RODRIGUES, J. E. **Estudos de fenômenos erosivos acelerados – Boçorocas**. São Carlos, 1982. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo.

ROMERO B., F. **Soil erosion modelling using a GIS**. Universidad de Concepcion. 2005.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis: GAPLAN/SUEGI; [Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro], 1986. 173p. il., mapas.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173p.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Centro Integrado de Informações de Recursos Ambientais. **Dados e Informações Biofísicas da Unidade de Planejamento Regional do Planalto Norte Catarinense**. Florianópolis, 2002.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: Teoria e Prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184p.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2004. 140p.

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno - PR**. Florianópolis, 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1^a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669p.

U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service. Hydrology. **National engineering handbooks**. Washington: USDA, 1972. (Section 4).

U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil Conservation Service. Hydrology. **National engineering handbooks**. Washington: USDA, 1986. (Section 4).

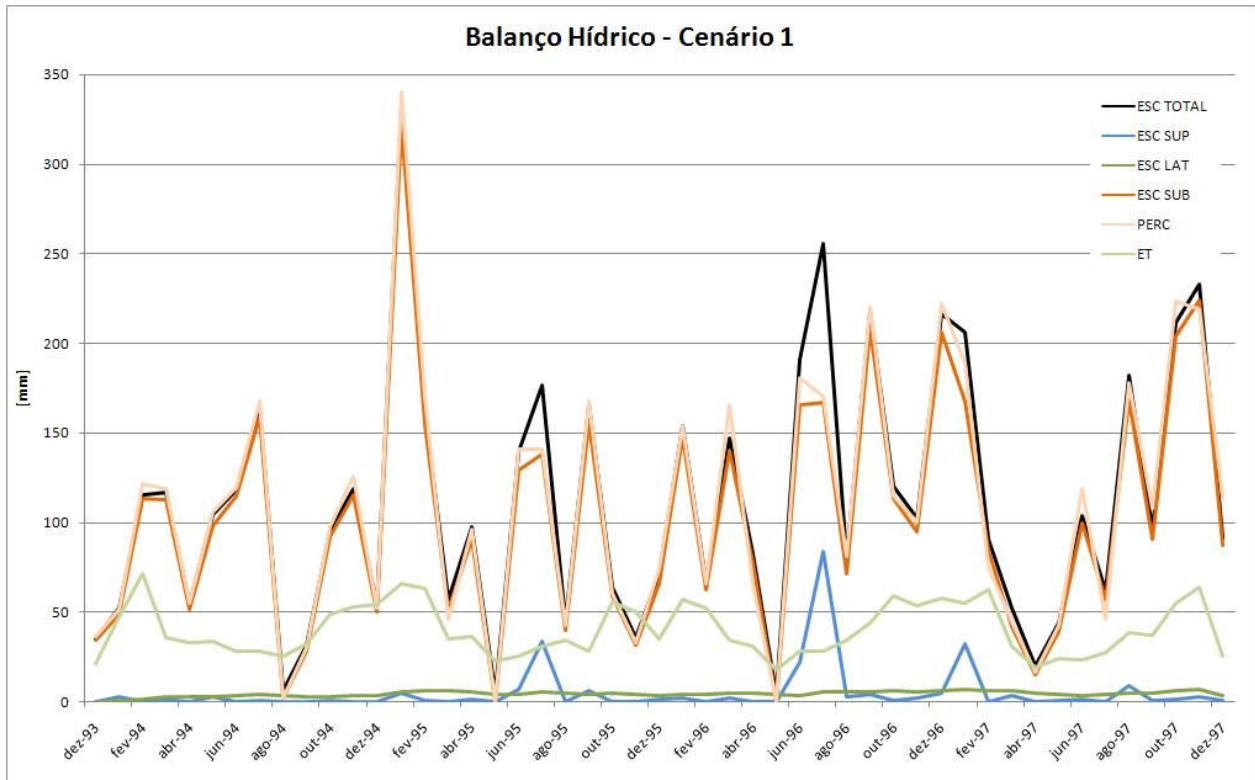
WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Trans. ASAE**, v.12, p.100-103, 1969.

WILLIAMS, J. R. The EPIC model. p.909-1000. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, 1995.

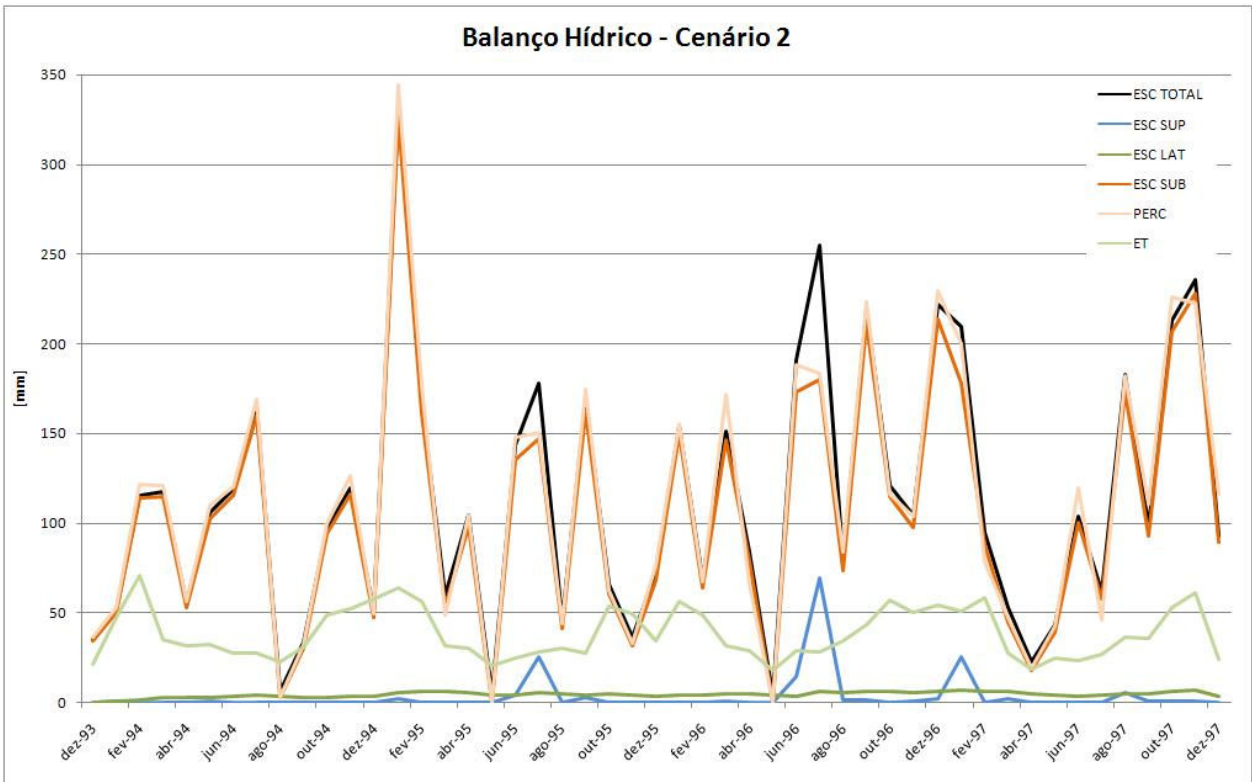
APÊNDICE A ---- Balanço hídrico para os diferentes cenários simulados

Legenda dos gráficos apresentados no apêndice A

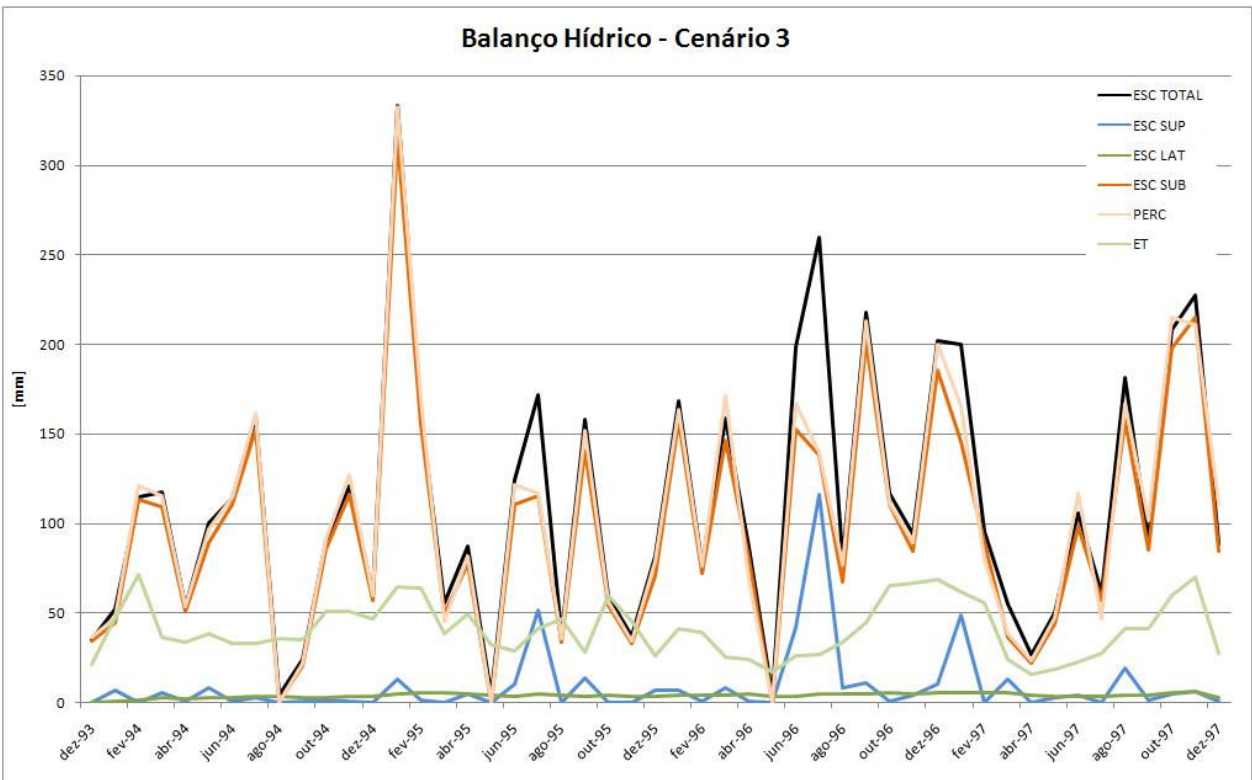
ESC TOTAL – Escoamento Total
 ESC SUP – Escoamento Superficial
 ESC LAT – Escoamento Lateral ou Subsuperficial
 ESC SUB – Escoamento Subterrâneo
 PERC – Percolação
 ET – Evapotranspiração Real



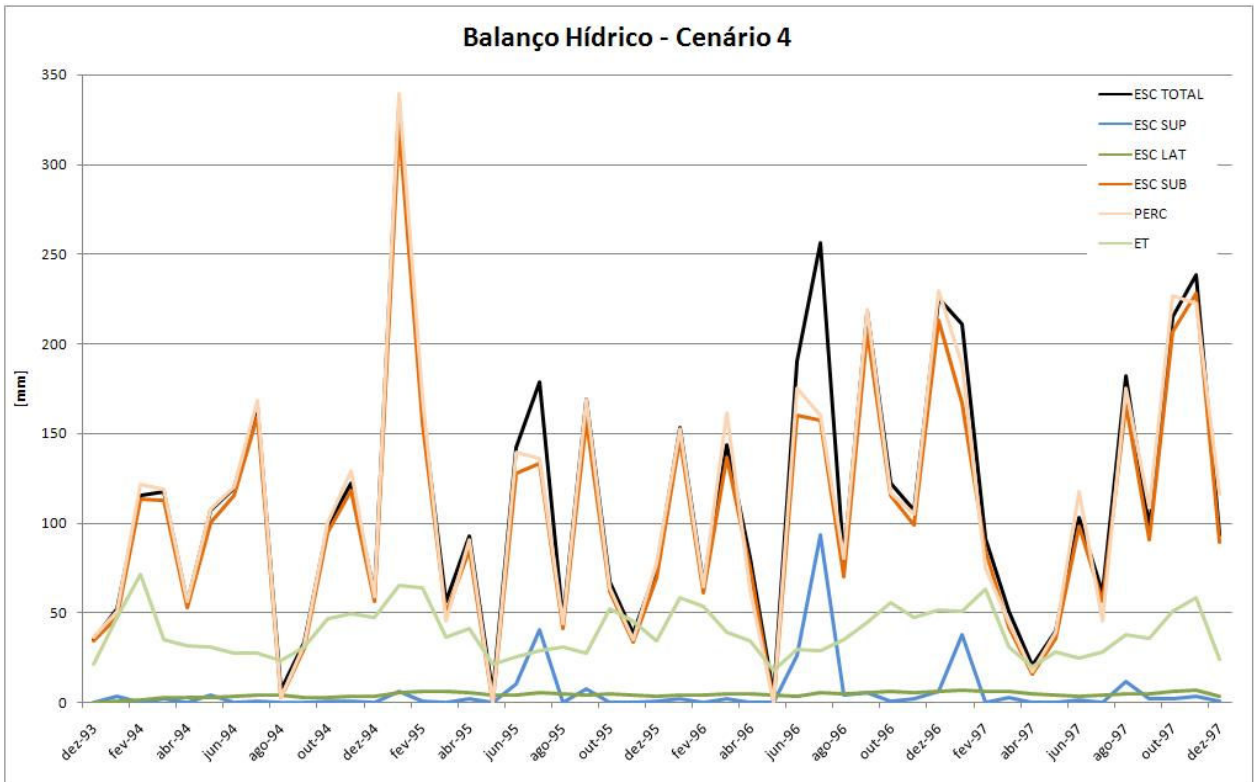
Balanco hídrico para o cenário 1.



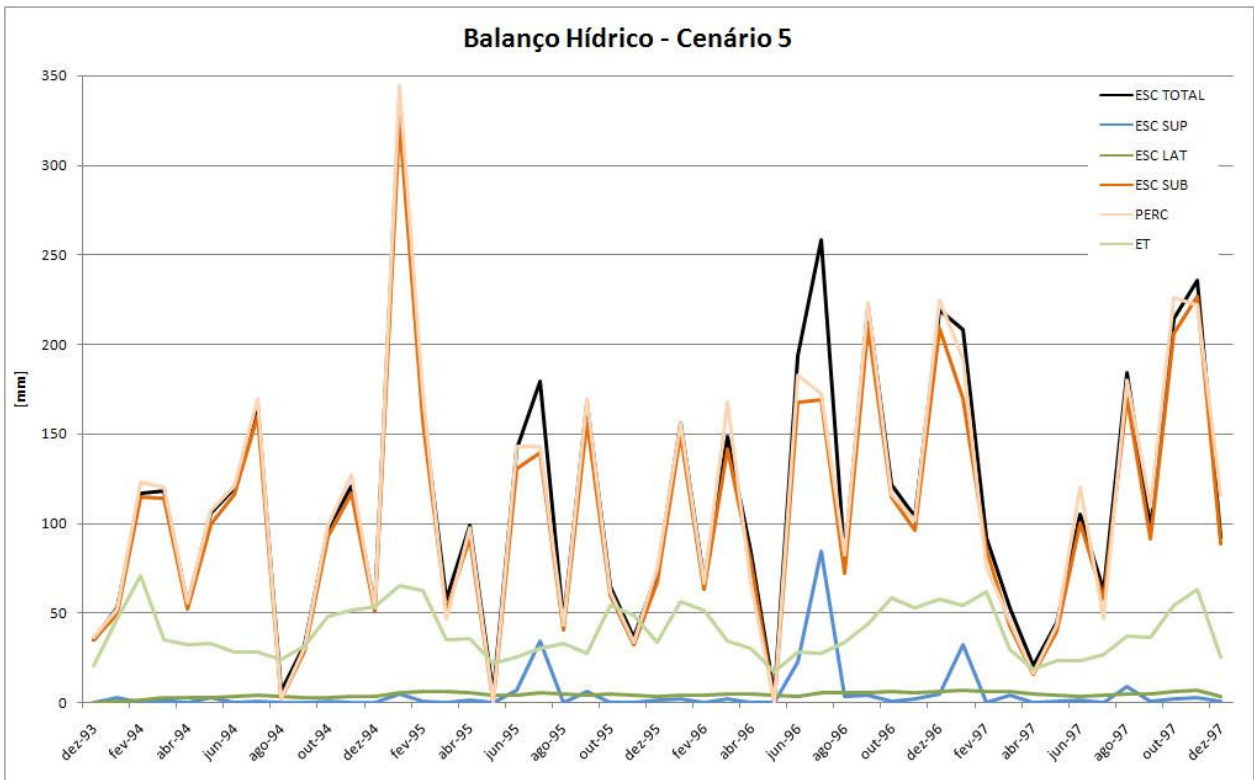
Balanço hídrico para o cenário 2.



Balanço hídrico para o cenário 3.



Balanço hídrico para o cenário 4.



Balanço hídrico para o cenário 5.