

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

Simone Malutta

**ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRINHO - SC COM O MODELO  
SWAT**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de mestre em Engenharia  
Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Masato  
Kobiyama

Florianópolis  
2012





Simone Malutta

**ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRINHO - SC COM O MODELO  
SWAT**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de mestre em Engenharia  
Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Masato  
Kobiyama

Florianópolis  
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

M261e Malutta, Simone  
Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT [dissertação] / Simone Malutta ; orientador, Masato Kobiyama. - Florianópolis, SC, 2012.  
127 p.: il., grafs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia ambiental. 2. Sedimentologia. 3. Análise da sedimentação. 4. Bacias hidrográficas - Rio Negrinho (SC). I. Kobiyama, Masato. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

CDU 628.4

**“Estudo Hidrossedimentalógico da Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho/SC com o Modelo SWAT”**

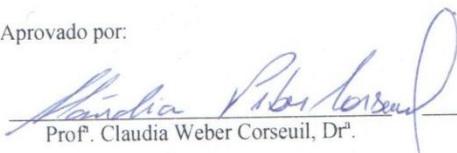
SIMONE MALUTTA

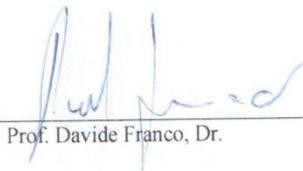
Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

na Área de Engenharia Ambiental.

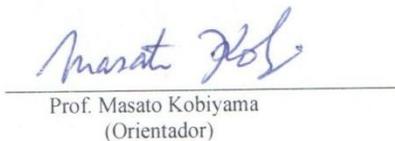
Aprovado por:

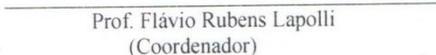
  
Profª. Claudia Weber Corseuil, Drª.

  
Prof. Davide Franco, Dr.

  
Profª. Nadia Bernardi Bonumá, Drª.

  
Luis Hamilton Pospissil Garbossa, Dr.

  
Prof. Masato Kobiyama  
(Orientador)

  
Prof. Flávio Rubens Lapolli  
(Coordenador)



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Masato Kobiyama pela orientação na graduação e pós graduação e principalmente pela amizade durante todos esses anos.

Aos amigos do LabHidro, Aline, Fernando, Joana, Roberto Valmir, Roberto Goerl, Fabi, Gean, Patricia, Albert, Marco e Leonardo pelas auxílio em campo e no desenvolvimento da dissertação. Principalmente ao Fernando pela ajuda fundamental nas medições de vazão e elaboração da curva chave, ao Gean e o Fernando pela instalação dos sensores e ao Marco no trabalho de campo. A Aline pelo apoio na elaboração de artigos e da dissertação.

Ao meu querido namorado Osmar pelo incentivo, suporte e compreensão nos momentos difíceis.

A minha família que mesmo longe nunca me deixou faltar carinho, amizade e respeito.

Agradeço às Professoras Cláudia Weber Corseuil, Nádia Bernardi Bonumá, ao Professor Davide Franco e ao Eng. Luis Hamilton Garbossa pelas contribuições na defesa final desta dissertação.

À EPAGRI pelo fornecimento dos dados meterológico da região de Rio dos Negrinho.

A Prefeitura e a SAMAE de Rio Negrinho pelo auxílio no desenvolvimento do projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da UFSC e à Secretaria do PPGEA pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro prestado para execução deste trabalho.



## RESUMO

O município de Rio Negrinho vem sofrendo com alteração da quantidade e qualidade da água devido a substituição da mata nativa por reflorestamento de pinus e acelerada urbanização. Visto isso, o presente estudo teve como objetivo analisar espacialmente os processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Negrinho – SC através do modelo SWAT. Foram realizado o monitoramento hidrossedimentológico, formação de banco de dados espaciais e tabulares, determinação das sub-bacias, calibração e validação do modelo, análises estatísticas, avaliação espacial da produção de água e de sedimentos e verificação da tolerância de perda de solos nas sub-bacias. Os dados simulados pelo modelo foram comparados com os dados observados de vazão em dois pontos de monitoramento da bacia e os dados de concentração de sedimento em um ponto da bacia. O desempenho do modelo foi analisado a partir do *NASH* (coeficiente de Nash-Sutcliffe),  $R^2$  (coeficiente de correlação), Erro médio (EM) e CMR (Coeficiente de massa residual). Os valores de *NASH* variaram de 0,48 a 0,61 para dados de vazão e 0,43 para dados de sedimento. Analisando o balanço hídrico da bacia o coeficiente de variação da precipitação, vazão e evapotranspiração mensal foi de 23%, 20% e 30% respectivamente. Já o armazenamento de água no solo variou muito pouco ao longo do ano, apresentando coeficiente de variação de 8,7%. Comparada a tolerância de perda de solos com os dados de produção de sedimento da bacia foi possível evidenciar que 11% da área da bacia apresentaram produção de sedimento maior que a tolerância.

**Palavras-chaves:** hidrossedimentologia, SWAT, bacia hidrográfica do Rio Negrinho.



## ABSTRACT

The Rio Negrinho city has been suffering from the quantitative and qualitative modification of water due to replacement of native forests by pine tree reforestation and accelerated urbanization. The objective of the present study was, therefore, to spatially analyze hydrosedimentological processes in the Negrinho river basin – SC through the SWAT model. Hydrosedimentological monitoring, construction of spatial databases and table, determination of sub-basins, the model calibration and validation, statistical analysis, spatial assessment of water and sediment yield and verification of soil loss tolerance in each sub-basin were carried out. The values simulated with the model were compared with the observed data of discharge at two monitoring points and of sediment concentration at one point in the basin. The model performance was evaluated with the coefficient of Nash-Sutcliffe (NASH), the correlation coefficient ( $R^2$ ), the average error (MS) and coefficient of residual mass (CRM). The NASH values were from 0.48 to 0.61 for the discharge data and 0.43 for the sediment data. Analyzing the water balance of the basin the coefficient of variation of the monthly precipitation, evapotranspiration and flow were 23%, 20% and 30%, respectively. The water storage in the soil varied little throughout the year, showing its coefficient of variation of 8.7%. Comparing to soil loss tolerance with the sediment production data, it was shown that 11% of the basin area would have more sediment production than the tolerated value.

**Keywords:** hydrosedimentology, SWAT, Negrinho river basin.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo.....	40
Figura 3.2 - Fluxograma das fases do estudo de um modelo.....	44
Figura 3.3 – Mapa com as bacias experimentais do LabHidro.....	50
Figura 4.1 – Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho.....	56
Figura 5.1 – Localização da estação hidrossedimentológica.....	56
Figura 5.2 – Sensor de nível e turbidez.....	57
Figura 5.3 – Estação hidrossedimentológica.....	65
Figura 5.4 – Aparelho de medição de vazão ADP 3.0 Sontek.....	78
Figura 5.5 – Ciclo hidrológico.....	82
Figura 5.6 - Fluxograma do trabalho.....	84
Figura 6.1 – Modelo digital do terreno da BHRN.....	85
Figura 6.2 Mapa de uso e cobertura vegetal da BHRN.....	87
Figura 6.3 – Mapa do tipo do solos da BHRN.....	91
Figura 6.4 – Delimitação das sub-bacias na BHRN. ....	92
Figura 6.5 – Comparação entre dados observados e simulados de vazão (outubro de 2007 a novembro de 2008).....	94
Figura 6.6 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de vazão (outubro de 2007 a novembro de 2008).....	95
Figura 6.7 – Validação do modelo com dados de vazão (janeiro de 2009 a novembro de 2010).....	98
Figura 6.8 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de vazão (maio a novembro de 2010). ....	98
Figura 6.9 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de sedimento (maio a agosto de 2010).....	99
Figura 6.10 – Precipitação média mensal na BHRN.....	100
Figura 6.11 – Valores mensais de precipitação, vazão, evapotranspiração e armazenamento da água no solo nos meses do período analisado.....	101
Figura 6.12 – Distribuição da produção de água da BHRN em 2010.....	105
Figura 6.13 – Correlação entre precipitação, vazão total, escoamento superficial e produção de sedimento no meses de 2010 na BHRN. ....	105



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação entre tipo de sedimento, granulometria e transporte.....	30
Tabela 3.2 – Principais impactos ocasionados pelo sedimento.....	33
Tabela 3.3 – Lista de aplicações do SWAT no Brasil e no Mundo.	42
Tabela 3.4 – Descrição das bacias experimentais do Labhidro.....	45
Tabela 5.1 – Descrição dos quatro grupos hidrológicos do solo.....	60
Tabela 5.2 –Classes de $C_{soiltr}$ .....	72
Tabela 5.3 –Classes de $C_{perm}$ .....	72
Tabela 5.4 –Relação entre declividade do solo e valores de $P_{usle}$ ...	73
Tabela 5.2 – Parâmetros mensais requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.....	83
Tabela 6.1 – Distribuição da classes de uso e cobertura vegetal na BHRN.....	84
Tabela 6.2 - Distribuição do tipo dos solos na BHRN.....	86
Tabela 6.4 – Dados climáticos requeridos para o gerador climático.....	89
Tabela 6.6 – Valores modificados na calibração manual.....	93
Tabela 6.7 – Valores da análise do desempenho do modelo.....	93
Tabela 6.8 – Valores da análise do desempenho do modelo.....	94
Tabela 6.9 – Valores da análise do desempenho do modelo com dados diários.....	95
Tabela 6.10 – Valores modificados na calibração manual.....	97
Tabela 6.11 – Valores da análise do desempenho do modelo.....	98
Tabela 6.16 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da precipitação, vazão, armazenamento e evapotranspiração.....	100
Tabela 6.17 – Produção de sedimento e tolerância de perda do solo nas sub-bacias da BHRN.....	104



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	
$A$	Área da bacia	$\text{km}^2$
$\text{Área}_{urh}$	Área da unidade de resposta hidrológica	ha
$C_{soilstr}$	Código de estrutura do solo utilizado na classificação dos solos	
$C_{perm}$	Classe de permeabilidade do solo	
$CFRG$	Fator de fragmento grosseiro	
$CN$	Curva Número	
$CN_1$	Curva Número - condição seca (ponto de murcha)	
$CN_2$	Curva Número - condição de umidade média	
$CN_3$	Curva Número - condição úmida (capacidade de campo)	
$c_p$	Calor específico a pressão constante	$\text{MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$
$C_{USLE}$	Fator de cobertura e manejo	
$C_{USLE,aa}$	Fator manual médio para fator cobertura e manejo	
$C_{USLE,MN}$ e	Valor mínimo para o fator de cobertura e manejo	
$E$	Altura da taxa de evaporação $\text{mm.dia}^{-1}$	$\text{mm.d}^{-1}$
$E^*$	Média do evento observado no período da simulação	
$Em$	Evento monitorado	
$Es$	Evento simulado	
$ET_i$	Evapotranspiração	mm
$e_z$	Pressão de vapor da água no ar na altitude $z$	kPa
$e_z^o$	Pressão de saturação do vapor no ar na altitude $z$	kPa
$FC_{ly}$	Conteúdo de água na camada de solo na capacidade de campo	mm
$G$	Densidade de fluxo de calor do chão	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$H_{net}$	Radiação líquida	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$h_{wtbl}$	Altura do lençol	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
$i$	Passo de tempo	d
$i^*$	Intensidade da precipitação	$\text{mm.h}^{-1}$
$I_a$	Abstração inicial	mm

$K$	Fator de erodibilidade do solo	ton.ha <sup>-1</sup>
$K_{sat}$	Condutividade hidráulica saturada	mm.d <sup>-1</sup>
$l$	Comprimento do curso d' água	m
$L_{gw}$	Distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal	m
$L_{hill}$	Comprimento do declive	m
$LS$	Fator topográfico	m
$l_{slp}$	Comprimento da encosta	m
$M$	Parâmetro tamanho das partículas	m
$m_{areia}$	Porcentagem de areia muito fina	%
$mc$	Porcentagem de argila	%
$MO$	Porcentagem matéria orgânica	%
$m_{silte}$	Porcentagem de silte	%
$n$	Coefficiente de Manning	s.m <sup>-1/3</sup>
$n^*$	Número de eventos	
$NASH$	Coefficiente de Nash e Sutcliffe	
$orgC$	Porcentagem de carbono orgânico	%
$P$	Fator de praticas conservacionistas	
$P_i$	Precipitação total	mm
$Per_i$	Precipitação diária	mm
$Q_i$	Escoamento superficial	mm
$Q_{lat}$	Quantidade de água que escoa sub-superficialmente	mm
$q_{lat,i}$	Escoamento lateral	mm
$Q_{pico}$	Vazão de pico	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
$q_{ret,i}$	Escoamento de retorno	mm
$Q_{surf}$	Escoamento superficial total	mm
$Q_w$	Escoamento subterrâneo no canal principal	mm
$r_a$	Resistência aerodinâmica	s.m <sup>-1</sup>
$r_c$	Resistência de interceptação vegetal	s.m <sup>-1</sup>
$rsd_{surf}$	Quantidade de resíduo no solo	kg.ha <sup>-1</sup>
$S$	Parâmetro de retenção	mm
$SAT_{ly}$	Quantidade de água na camada de solo quando completamente saturado	mm
$SED$	Produção de sedimento	ton.d <sup>-1</sup>
$slp$	Declividade média da bacia	mm <sup>-1</sup>
$slp_{ch}$	Declividade média do curso d' água	mm <sup>-1</sup>
$SW$	Quantidade inicial de água no solo	mm
$SW_{ly}$	Conteúdo de água na camada do solo	mm
$SW_{ly,excess}$	Volume drenável de água na camada de	mm

	solo	
$SW_t$	Quantidade final de água no solo	mm
$t$	Tempo	dia
$t_{conc}$	Tempo de concentração na bacia	h
$t_{cs}$	Tempo de concentração do escoamento terrestre	h
$t_{cc}$	Tempo de concentração do escoamento no canal	h
$TT_{perc}$	Tempo de propagação na camada do solo	h
$w_{perc,ly}$	Quantidade de água que percola para a próxima camada	mm
$\Delta t$	Duração do passo de tempo	d
$\Delta$	Declividade da curva de saturação da pressão de vapor com a temperatura	
$\lambda E$	Fluxo de densidade do calor latente	$MJ.m^{-2}.d^{-1}$
$\phi_d$	Porosidade drenável da camada de solo	$mm.mm^{-1}$
$\gamma$	Constante psicrométrica	$kPa.^{\circ}C^{-1}$
$\rho_{ar}$	Densidade do ar	$kg.m^{-3}$



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
3.1	BACIAS EXPERIMENTAIS.....	25
3.2	PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	26
3.2.1	Desagregação e erosão .....	27
3.2.2	Transporte e depósito de sedimento .....	27
3.2.3	Tolerância de perda de solo.....	29
3.2.4	Os impactos ambientais dos processos hidrossedimentológicos.....	30
3.3	MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO.....	34
3.4	MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA .....	35
3.5	SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL –SWAT .....	38
3.6	ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA REGIÃO DA BHRN.....	41
<b>4.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>47</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	47
4.2	CLIMA .....	47
4.3	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA .....	49
4.4	SOLOS .....	49
4.5	USO E COBERTURA VEGETAL .....	51
<b>5.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
5.1	MATERIAIS .....	53
5.1.1	Estações de monitoramento hidrossedimentológico.....	53
5.1.2	ADP – Acoustic Doppler Profiler.....	55
5.1.3	Softwares.....	56
5.1.4	Material cartográfico e imagens de satélite.....	56
5.2	BANCO DE DADOS ESPACIAIS .....	57
5.2.1	Modelo Numérico do Terreno .....	57
5.2.2	Solos.....	57
5.2.3	Uso e cobertura Vegetal.....	59
5.3	DADOS DO MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO.....	60
5.3.1	Dados de nível e vazão .....	60
5.3.2	Dados de sedimento.....	61
5.3.3	Tolerância de perda de solo.....	62
5.4	DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT .....	62

5.4.1	<b>Fase terrestre do ciclo hidrológico.....</b>	<b>62</b>
5.4.2	<b>Fase de propagação do ciclo hidrológico.....</b>	<b>72</b>
5.5	<b>APLICAÇÃO DO SWAT .....</b>	<b>73</b>
5.5.1	<b>Delimitação das sub-bacias .....</b>	<b>73</b>
5.5.2	<b>Definição das URH.....</b>	<b>73</b>
5.5.3	<b>Dados Climáticos.....</b>	<b>73</b>
5.5.4	<b>Procedimentos gerais .....</b>	<b>75</b>
5.6	<b>CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO.....</b>	<b>77</b>
5.6.1	<b>Calibração e Validação.....</b>	<b>77</b>
5.6.2	<b>Análise de desempenho do modelo .....</b>	<b>77</b>
6.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
6.1	<b>DADOS DE ENTRADA.....</b>	<b>79</b>
6.1.1	<b>Dados Espaciais.....</b>	<b>79</b>
6.1.2	<b>Dados Tabulares: .....</b>	<b>86</b>
6.2	<b>CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO .....</b>	<b>88</b>
6.2.1	<b>Calibração – Vazão .....</b>	<b>88</b>
6.2.2	<b>Validação – Vazão.....</b>	<b>91</b>
6.2.3	<b>Calibração – Sedimento.....</b>	<b>94</b>
6.3	<b>ANÁLISE ESPACIAL DA DINÂMICA DA ÁGUA E SEDIMENTO NA BHRN .....</b>	<b>97</b>
7.	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>105</b>
8.	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>107</b>
9.	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A água é o principal agente do ciclo hidrológico, um fator indispensável para funcionamento do sistema biológico dos seres vivos e exerce papel importante no desenvolvimento socioeconômico da humanidade e preservação ambiental para as gerações futuras. Os processos hidrossedimentológicos ou erosivos estão intimamente vinculados ao ciclo hidrológico e compreendem a desagregação, o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia hidrográfica.

Esse processos ocorrem naturalmente. Porém, o manejo inadequado do solo pode acentuar tais processos, aumentando a quantidade de sedimento acumulada no exutório de uma bacia e conseqüentemente gerando problemas sócio-econômicos como dificuldade no tratamento de água e assoreamento de rios.

A quantidade de sedimento presente na água do rio pode alterar os parâmetros físicos da mesma como cor, turbidez, sabor e odor e também parâmetros químicos como concentração de nitrogênio e fósforo. Esses parâmetros são importantes para a sobrevivência dos organismos aquáticos bem como atividades econômicas. A cor, turbidez, sabor e odor são importantes parâmetros no padrão de potabilidade de água. Segundo Von Sperling (2005) o nitrogênio e fósforo são elementos importantes para o crescimento de algas, porém em altas concentrações podem conduzir a eutrofização.

A região do Alto Rio Negro que se localiza na divisa entre os estados do Paraná e de Santa Catarina sofre problemas sócio-ambientais em relação a água e ao sedimentos como assoreamento de rios, ocorrência freqüente de inundações, substituição da mata nativa pelo reflorestamento de pinus. Nesta região, o Laboratório de Hidrologia (LabHidro) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) desenvolve pesquisas analisando o balanço hídrico e sedimentológico em várias bacias experimentais. Uma dessas bacias é a Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho - BHRN localizada no município catarinense que tem o mesmo nome.

Nos últimos anos, o município de Rio Negrinho tem sofrido com eventos hidrológicos intensos, principalmente pela urbanização acelerada, impermeabilização do solo e ocupação das áreas de risco. Segundo Dalagnol (1999), os registros de ocorrências de inundações datam desde 1891, sendo as que deixaram mais prejuízo foram as de

1983 e 1992. Segundo Schoeffel (2004), em Rio Negrinho foram registradas 12 inundações severas.

A BHRN é o manancial da cidade, a estação de tratamento de água se localiza próxima à exutória da bacia. Conseqüentemente a quantidade de água e de sedimento são algumas preocupações da região, devido principalmente as etapas do tratamento de água e também com o assoreamento dos rios da bacia.

Outro aspecto importante da BHRN é que a Floresta de Araucária vem sendo substituída pela principal atividade econômica da região – o reflorestamento de pinus.

Visto isso, este estudo teve como objetivo monitorar e modelar os processos hidrossedimentológicos na BHRN e analisar a dinâmica da água e sedimento na bacia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a dinâmica da água e sedimento por meio do uso do modelo SWAT na bacia do Rio Negrinho – SC.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Construir banco de dados da bacia hidrográfica em termo de topografia, uso e classificação do solo, séries temporais de chuva, vazão e sedimentos;
- Calibrar e validar o modelo SWAT com dados de vazão para a bacia hidrográfica;
- Calibrar o modelo SWAT com dados de sedimento para a bacia hidrográfica;
- Analisar dinâmica da água e sedimento espacialmente bacia hidrográfica.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 BACIAS EXPERIMENTAIS

A definição de uma área de estudo ou planejamento é uma tarefa complexa, porém é comum definir a bacia hidrográfica (um espaço moldado pela natureza) como unidade de trabalho (Santos, 2004).

A bacia hidrográfica é uma unidade de trabalho, pois constitui em uma unidade que possibilita ter um ponto de controle do fluxo de matérias como solo, água, nutrientes e poluentes. Portanto, a bacia hidrográfica pode ser considerada como unidade ideal para o gerenciamento interligado dos recursos naturais.

A bacia hidrográfica é uma área definida topograficamente e fechada num ponto do curso de água, denominado exutório, onde toda a vazão afluente é descarregada. A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde ocorrem os processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos (Garcez e Alvarez, 1988; Tucci, 2004).

Segundo Tucci (2004), a bacia hidrográfica é um sistema físico onde a entrada é o volume precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório. Assim pode-se analisar o processo de transformação de chuva em vazão. Uma maneira de representar e quantificar graficamente esta transformação é a elaboração do hietograma (entrada) e hidrograma (saída).

Segundo Chang (2002), há cinco métodos para investigar a relação entre a água e a floresta. Eles são: bacias experimentais, abordagens montante-jusante, plots experimentais, análise regional e simulação. Fahey e Jackson (1997) afirmaram que, na avaliação dos impactos ambientais das atividades florestais, é mais adequado utilizar bacias experimentais.

As bacias experimentais são bacias hidrográficas instrumentalizada. Essas bacias contem equipamentos de medição instalados e possuem monitoramento contínuo de pelo menos uma das variáveis precipitação e vazão (nível).

O monitoramento hidrológico de bacias experimentais é de fundamental importância, pois permite: (1) construir um banco de dados hidrológicos que serão fundamentais nos estudos hidrológicos, (2) prever possíveis efeitos da alteração da vegetação, que pode ajudar os gerenciadores nas tomadas de decisão, e (3) apoiar os estudos ecológicos e ambientais (Hewlett *et al.*, 1969; Rodda, 1976).

A partir do monitoramento em bacias experimentais é possível estabelecer práticas adequadas para as diferentes atividades visando à manutenção da qualidade dos recursos hídricos (Câmara, 2004).

Toebe e Ouryvaev (1970) também citam que as bacias experimentais tem como objetivo: (1) Estudar os efeitos de mudanças culturais nos processos hidrológicos, tais como modificação no uso e cobertura do solo; (2) Prever os processos hidrológicos – com as bacias experimentais é possível testar e calibrar modelos hidrológicos e (3) Realizar pesquisa básica – estudos detalhados de processo físicos, químicos e/ou biológicos dentro do ciclo hidrológico.

No processo de escolha de uma bacia experimental a vegetação é um dos critérios. A vegetação da bacia experimental é regionalmente representativa na questão (Rodda, 1976).

A maior parte das bacias hidrográficas que possuem captação de água está localizada em áreas rurais. Estas bacias rurais são normalmente caracterizadas por diferentes usos do solo, entre os quais as atividades agrícolas, florestais e floresta nativa. Por isso, Bent (2001) enfatizou a importância do estudo hidrológico com bacias caracterizadas pela floresta nativa e plantadas.

### 3.2 PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

A bacia hidrográfica é tomada como a unidade de controle do ciclo hidrológico. Paralelo ao ciclo hidrológico, e totalmente vinculado, existe o ciclo hidrossedimentológico. O ciclo hidrossedimentológico é aberto, pois ao contrário das moléculas da água, o sedimento não voltará de onde vem (Bordas e Semmelmann, 2000).

Segundo Lopes (2008) os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos. Sendo a água um dos principais geradores do desprendimento de partículas de rochas e solos que irão contribuir para a produção de sedimentos da bacia. Vestena (2008) explica que os processos hidrossedimentológicos estão intimamente vinculados ao ciclo hidrológico e compreendem a desagregação, erosão, deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia hidrográfica.

### **3.2.1 Desagregação e erosão**

A desagregação é o desprendimento de partículas sólidas do meio do qual fazem parte, por meio de reações químicas, flutuações de temperatura, ações mecânicas ou outros fatores naturais (Bordas e Semmelmann, 2000).

A erosão pode ser entendida como o processo de desgaste e arrastamento da superfície da terra pela ação da água, vento, gelo, atividades humanas ou outros agentes naturais (Silva *et al.*, 2003). Para Bordas e Semmelmann (2000) a erosão é o início do processo de deslocamento das partículas sólidas da superfície do solo ou das paredes dos leitos dos rios.

Segundo Carvalho (1994), existem quatro tipos de erosão que podem se processar: (i) erosão hídrica superficial, causada pelo escoamento superficial; (ii) erosão eólica, provocada pelo vento; (iii) remoção em massa, provocada pela gravidade e pela saturação de água no solo e (iv) erosão fluvial, ocasionada pela ação das correntes dos rios. Neste trabalho foi analisada somente a erosão hídrica.

Segundo Pereira (2003) quando há a ruptura do equilíbrio existente no solo, devido principalmente as forças providas da chuva e do vento, ocorre a erosão hídrica. O autor tão cita que as condições do terreno interferem na intensidade do processo erosivo. Dentre essas condições mais importantes são: a declividade do terreno, capacidade de infiltração da água no solo, à distância percorrida pelo escoamento superficial, a rugosidade superficial, a resistência do solo à ação erosiva da chuva e a porcentagem de cobertura do solo existente à época da ocorrência da chuva.

Segundo Bertoni (1999) os fatores que influenciam a erosão são: 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.

### **3.2.2 Transporte e depósito de sedimento**

O transporte de sedimento é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, que fornecem material que, por sua vez, dependem da energia do fluxo para serem transportados (Santos *et al.*, 2001).

Segundo Carvalho (1994), as forças que atuarão no sedimento podem mantê-lo em suspensão ou no fundo do rio. Esta situação está em função da (1) características das partícula - tamanho, peso e forma; e (2) propriedades do escoamento – laminar ou turbulento, velocidade da corrente, obstáculos do leito entre outros.

Portanto o transporte e depósito dos sedimentos dependem do peso da partícula. As partículas mais pesadas são deslocadas sobre o fundo por rolamento, deslizamento ou saltos curtos. As partículas mais leves são descoladas em suspensão (Figura 3.1). Assim o depósito irá ocorrer quando a partícula tiver uma parada total do seu movimento.

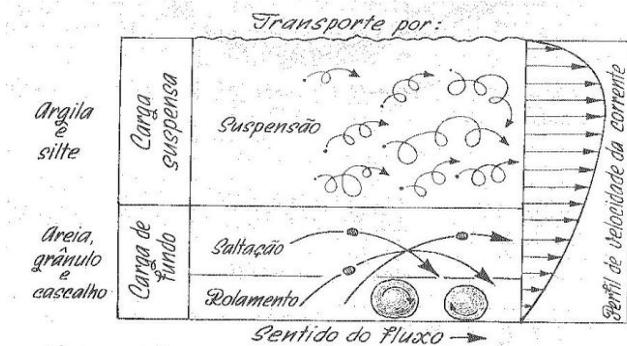


Figura 3.1 - Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo. (FONTE: Carvalho, 1994)

A Tabela 3.1 mostra a relação do tipo de sedimento e granulometria da partícula com o transporte.

Tabela 3.1 - Relação entre tipo de sedimento, granulometria e transporte.

Material	$\phi$ (mm)	Transporte
Argila	$0 < \phi < 0,002$	Em suspensão
Silte	$0,002 < \phi < 0,06$	Em suspensão
Areia	$0,06 < \phi < 2,0$	Em suspensão, rolamento, arraste e/ou saltação
Pedregulho	$2,0 < \phi < 60,0$	Rolamento, arraste e/ou saltação

$\phi$  = diâmetro da partícula.

(FONTE: Vestena, 2008)

Segundo Dickinson e Collins (1998), a quantidade de sedimento exportado pela bacia é geralmente pequena se comparada à quantidade mensurada ou estimada de solo erodido na bacia, devido grande parte dos mesmos ficarem depositados na própria bacia, nas bases dos declives, nos fundos de vales, nos canais de drenagem e nas áreas de inundações.

### **3.2.3 Tolerância de perda de solo**

Com a erosão do solo há uma remoção das camadas superficiais do solo. Afim de tentar estimar até que nível está remoção não afeta as condições de fertilidade do solo foi definida a tolerância de perda do solo.

A tolerância de perda de solo é termo novo. Johnson (1987) cita que perda de solo foi tratada com destaque em 1956 em uma conferência do Serviço de Pesquisa Agrícola, Serviço de Conservação do Solo (SCS) e membros do corpo docente de algumas universidades. Posteriormente um workshop do SCS utilizou as ideias dessa conferência e as sintetizou em três itens.

- Perda de solo deve ser reduzida para um nível que irá garantir uma profundidade adequada do solo favoráveis para a colheita e produção de madeira durante um longo período de tempo
- Perda de solo deve ser inferiores e não causar assoreamento nos cursos de água, valas de drenagem e de estrada.
- A perda dos nutrientes para plantas não pode ser excessiva.

Wischmeier e Smith (1978) definiram como nível máximo de erosão do solo que mantenha nível de produtividade das culturas, econômica e indefinidamente. Para Smith e Whitt (1948), o objetivo final da conservação do solo era manter indefinidamente sua fertilidade e capacidade produtiva. Qualquer perda de solo que permite a um declínio da fertilidade deve ser evitada.

Para Sparovek e Van Lier (1997) a remoção da cobertura natural e sua substituição por culturas retira a proteção do solo contra a ação da chuva e do vento. Assim a taxa de erosão aumenta e pode-se tornar maior que a taxa de aumento de profundidade do solo, resultando em perda de profundidade do solo.

Para Bertoni e Lombardi (1999) a tolerância de perda de solo é a quantidade de terra que pode ser perdida por erosão, expressa em toneladas por unidade de superfície e por ano, mantendo ainda o solo elevado nível de produtividade por longo período de tempo. Portanto essa tolerância reflete a perda máxima de solo que pode admitir, com um grau de conservação tal que mantenha uma produção econômica em futuro previsível com os meios técnicos atuais.

Stamey e Smith (1964a) sugerem um modelo conceitual para calcular a tolerância de perda de solo. Os mesmo autores também estabeleceram um padrão pratico de tolerância de perda para qualquer solo (Stamey e Smith, 1964b).

No Brasil Bertoni e Lombardi (1975) realizaram uma tentativa de estabelecer padrões de tolerância de perda para solos do estado de São Paulo considerando sua profundidade e algumas propriedades físicas. Galindo e Margolis (1989) estudando solos do estado de Pernambuco, incluíram nestes critérios o teor de matéria orgânica e o grau de permeabilidade do solo.

Bertol e Almeida (2000) aplicaram e compararam dois métodos de Bertoni e Lombardi (1999) e o método de Galindo e Margolis (1989) para estimar tolerância de perda dos principais solos no estado de Santa Catarina. Os valores médio da tolerância de perda de solo estimados para os solos analisados no trabalho foi de 8,0 ton.ha/ano.

### **3.2.4 Os impactos ambientais dos processos hidrossedimentológicos**

A qualidade da água de um rio é determinada principalmente pela quantidade de sedimento presente nele. Ward e Trimble (2004) destacam que o sedimento é o mais significativo de todos os poluentes, por sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes.

O deslocamento dos sedimentos carregados pelo escoamento superficial e outros processos, embora esporádicos, “acabam provocando o remanejo e a redistribuição pela bacia de ponderáveis massas de partículas sólidas, a ponto de poderem eventualmente alterar o ciclo hidrológico e, certamente, afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos” (Bordas e Semmelmann, 2000).

Os processos hidrossedimentológicos são processos naturais, mas podem ser intensificados devido principalmente a agentes antrópicos. Segundo Mota (1995), as práticas agrícolas inadequadas, a ocupação

incorreta das áreas, alterações no escoamento natural das águas, movimentos de terra e impermeabilizações de terrenos são principais causas da erosão acelerada.

A qualidade da água de mananciais que compõem uma bacia hidrográfica está relacionada com o uso do solo na bacia e com o grau de controle sobre as fontes poluidoras (Tucci, 1998). Borbas e Semmelmann (2000) explicaram que as atividades antrópicas podem alterar esses processos e que destacam-se o desmatamento, a agricultura, a urbanização, a mineração, a construção de estradas, a retificação e o barramento dos cursos fluviais. De modo geral a carga de sedimento em suspensão nos rios é extremamente sensível às mudanças de uso da terra na bacia de drenagem, independente destas ocasionarem ou não modificação no regime fluvial (Reid *et al.*, 1997).

Para Coiado (2003) a degradação das bacias hidrográficas pela ação antrópica, associada aos fenômenos naturais de precipitação, como os verificados nas regiões tropicais, resulta, num curto espaço de tempo, em quantidades de sedimentos, muito maiores que aquelas produzidas em centenas de anos em condições de equilíbrio natural. Deste modo, é essencial considerar a taxa de sedimento transportada como uma variável a ser equacionada em projetos de barragens, canais, reservatórios de acumulação ou qualquer obra hidráulica.

Portanto o manejo inadequado do solo pode acentuar tais processos, aumentando a quantidade acumulada no exutório de uma bacia e gerando problemas sócio-econômicos, como: (1) redução da qualidade da água pela presença de sedimentos e suas associações com agrotóxicos e nutrientes – dificultando no tratamento de água; (2) assoreamento – diminuindo a vida útil de barragens; (3) enchentes e (4) inundações provocadas por alterações no regime fluvial e que afetam a fauna, a flora e as atividades humanas (Silva *et al.*, 2003).

Neste contexto, pode-se dizer que a compreensão dos processos hidrossedimentológicos é fundamental para analisar a dinâmica da água e sedimento na bacia hidrográfica e verificar como as transformações realizadas no ambiente podem causar impactos sócio-ambientais. Perante a importância desses processos Vestena (2008) sintetizou os principais problemas ocasionados pelos sedimento, com base em Carvalho (1994) (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Principais impactos ocasionados pelo sedimento.

Principais Impactos ocasionados pelo sedimento	
Aspectos Negativos	
E	Destruição das nascentes.
R	Aumento do risco de desertificação.
O	Remoção da camada fértil do solo.
S	Desprendimento e escorregamentos de terras e tabules.
Ã	Alteração das condições de escoamento da água na superfície e nas
O	calhas dos rios.
	Desbarrancamentos em rios modificam a calha e provocam depósito no leito.
	Produção de sulcos em área indesejáveis.
	Comprometimento de estruturas.
T	As partículas em suspensão degradam o uso consumptivo da água,
R	aumento o custo de tratamento.
A	O sedimento degrada a água especificamente para abastecimento,
N	recreação, consumo industrial, resfriamento, em hidroelétricas e
S	vida aquática.
P	O aumento da turbidez na água reduz a estética do curso d'água.
O	O sedimento em suspensão impede a penetração da luz e calor,
R	reduzindo a atividade da fotossíntese necessária á salubridade os
T	corpos d'água.
E	
T	Quando aumenta o sedimento fino em suspensão, diminui a
R	população de peixes nos rios.
A	O sedimento atua como portador de poluentes, tais como nutrientes
N	químicos, inseticidas, herbicidas, metais pesados, bactérias e vírus.
P	A carga sólida provoca perturbação na forma do canal.
O	O sedimento do leito dos rios, mesmo ainda em movimento, mas
R	com redução das profundidades, pode prejudicar a navegação ou
T	e elevar o nível de água, provocando enchentes locais mais
E	frequentes.
	Colisão de areia em suspensão produz abrasão em turbinas,
	comportas e maquinam diversas, quando as partículas se movem
	em alta velocidade, produzindo redução de eficiência ou
	inutilizando a peça.
	Durante enchentes, as pedras e seixos rolados danificam encontros
	e pilares de ponte, suporte de fundações de cais e canais pavimentos
	e outros objetivos em sua passagem.

D E P Ó S I T O	Assoreamento de reservatórios, reduzindo o volume d'água, a regularização do curso d'água, a vida útil do lago e prejudicam a navegação pela redução da profundidade ou aumentam os riscos de enchentes pela redução da capacidade do canal.
	Em cursos d'água assoreados, a água em nível mais elevado provoca erosão de margens.
	Reduzir em alguns locais a drenagem superficial
	Sedimentos depositados em canais de irrigação e de drenagem, em canais de navegação e de escoamento de enchentes, em reservatórios e portos, em ruas, estradas e edificações não somente criam transtornos mais também impõem altos custos públicos de serviços de manutenção.
	Quanto o sedimento se deposita em áreas produtivas, diminui ou paralisa o crescimento das plantas.
	O sedimento fino depositado com lama e sem nutrientes afasta peixes e microorganismo.
	Os sedimentos depositados em diques de drenagem acabam tirando a permeabilidade do solo, além de permitir o crescimento de plantas, prejudicando o escoamento.
	Inundações com sedimento grosso e/ou coloidal reduzem a fertilidade dos solos.
<b>Aspectos Positivos</b>	
	O sedimento em suspensão reduz a ação erosiva da água no escoamento dos rios.
	O sedimento atua como redutor de outro poluente, melhorando dessa forma a purificação da água.
	Permite que seja um meio no qual as relações químicas podem ocorrer e um meio condutor de microorganismo ou matéria orgânica diversa que melhora a fauna fluvial.
	Os depósitos formados nos campos podem constituir camada superior de solo fértil se tiver nutrientes. Assim como sedimentos com matéria fértil natural podem ser recuperados e utilizados benéficamente em jardins, canteiros e outras pequenas áreas de plantação.
	Sedimentos podem ser utilizados em aterros de áreas alagadas ou terrenos baixos.
	Sedimentos de granulométrica adequada são usados em construção.

(FONTE: Vestena, 2008).

### 3.3 MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

O monitoramento dos processos hidrossedimentológicos é o registro contínuo dos dados em um intervalo de tempo. Com este monitoramento pode ser formado um banco de dados com séries contínuas dos processos monitorados.

Com o monitoramento de alguns processos hidrossedimentológicos como precipitação, vazão e concentração de sedimento pode se entender melhor o comportamento desses processos. Entretanto o comportamento somente será bem representando se houve um intervalo de medição adequado para o tamanho da bacia e outras características da bacia.

O monitoramento da precipitação pode ser feita com um pluviômetro ou pluviógrafo (Santos, 2001). A medição de vazão e sedimento é um pouco mais trabalhosa. A vazão pode ser determinada pela curva-chave para médias e grandes vazões e a concentração de sedimentos em suspensão pode ser determinada por coleta de amostras representativas ou equações que calculam a descarga sólida em suspensão.

A curva-chave relaciona a vazão com o nível da água. O nível da água pode ser monitorado com a leitura das régua linimétricas por um observador e/ou por um sensor de nível ou sensor de pressão instalado na secção já pré selecionada (Santos, 2001). A vazão deve ser medida em diversos níveis da água para que a relação entre nível-vazão seja mais representativa.

A concentração de sedimento também deve ser medida em períodos chuvosos e secos, pois a concentração de sedimento é muito sensível a sazonalidade e também difere de evento para evento. De acordo com Carvalho (1994) de 70% a 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água ocorrem no período de chuvas, principalmente durante as fortes precipitações. Por isso em períodos chuvosos o monitoramento deve ser intensificado.

As concentrações de sedimento e as vazões são influenciadas pela intensidade das precipitações e por sua distribuição; pela taxa de escoamento superficial; pelas distâncias percorridas; pelo armazenamento/mobilização dos sedimentos disponíveis e pela taxa de sedimentação (Williams, 1989).

Portanto o monitoramento hidrossedimentológica deve ser contínuo e mais longo possível. Para que possa contemplar as sazonalidades e se tornar mais representativo para a área de estudo.

### 3.4 MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

Dooge (1973) definiu sistema como qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referencia inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação.

Segundo Tucci (1998) o modelo é a representação do comportamento do sistema. Segundo o mesmo autor os modelos usualmente são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos.

Em um modelo ou sistema os fenômenos são os processos físicos que causam alteração no estado, como por exemplo, precipitação, evaporação e infiltração. As variáveis descrevem quantitativamente um fenômeno e podem variar no espaço e no tempo. Os parâmetros caracterizam o sistema, como a área da bacia e a rugosidade do canal.

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. Como por exemplo a analogia entre as equações do escoamento hidráulico e de um circuito elétrico permite a representação do sistema hidráulico por um circuito elétrico, proporcionando assim um custo mais reduzido.

Os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema, através de equações matemáticas. Os modelos matemáticos podem ser facilmente mutáveis alterando sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade de resposta.

A modelagem matemática consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação de sistema real (Pessoa *et al.*, 1997; Kobiyama e Manfroi, 1999; Machado, 2002).

Segundo Tucci (1998) os modelos matemáticos podem ser classificados:

Continuos e discretos – Os modelos contínuos representam os processos como contínuos no tempo, e os discretos se dão em intervalos. Os sistemas hidrológicos são contínuos e podem ser representados por modelos discretos.

Concentrado e distribuído – Um modelo distribuído apresenta suas variáveis variando no espaço e no tempo, já um modelo concentrado não leva em conta a variabilidade espacial.

Estocástico e determinístico - a principal diferente entre estocástico e determinístico é o conceito de probabilidade. Se na formulação do modelo existe a lei da probabilidade o modelo é dito estocástico, se não é determinístico.

Conceitual e empírico - quando um modelo considera os processos físicos é dito conceitual. Os modelos empíricos são aqueles que ajustam os valores simulados aos observados não considerando os processos físicos.

A desvantagem do modelo conceitual é 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.

Mesmo assim os modelos matemáticos são amplamente utilizados por possuírem varias vantagens, como: facilidade de execução, baixo custo, rápida obtenção dos resultados, permite a simulação de experimentos inviáveis na pratica e que facilitam a previsão de fenômenos e processos naturais, possibilitando a elaboração de estudos como Estudo de Impacto Ambiental (EIA), Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) e simulação de cenários futuros. (Kobiyama e Manfroi,1999).

Os modelos matemáticos também são largamente utilizados pois o monitoramento de todos os processos hidrológicos requer um custo muito elevado na aquisição de equipamentos e sua posterior manutenção. Portanto na tentativa de mensurar os processos hidrossedimentológicos é possível utilizar do monitoramento de alguns desses processos e com o auxilio da modelagem é possível simular cenários reais da dinâmica na bacia.

Os modelos podem ser definidos como uma apresentação do sistema (ou objeto) tanto estático quanto dinâmico (Kobiyama e Manfroi 1999). Para Ford (1999) os modelos substituem um sistema real quando se tornam mais fácil que o sistema real.

De acordo com Christofletti (1999) a modelagem envolve um conjunto de técnicas com a finalidade de quadro simplificado da complexidade do mundo. Este conjunto de técnicas é teórico e compõem uma abstração da realidade a qual ajusta e orienta para experiências empíricas.

A utilização de um modelo é chamada de simulação. A simulação em geral é dividida em três fases: a estimativa ou ajuste, verificação e previsão. A estimativa ou ajuste é a fase onde os parâmetros devem ser determinados. Posteriormente a verificação é a simulação do modelo com os parâmetros já determinados e é onde se há a verificação do ajuste realizado. A previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de suas respostas a diferentes entradas (Tucci, 1998).

A estimativa dos parâmetros do sistema de uma bacia hidrográfica, por exemplo, dependem da disponibilidade de dados históricos, medições de amostras e determinação das características físicas das bacias.

Na verificação, modelo já está ajustado, é comparado com outros dados para verificar se o modelo está representando a realidade da bacia. Assim com um modelo ajustado (calibrado) e verificado (validado) é possível utilizar para representar um sistema (cenário) ainda desconhecido.

Pela natureza da simulação, quanto mais sofisticado o modelo, mais calibrações são necessárias. A calibração do modelo é sempre feita através de comparação dos dados obtidos pelo monitoramento com os dados simulados no modelo (Hopmans, 2006). Assim, a modelagem e o monitoramento não se confrontam, passando a serem métodos científicos mutuamente complementares, efetuados sempre paralelamente (Kobiyama e Manfroi, 1999). O sucesso da modelagem e da simulação depende da qualidade do monitoramento. Não há um bom modelo sem o uso de dados obtidos do fenômeno monitorado.

Conforme Tucci (1998) a ciência desenvolveu modelos hidrológicos como ferramenta para melhorar o entendimento do comportamento em uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Segundo Machado (2002), a modelagem permite compreender melhor o sistema e prever situações futuras (cenários) para direcionar as ações de decisão.

A Figura 3.2 mostra um fluxograma das fases do estudo de um modelo.

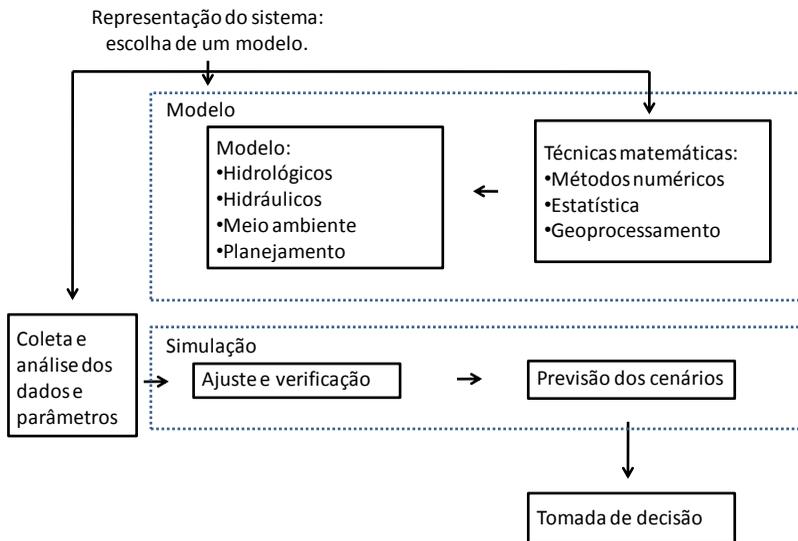


Figura 3.2 - Fluxograma das fases do estudo de um modelo (modificado Tucci, 1998).

### 3.5 SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL –SWAT

O conhecimento da dinâmica e da qualidade da água é de fundamental importância para estudos na bacia hidrográfica. Por isso o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi desenvolvido no início da década de 90 pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e *Texas A&M University* com a finalidade de auxiliar os gestores de recursos hídricos na avaliação de impactos de práticas de manejo do solo. Este modelo simula a dinâmica de água, sedimento e agrotóxico em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas. Neitsch *et al.* (2005) mostram que o SWAT permite analisar espacialmente uma bacia hidrográfica com diversos tipos de solos, usos do solo e condições de manejo sobre longos períodos de tempo.

A modelagem hidrossedimentológica é uma importante ferramenta para analisar os processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas com custo baixo. Isto é possível devido ao monitoramento, pesquisa bibliográfica e aplicação de testes para determinação de parâmetros.

A utilização do modelo SWAT no Brasil iniciou-se expressivamente de 2000. Lopes e Kobiyama (2009) mostram que o modelo foi aplicado com dados observados de vazão e sedimento, com algumas contribuições modestas na parte de nutrientes e pesticidas.

Garbossa *et al.* (2011) apresenta um revisão de 1999 a 2010 dos estudos utilizando o SWAT no Brasil.

Nos últimos anos o modelo SWAT tem apresentado outras aplicações. A Tabela 3.3 mostra as últimas aplicações do SWAT no Brasil e no mundo e algumas aplicabilidades diferenciadas do modelo, cenários realistas, monitoramento de outros processos hidrossedimentológicos e acoplamento com outros modelos.

Tabela 3.3 – Lista de aplicações do SWAT no Brasil e no Mundo

Autor	Ano	País	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	Aplicação e eficiência do modelo			Observação
				Água	Sedimento	Nutriente	
Baltokoski	2010	Brasil	52,97	x(NASH <sub>dia</sub> =0,7)		Fósforo (NASH=1)	Cenário de adição de fósforo como fertilizante
Blainski <i>et al.</i>	2010	Brasil	5,8	x(NASH <sub>mês</sub> =0,7)			Cenário de diferentes manejos de culturas anuais
Bonumá <i>et al.</i>	2011	Brasil		x(NASH <sub>dia</sub> =0,55)	x(NASH <sub>mensal</sub> =0,77)		
Easton <i>et al.</i>	2010	África	174.000	x (NASH <sub>dia</sub> =0,53-0,92) (R <sup>2</sup> =0,74-0,92)	x (NASH <sub>dia</sub> =0,6-0,8) (R <sup>2</sup> =0,64-0,74)		SWAT-WB
Jeong <i>et al.</i>	2010	EUA	1,94	x (NASH <sub>15min</sub> =0,63-0,87) (NASH <sub>hora</sub> =0,6-0,9) (NASH <sub>dia</sub> =0,65-0,72)			Aplicação do modelo subsidiário
Lelis e Calijuri	2010	Brasil	54				Monitoramento de escoamento superficial e perda de solo em bacias experimentais
Lino	2009	Brasil	1000	x(NASH <sub>dia</sub> =0,5)			Bacia hidrográfica com reservatório
Lopes	2008	Brasil	0,2-8,9	x (NASH <sub>dia</sub> =-4,4-0,5)			Aplicação do SWAT em microbacias
Malutta e Kobiyama	2011	Brasil	303	x(NASH <sub>dia</sub> =0,61)			Estudo de inundação com SWAT
Souza	2010	Brasil	6.000	x (NASH <sub>dia</sub> =0,84) (NASH <sub>mês</sub> =0,77)			SWAT-SEBAL
Song <i>et al.</i>	2011	China	1850	x (NASH <sub>dia</sub> =0,5)	x(NASH <sub>dia</sub> =0,5)		Comparação do escoamento de base do SWAT e com outro modelo

### 3.6 ESTUDOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA REGIÃO DA BHRN.

O LabHidro realiza diversos estudos hidrológicos e sedimentológicos nas bacias experimentais na região da bacia do Alto Rio Negro (BHARN) onde está inserida a BHRN, com auxílio da Empresa de Reflorestamento Battistela, Companhia Volta Grande de Reflorestamento (CVG), SAMAE e Prefeitura de Rio Negrinho.

Os estudos realizados se sintetizam em monitoramento dos processos hidrológicos e sedimentológicos e modelagem com vários modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos concentrados e distribuídos.

A Figura 3.3 mostra o mapa com as bacias experimentais e as estações de monitoramento instaladas, e Tabela 3.3 mostra a descrição de cada bacia.

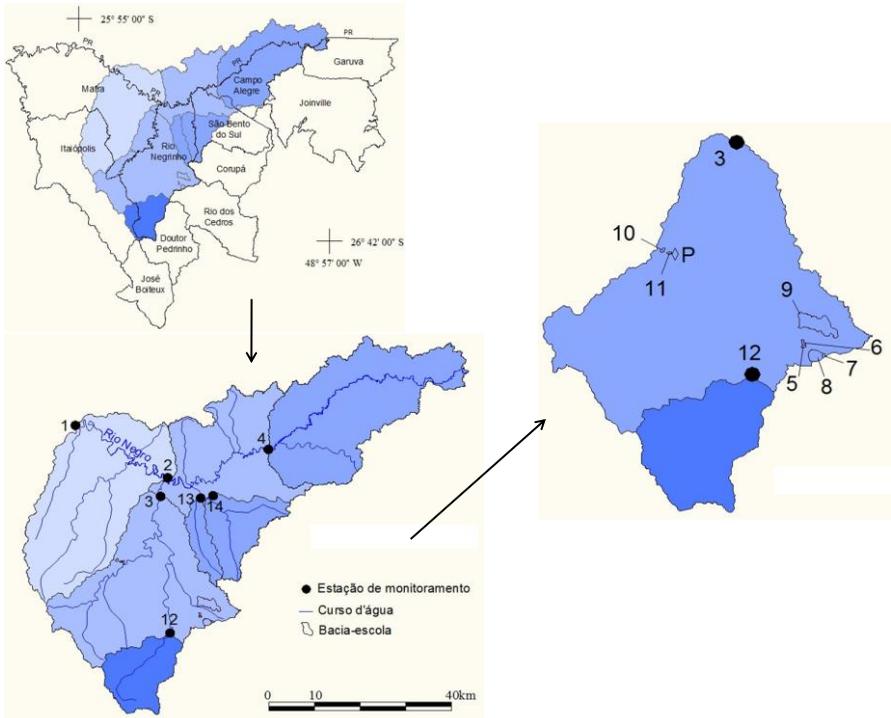


Figura 3.3 – Mapa com as bacias experimentais do LabHidro.

Tabela 3.4 – Descrição das bacias experimentais do Labhidro.

<b>Bacias</b>	<b>Características</b>	<b>Responsável</b>	<b>Tamanho</b>
Rio Negro (1)	Mista - Código No. 65100000	COPEL	345.200 ha
Rio Preto do Sul (2)	Mista - Código No. 650950000	ANA	261.200 ha
Avencal (3)	Mista - Código No. 65094500	ANA	101.100 ha
Fragosos (4)	Mista - Código No. 65090000	COPEL	80.000 ha
P1(5)	Pinus sem corte	UFSC	10,2 ha
P2(6)	Pinus com corte	UFSC	20,7 ha
A(7)	Agricultura	UFSC	16,1 ha
M1(8)	Mista 1	UFSC	257,9 ha
M2(9)	Mista 2	UFSC	856,6 ha
N2(10)	Mata nativa 2	UFSC	25,7 ha
N1(11)	Mata nativa 1	UFSC	9 ha
(12)	Represa Volta-Grande	CVG	---
(13)	Rio dos Bugres	UFSC	---
(14)	SAMAE	UFSC	19,5ha
<b>Estação</b>	<b>Características</b>	<b>Instituição</b>	<b>Tamanho</b>
Bituva (P)	Pluviógrafo	UFSC	---

Chaffe (2009) e Chaffe *et al.* (2010) investigaram o processo chuva-vazão, com ênfase no processo de interceptação, da bacia P1 através de monitoramento precipitação total, precipitação interna e escoamento de tronco e modelagem hidrológica através do Tank Model. Com o monitoramento foi possível identificar que na bacia P1 a precipitação interna, escoamento de tronco e perda por interceptação correspondem a 71,2%, 7,4% e 21,4% da precipitação total, respectivamente.

Na mesma bacia Santos (2010) realizou o estudo do mecanismo de geração de escoamento e conectividade hidrológica com base no monitoramento de precipitação, precipitação interna, escoamento de tronco, tensão da água do solo, nível do lençol freático, vazão e sedimentos em suspensão e modelagem através do TOPMODEL nesta bacia.

Grando *et al.* (2009) e Grando (2011) realizou o diagnóstico hidrossedimentológico na bacia M1 através do monitoramento das perdas de solos com uso de parcelas experimentais, e através do modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) e do modelo de Montgomery e Dietrich (1994) foi possível identificar o processo erosivo nesta bacia. As perdas de solos monitoradas por meio das parcelas experimentais apresentaram média anual, para os dois anos de monitoramento, entre 0,013 e 0,053 ton.·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>.

Maciel *et al.* (2009) e Maciel (2010) realizaram estudo em uma fazenda de reflorestamento de pinus, localizada na fazenda Cerro Azul inserida na bacia do Rio Preto do Sul (2), e teve como objetivo a caracterização física e mecânica do solo utilizado na construção e adequação de estradas não pavimentadas com a análise geotécnicas e hidrossedimentológica. Com este estudo foi possível dimensionar as bacias de acumulação e identificar os trechos de estradas mais críticos.

Também na bacia Rio Preto do Sul, Mota (2010) avaliou a dinâmica da água na zona vadosa em diferentes usos do solo (pastagem, reflorestamento, floresta nativa e agricultura) com a aplicação do modelo HYDRUS-1D. Os dados estimados de condutividade hidráulica saturada apresentaram entre 10<sup>-1</sup> e 10<sup>-2</sup> cm/s menores que aqueles medidos em laboratório.

As aplicações do modelo SWAT, utilizado neste trabalho, já foram realizados em diversas bacias experimentais. Lino (2009) fez a análise hidrossedimentológica através do modelo SWAT na bacia Rio Preto do Sul e verificou através de cenários de mudança de uso e cobertura vegetal o comportamento hidrossedimentológico da bacia. O valor de *NASH* para dados de vazão foi de 0,5 e desvio padrão de -4,96. Como um dos resultados do trabalho 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).

Lopes *et al.* (2008) e Lopes (2008) analisou a produção de água e sedimento através do modelo SWAT nas bacias P1, P2, M1, M2, N1, N2 e A. Neste trabalho foi abordado a aplicabilidade do modelo em bacias pequenas e teve valores de *NASH* variam de -4,4 a 0,5. Na bacia M2 foi evidenciada subbacias com produção de sedimento com até 200kg/ha.mês.

Na BHRN também foram realizados alguns estudos. Estudando o processo de evapotranspiração Uda (2010) e Uda *et al.* (2011)

realizaram, por meio de imagens NDVI, a análise da evapotranspiração potencial distribuída na BHRN. A evapotranspiração média distribuída na bacia do rio Negrinho, de acordo com o uso e ocupação do solo atual, está entre 2,97 a 5,09mm.d<sup>-1</sup>.

Visto que na cidade de Rio Negrinho tem sofrido com eventos hidrológico extremos, principalmente inundações. Goerl (2010), Macedo (2010) e Giglio (2010) realizaram análise das inundações na BHRN, mais especificamente na parte urbana na cidade de Rio Negrinho.

Através do monitoramento chuva-vazão e do modelo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) Macedo (2010) fez o estudo hidrológico da BHRN e Goerl (2010) aplicou duas metodologias para o mapeamento das áreas de risco de inundações na cidade de Rio Negrinho. Uma utilizando o modelo HEC-HMS e utilizando índices de perigo, vulnerabilidade e risco.

Giglio (2010) realizou a caracterização das áreas de inundações da cidade através do monitoramento chuva-vazão e do modelo Tank Model. A autora caracterizou as duas maiores inundações da cidade (1983 e 1992). A estimativa da área inundada foi próximo a 82 ha e vazão de pico das inundações em torno de 56 m<sup>3</sup>/s.



## **4. ÁREA DE ESTUDO**

### **4.1 LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA**

A BHRN (308 km<sup>2</sup>) está contida nos municípios de Rio Negrinho e São Bento do Sul no planalto norte do Estado de Santa Catarina (Figura 4.1).

### **4.2 CLIMA**

Na classificação de Köppen o clima do planalto norte Catarinense é Cfb (clima temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verão fresco). A temperatura média anual varia entre 15,5 a 17,0°C, sendo que as temperaturas médias das máximas variam de 26,6 a 24°C e mínimas de 10,8 a 11,8°C. A precipitação anual média é de 1720 mm, com máxima e mínima de 2500 e 1082mm, respectivamente. A umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (EPAGRI/CIRAM, 2009).

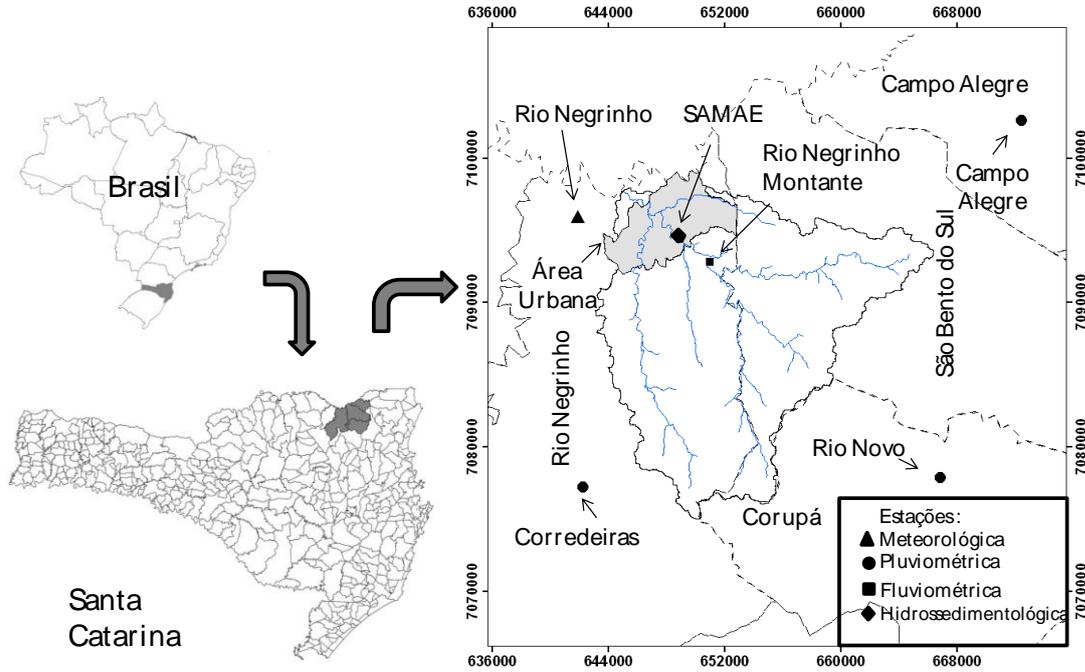


Figura 4.1 – Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho.

### 4.3 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

O substrato da BHRN é formado por rochas sedimentares pertencentes aos Grupos Itararé, do Sub-Grupo Tubarão. As formações pertencentes a este grupo são: Formação Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul (SANTA CATARINA, 1986). Abaixo está descrito o o resumo das descrições dessas três formações de EMBRAPA (1998).

- A formação Campo do Tenente é representa uma seqüência glacial e fluvio-glacial, constituída predominantemente de argilitos castanho-avermelhados, ritmitos e diamictos com matriz arenosa e arenitos finos e médios. A área aflorante restringe-se a uma pequena faixa do município de São Bento.
- A formação Mafra, é uma seqüênciaflúvio-marinha com influência glacial, composta predominantemente por arenitos finos a grosseiros, de coloração esbranquiçada, amarelada e avermelhada e, secundariamente por diamictitos de matriz arenosa e argilosa, conglomerados, ritmitos, argilitos e varvitos.
- A Formação Rio do Sul é constituída na parte inferior por folhelhos e argilitos cinza-escuros. Na parte superior aparecem diamictos acinzentados, com matriz arenosa, intercalados com arenitos. Estes estão recobertos por argilitos, folhelhos várvidos, ritmitos, e siltitos.

A BHRN está inserida no Patamar Oriental da Bacia do Paraná, mas especificamente dentro do Patamar de Mafra. As características geomorfológicas são relevo com superfície regular, quase plana, de baixa energia de relevo. De modo generalizado, o relevo é individualizado como um patamar intermediário, constituído predominantemente por uma superfície colinosa (SANTA CATARINA, 1986).

### 4.4 SOLOS

Na BHRN predominam-se Cambissolos em quase toda a sua extensão, apresentando a pequena porção com Gleissolos nas nascentes da parte oeste da bacia.

Os Cambissolos compreendem os solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente bastante heterogêneo, em relação à cor, espessura e textura, e em respeito à atividade química da fração argila e saturação por bases. Este horizonte é caracterizado pelo baixo gradiente textural, pela média a alta relação silte/argila e pela

presença de minerais primários de fácil decomposição. Está situado imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, ou sob horizonte H turfoso, possuindo seqüência A, Bi, C ou H, Bi, C. Estes são derivados de materiais relacionados a rochas de composição e possuem natureza muito variável (EMBRAPA, 2004; SANTA CATARINA 1986).

Os cambissolos são solos com certo grau de evolução, porém, não o suficiente para decompor completamente minerais primários de mais fácil intemperização, como feldspato, mica, hornblenda, augita e outros. Estes solos não possuem acumulações significativas de óxidos de ferro, húmus e argilas que permitam identificá-los como possuindo horizonte B textural (EMBRAPA, 2004).

Os Cambissolos característicos da região são os (i) Cambissolo hálico Tb A moderado, textura argilosa; (ii) Cambissolo hálico Tb A moderado, textura média; (iii) Cambissolo Háptico Tb A proeminente com texturas argilosa. O resumo desses de EMBRAPA (2004) são a seguir:

(i) Cambissolohálico Tb A moderado, textura argilosa: alta saturação por alumínio trocável, argila de baixa atividade (Tb), horizonte A do tipo moderado com textura argilosa. O horizonte A tem espessura de 15 a 25 cm de bruno-amarelo escuro. A porcentagem de argila na camada superficial é 41%, sendo 46% na subsuperficial. Os teores de sílica são elevados apresentando média de 42% na camada superficial e 35% na subsuperficial. A areia é menos significativa com aproximadamente 17% na superficial e 12% na subsuperficial.

(ii) Cambissolo Hálico Tb A moderado, textura média: alta saturação por alumínio, argila de baixa atividade, horizonte A do tipo moderado com textura média. O horizonte A tem espessura de 30 cm. A porcentagem de argila é alta 19% na camada superficial e na 23% na subsuperficial. A fração da areia é significativa com 51% na superficial e 48% na subsuperficial.

(iii) Cambissolo Háptico Tb A proeminente com texturas argilosa: alta saturação por alumínio, argila de baixa atividade, horizonte A do tipo proeminente com textura argilosa. O horizonte A tem espessura de 35 a 40 cm. A fração de argila é de 43% no horizonte A e 48% no B. As frações de sílica variam 38% em A e 34% em B. O teor de areia é normalmente em torno de 20%.

#### 4.5 USO E COBERTURA VEGETAL

A bacia é caracterizada pela presença de Floresta Ombrófila Mista, reflorestamento de pinus e agricultura (Kobiyama et al., 2008).

A Floresta Ombrófila Mista é característica de regiões com altitudes superiores a 500 m. A espécie dominante na região, e de maior porte, é o pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*). No estrato emergente é comumente encontrada a imbuia (*Ocotea porosa*) e a Sapopema (*Sloanealasicoma*). Já no estrato inferior das árvores predomina a erva-mate (*Ilexparaguriensis*) (SANTA CATARINA, 1986; EMBRAPA, 2004).

A paisagem natural foi degradada pelo modelo econômico da cidade, que é baseada no reflorestamento de pinus. Hoje há apenas vestígios da floresta nativa. Outra atividade da região é a agricultura de milho, soja, feijão e fumo. Há também áreas de pastagem para a pecuária de bonivos, suínos, caprinos e aves (PREFEITURA DE RIO NEGRINHO, 2009).



## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 MATERIAIS**

#### **5.1.1 Estações de monitoramento hidrossedimentológico.**

O presente trabalho utilizou os dados obtidos na estação meteorológica Rio Negrinho (02649015) operada pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. (EPAGRI). Foram também selecionadas três estações pluviométricas: Corredeiras (02649055), Campo Alegre (02649057), Rio Novo (02649064). Os dados dessas estações citadas acima foram adquiridos por meio do site da Agência Nacional de Águas (ANA) – [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br) – no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB).

Para a calibração e validação do modelo foram utilizados dados de uma estação fluviométrica (nível/vazão) e uma estação hidrossedimentológica (nível/vazão/sedimento). Os dados de vazão foram obtidos na estação fluviométrica Rio Negrinho Montante (65093000). Os dados foram adquiridos por meio do site da Agência Nacional de Águas (ANA) – [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br) – no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB).

A estação hidrossedimentológica está localizada junto à captação de água da SAMAE (Figura 5.1). A estação contém: (a) sensor de altura da lâmina de água (sensor de pressão/nível) (Figura 5.2), (b) O sensor de turbidez (turbidímetro) (Figura 5.2), (c) réguas linimétricas (Figura 5.3) (c) datalogger modelo H-500XL da *Waterlog*. Os dois sensores foram instalados em janeiro de 2009.

As localização de todas as estações encontram-se na Figura 4.1.





Figura 5.3 – Estação hidrossedimentológica

### 5.1.2 ADP – Acoustic Doppler Profiler

As medições de vazão foram realizadas com o aparelho ADP 3.0 da Sontek (Figura 5.4) um pouco a jusante onde está localizada a estação hidrossedimentológica.

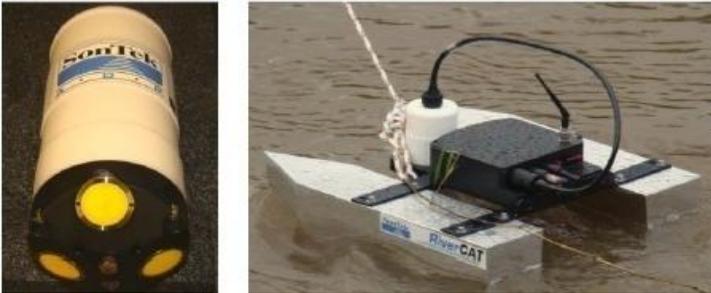


Figura 5.4 – Aparelho de medição de vazão ADP 3.0 Sontek.

### 5.1.3 Softwares

Para a realização deste estudo foram utilizados os seguintes softwares:

- ArcGIS 9.3.1. Extensões: SpatialAnalyst 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. 1.2.4* (ArcSWAT), desenvolvido pelo *Blackland Research Center Texas Agricultural Experiment Station* e USDA Agricultural Research Service;
- ENVI 4.3 (*Environment for Visualizing Images*);
- SPRING (Sistema de Informações Georreferenciadas);
- HYDRUS-1D – Ferramenta Rosetta Lite Version 1.1;
- GRAFCHAV – desenvolvido pelo Laboratório de Hidrologia da COPPE/UFRJ;
- WinTSR - desenvolvido pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFSM.

### 5.1.4 Material cartográfico e imagens de satélite

Foram utilizadas as cartas topográficas digitais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para delimitar a bacia, gerar o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e determinar a rede de drenagem. As cartas utilizadas foram Rio Negrinho e São Bento do Sul na escala 1:50.000, editadas e disponibilizadas em meio digital no site da EPAGRI.

O mapa de usos e cobertura do solo da região foi produzido através de softwares *ArcGIS ENVI*, utilizando imagens do satélite LANDSAT-TM5 220/79, 220/78 e 221/78, datas de julho de 2010. O mapa de solos na escala 1:250.000 foi elaborado a partir dos dados de EMBRAPA (2004).

## 5.2 BANCO DE DADOS ESPACIAIS

### 5.2.1 Modelo Numérico do Terreno

As amostras utilizadas no presente estudo foram às curvas de nível e os pontos tridimensionais (ponto cotados) presentes nas cartas topográficas de Rio Negrinho e São Bento do Sul. Na modelagem foi utilizado o método de interpolação TIN –*Triangular Irregular Network* pela triangulação de Delaunay. A partir do TIN foi gerado o Modelo Digital de Elevação (MDE) com uma resolução de células de 30 m no *ArcGIS* 9.3.1.

Foram definidos três classes de declividade na bacia. Os intervalos das declividades definidas foram de 0-3%, 3-20%, 20-45%.

### 5.2.2 Solos

O mapa de solos da BHRN foi elaborado com base no levantamento de solos (escala 1:250.000) realizado em 2004 que se encontra em Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM/EPAGRI, 2004).

A partir do mapa de solos foram generalizados os cinco principais tipos de solos. As frações muito pequenas nas bacias foram englobadas as frações maiores mais semelhantes. Com o mapa de uso e cobertura vegetal foi elaborado um mapa de solos que evidencia o tipo e solo e o uso e cobertura a fim de tornar as amostras mais significativas. No fim foi obtido um mapa de solo com cinco tipos de solos diferentes e com o três usos diferentes, totalizando 15 amostras de solos na BHRN. 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 seco na camada; c) capacidade de água disponível na camada; d) carbono orgânico; e) condutividade hidráulica saturada 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).

NRCS (2007) classificou os solos em 4 grupos hidrológicos (A, B, C e D) (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Descrição dos quatro grupos hidrológicos do solo.

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: USDA-NRCS (2007).

Os dados de solos utilizados neste trabalho foram obtidos de amostragem em campo. Foram realizados 15 perfis de solos dentro da área da bacia com profundidade de até 1,5 metros. O mapa de solos da Embrapa foi utilizado para evidenciar os cinco principais tipos de solos na bacia (CX9, CX32, CX14, CX48, CX51), que já representavam mais

de 90% da área bacía. Determinada as áreas de amostragem foram retiradas três amostras nos principais usos e coberturas vegetais da bacía (Mata nativa, pinus e pastagem).

Os parâmetros do tipo de solo de cada camada de solo foram definidos: a) profundidade da camada – análise em campo; b) densidade do solo na camada - densímetro; c) capacidade de água disponível na camada - estimada com base na ferramenta *Rosetta Lite* do *HYDRUS-1D*; d) carbono orgânico – pelo ensaio de matéria orgânica; e) condutividade hidráulica da camada - estimada com base na ferramenta *Rosetta Lite* do *HYDRUS-1D*; j) albedo – verificado na literatura; e k) fator de erodibilidade da camada (*K*) – Equação de Wischmeier (1971) (Equação 1). A porcentagem de argila, silte, areia e rocha foram determinada pelo método da curva granulométrica ABNT/NBR 7181/82.

A equação de Wischmeier (1971) é:

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

onde *M* é a um valor que depende da quantidade de argila; silte e areia é calculada pela NBR 7181; *MO* é a porcentagem de matéria orgânica do solo; *C<sub>soilstr</sub>* é o código de estrutura do solo utilizado na classificação do solo; e *C<sub>perm</sub>* é a classe de permeabilidade do perfil.

O cálculo de *M* foi feita com:

$$M = (m_{SILTE} + m_{AMF}) \cdot (100 - m_c) \quad (2)$$

onde *m<sub>SILTE</sub>* é a porcentagem de silte; *m<sub>AMF</sub>* é a porcentagem de areia muito fina; e *m<sub>c</sub>* é a porcentagem de argila.

Após as coletas e os ensaios em laboratório foram verificados os parâmetros do tipo do solo com o levantamento da EMBRAPA (2004).

### 5.2.3 Uso e cobertura Vegetal

Para a elaboração do mapa de uso do solo BHRN foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5, referentes às órbitas/ponto 220/78, 221/78 e 220/79, com data de março de 2010.

A etapa seguinte consistiu na segmentação das imagens com o software *SPRING*, objetivando a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo da bacía. Para esse estudo foram definidas sete classes de uso do solo:

- i) Pinus: 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.
- vii) Área Urbana: corresponde às áreas com presença de urbanização.

Foram realizados levantamentos de campo com GPS, onde foram coletados pontos georeferenciados 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.

### 5.3 DADOS DO MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

Os dados do monitoramento hidrossedimentológico serão utilizados para a calibração e validação do modelo.

Os dados de nível e a curva chave da estação Rio Negrinho Montante foram adquiridos no site da ANA. O período de dados adquirido foi do ano de 2007 a 2010.

Os dados de nível d'água e turbidez da SAMAE foram coletados dos dois sensores no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2011. Com os dados coletados foi selecionado o período de 21 de maio a 17 de novembro de 2010 por ser um período contínuo de dados.

#### 5.3.1 Dados de nível e vazão

Na SAMAE foram realizadas 16 medições de vazão com o *ADP* de 0,78 a 5,68 metros da cota da régua. Estas medições foram realizadas no período de julho de 2008 a outubro de 2009. Foi também realizado o levantamento topográfico da secção onde estão localizadas a régua

linimétricas. Com os dados de nível, vazão e o levantamento topográfico da secção foi elaborada a curva-chave da SAMAE (Apêndice A).

O método utilizado para elaboração da curva chave foi o método logarítmico que obedece a seguinte equação.

$$Q = f(H - H_o)^m \quad (3)$$

onde  $Q$  é a vazão (m<sup>3</sup>/s);  $H$  é a altura d'água (m); e  $f$ ,  $H_o$  e  $m$  são constantes.

As constantes são determinadas com a construção do gráfico entre a vazão e a altura d'água, que resulta em uma relação logarítmica. A construção do gráfico foi realizada através do software *GRAFCHAV*.

### 5.3.2 Dados de sedimento

O SWAT simula a concentração de sólido em suspensão e sedimento de arrasto. Portanto os dados observados de sedimento precisam ser a somatória das duas contribuições. Os sólidos em suspensão foram determinados através da correlação com os dados do sensor de turbidez. Esta correlação já foi evidenciada por Lewis (1996). O sedimento de arrasto foi determinado através do método simplificado de Colby (1957) descrito em Carvalho (1994). Segundo o mesmo autor este método é recomendando para pequenos rios (com profundidade menor que 3 metros) e amplamente utilizado por requerer poucas características físicas da bacia.

Sólidos em suspensão: Foram feitas sete coletas pontuais próxima do sensor de turbidez no ano de 2010 dos níveis de 0,92 a 1,44 m. As análises de sólidos em suspensão foram realizadas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Neste trabalho foram correlacionados os resultados dos sólidos em suspensão das coletas e os registros de turbidez do sensor com  $R^2$  de 0,76.

Sedimento de arrasto: os dados utilizados para o método simplificado de Colby são velocidade média, profundidade média, largura do rio, vazão e concentração de sólidos em suspensão. Os dados de velocidade, profundidade média e largura do rio foram determinadas com os dados da secção. Os dados de vazão foram determinados pela curva chave, e os sólidos em suspensão determinados pela metodologia descrita acima. Todos os dados foram inseridos no *WinTSR* para cálculo do sedimento de arrasto.

### 5.3.3 Tolerância de perda de solo

Para calcular a tolerância de perda de solos na BHRN foi utilizado o método proposto por Bertoni e Lombardi (1999). Este método segue os seguintes princípios:

- a) Profundidade do solo: a profundidade do solo é no máximo de 1,00 m
- b) Relação textural entre os horizontes superficiais e os subsuperficiais: a relação textural da argila entre os horizontes afeta principalmente a infiltração e a permeabilidade do solo. Foram então estabelecidos os seguintes critérios b.1) quando o valor de relação textural for inferior a 1,5 considera para cada horizonte estudado do perfil o peso total de solo do horizontes, b.2) quando o valor de relação textural for de 1,5 a 2,5 considera para cada horizonte superficial apenas 75% do seu peso de solo e 75% da sua espessura do horizontes de subsuperfície logo abaixo do horizonte A (horizonte superficial).
- c) O cálculo da quantidade de terra por unidade de superfície: para cada horizonte considerado do perfil de solos, tomou-se sua espessura e a densidade do solo, calculando-se seu peso de solo por unidade de superfície (Equação 4), levando em conta os critérios adotados acima.

$$P = 100 \cdot h_{hor} \cdot d \quad (4)$$

onde  $P$  é o peso de terra em um hectare ( $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ );  $h_{hor}$  é a espessura do horizonte (cm); e  $d$  é a densidade do solo ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

## 5.4 DESCRIÇÃO DO MODELO SWAT

As simulações hidrológicas na bacia hidrográfica realizadas pelo modelo SWAT podem ser separadas em duas partes: fase terrestre e fase de propagação do ciclo hidrológico.

### 5.4.1 Fase terrestre do ciclo hidrológico

A fase terrestre do ciclo hidrológico é ainda dividida em sete componentes: i) hidrologia; ii) clima; iii) sedimentos; iv) crescimento

vegetal; v) manejo agrícola; vi) nutrientes; e vii) pesticidas. Abaixo estão descritos os componentes do modelo que foram utilizados neste trabalho. (i, ii, iii, iv, v).

A Figura 5.5 apresenta uma esquematização da fase terrestre do ciclo hidrológico.

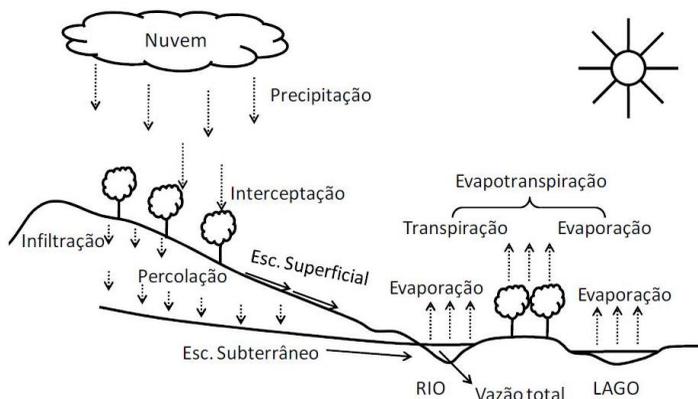


Figura 5.5 – Ciclo hidrológico (Fonte: Kobiyama et al. 2008)

#### 5.4.1.1 Hidrologia

O ciclo hidrológico utilizado nas simulações do SWAT é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (Per_i - Q_i - ET_i - q_{lat.i} - q_{ret.i}) \quad (5)$$

onde  $SW_t$  é a quantidade final de água no solo (mm);  $SW$  é a quantidade inicial de água no solo (mm) no tempo (dias);  $Per_i$  é a precipitação diária (mm);  $Q$  é o escoamento superficial (mm);  $ET$  é a evapotranspiração (mm);  $q_{lat.i}$  é o escoamento lateral (mm);  $q_{ret.i}$  é o escoamento de retorno (mm); e  $i$  é o passo de tempo (dias).

As subdivisões da bacia hidrográfica em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH) permitem que o modelo calcule diferentes evapotranspiração para cada tipo de uso e cobertura vegetal e solo. As

URH são caracterizadas conterem o mesmo uso e cobertura vegetal, tipo de solo e declividade assim o escoamento superficial estimado separadamente para cada URH é mais preciso e melhora a descrição do balanço hídrico da bacia.

### Escoamento Superficial

O escoamento Superficial no modelo SWAT é calculado pelos valores de precipitação diária e pelo método da Curva Número (CN). O método CN (Equação 8) é um produto empírico de mais de vinte anos de estudo em pequenas bacias hidrográficas nos Estados Unidos. O método CN foi desenvolvido para determinar o escoamento superficial em diferentes uso e coberturas vegetal e tipo de solo.

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - I_a)^2}{(P_i - I_a + S)} \quad (6)$$

Onde  $Q_{surf}$  é o escoamento superficial total (mm);  $P_i$  é a precipitação total (mm);  $I_a$  é a abstração inicial (o armazenamento no terreno, a interceptação e a infiltração no solo antes de iniciar o escoamento superficial em mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção (mm) o qual varia com o uso e cobertura vegetal, tipo de solo e declividade e é expressa como:

$$S = 25,4 \cdot \frac{100}{CN} - 10 \quad (7)$$

O método CN (NRCS, 2007) define três condições de umidade antecedente: (i)  $CN_1$  - condição seca (ponto de murcha); (ii)  $CN_2$  - condição de umidade média, e (iii)  $CN_3$  - condição úmida (capacidade de campo). Os valores tabelados de CN encontram-se na condição  $CN_2$ , as Equações (8) e (9) são utilizadas para transformar em  $CN_1$  e  $CN_3$ , respectivamente.

$$CN_1 = \frac{CN_2 - 20 \times (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp(2,533 - 0,0636 \times 100 - CN_2)} \quad (8)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot [0,00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (9)$$

A condição inicial para que o escoamento superficial ocorra é que  $P$  seja maior que  $I_a$ . Conforme NRCS (2007), a abstração inicial ( $I_a$ ) é adotada como sendo  $0,2S$ , portanto a equação do escoamento superficial pode ser apresentada como:

$$Q_{surf} = \frac{(P_i - 0,2S)^2}{(P_i + 0,8S)} \quad P > 0,2S \quad (10)$$

$$Q_{surf} = 0 \quad P \leq 0,2S \quad (11)$$

### Vazão de Pico

A vazão de pico é a máxima vazão provoca por um evento de chuva. A vazão de pico é um indicador da intensidade da erosão e é utilizada para calcular a perda de sedimento. O modelo SWAT calcula a vazão de pico pelo método racional (Equação 12).

$$Q_{pico} = \frac{CN \cdot i^* \cdot A}{3,6} \quad (12)$$

onde  $Q_{pico}$  é a vazão de pico ( $m^3/s$ );  $i^*$  é a intensidade da precipitação ( $mm/h$ ); e  $A$  é a área da bacia ( $km^2$ ). e 3,6 é um fator de conversão de unidades.

### Tempo de concentração

O tempo de concentração (Equação 13) é o tempo decorrido para que a água que precipita no local mais distante da bacia escoe até o exutório:

$$t_{conc} = t_{cs} + t_{cc} \quad (13)$$

onde  $t_{conc}$  é o tempo de concentração na bacia (horas);  $t_{cs}$  é o tempo de concentração do escoamento terrestre (horas); e  $t_{cc}$  é o tempo de concentração do escoamento no canal (horas).

$$t_{cs} = \frac{l_{slp}^{0,6} \cdot n^{0,6}}{18 \cdot slp^{0,3}} \quad (14)$$

onde  $l_{slp}$  é o comprimento da encosta(m);  $n$  é o coeficiente de Manning; e  $slp$  é a declividade média da bacia (m/m)

$$t_{cc} = \frac{0,62 \cdot l \cdot n^{0,75}}{A^{0,125} \cdot slp_{ch}^{0,375}} \quad (15)$$

onde  $l$  é o comprimento do curso d' água – do ponto mais longe da bacia até a exutoria em km;  $A$  é a área da bacia ( $km^2$ ); e  $slp_{ch}$  é a declividade média do curso d' água (m/m).

## Escoamento lateral

O escoamento lateral é significativo em solos com uma camada superficial com alta condutividade hidráulica seguido de uma camada semi-impermeável ou impermeável.

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:

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

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

## Escoamento Subterrâneo

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

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

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

## Percolação

A percolação é calculada para camada do perfil do solo:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excesso} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (18)$$

onde  $w_{perc,ly}$  é a quantidade de água que percola para a próxima camada (mm);  $SW_{ly,excesso}$  é o volume drenável de água na camada de solo (mm);  $\Delta t$  é a duração do passo de tempo (horas); e  $TT_{perc}$  é o tempo de propagação na camada do solo (horas). A água percola somente quando o teor de água exceder a capacidade de campo para aquela camada.

O volume de água disponível para a percolação nas camadas do solo é calculado como:

$$SW_{ly,excesso} = SW_{ly} - FC_{ly} \text{ se } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (19)$$

$$SW_{ly,excesso} = 0 \quad \text{se } SW_{ly} < FC_{ly} \quad (20)$$

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:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{k_{sat}} \quad (21)$$

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 ( $\text{mm.h}^{-1}$ ).

## Evapotranspiração

A evapotranspiração compreende todos os processos de transformação da água da superfície da terra para vapor (evaporação, transpiração e sublimação). A evapotranspiração é um dos principais meios de saída de água da bacia, aproximadamente 62% da precipitação é evapotranspirada.

A evapotranspiração potencial foi um conceito inserido por Thornthwaite (1948) na classificação climático sendo o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, de uma superfície extensa e coberta de vegetação e bem suprida de água.

Existem vários métodos de determinação da evapotranspiração, o SWAT disponibiliza três métodos de calcular a evopranspiração: Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989), o Priestley-Taylor method (Priestley e Taylor, 1972) e o Hargreaves method (Hargreaves et al., 1985).

No presente trabalho o método utilizado para cálculo da evapotranspiração foi o de Penman-Monteith (Equação 22). Este método requer a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento.

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \frac{[e_z^o - e_z]}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (22)$$

onde  $\lambda E$  é o fluxo de densidade do calor latente ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $E$  é a taxa de evaporação ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $\Delta$  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 solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $c_p$  é o calor específico a pressão constante ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ );  $e_z^o$  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);  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$ );  $r_c$  é a resistência de interceptação vegetal ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ); e  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

### 5.4.1.2 Clima

Os parâmetros de clima utilizados pelo gerador climático SWAT estão descritos na Tabela 5.5 do item 5.2.4.

### 5.4.1.3 Sedimento

A erosão causada pela chuva e pelo escoamento total na bacia hidrográfica é calculada 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 Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965, 1978).

A diferença entre aUSLE e a MUSLE é que a primeira estima a erosão média anual bruta em função da energia da precipitação, e a segunda estima em função do escoamento. A MUSLE é definida por Willians (1995):

$$SED = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot Q_{peak} \cdot Area_{urh})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (15)$$

onde  $SED$  é a produção de sedimento (ton.dia<sup>-1</sup>);  $Q_{surf}$  é o volume de escoamento superficial (mm.ha<sup>-1</sup>),  $Q_{pico}$  é a vazão de pico (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>),  $Area_{urh}$  é a área da unidade de resposta hidrológica (ha),  $K$  é o fator de erodibilidade do solo,  $C$  é o fator de cobertura e manejo,  $P$  é o fator de praticas conservacionistas,  $LS$  é o fator topográfico e  $CFRG$  é o fator de fragmento grosseiro.

Wichmeiret al. (1971) desenvolveu uma equação geral para o fator erodibilidade ( $K$ ) descrita como:

$$K_{USLE} = \frac{0,00021 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - MO) + 3,25 \cdot (C_{soilstr} - 2) + 2,5 \cdot (C_{perm} - 3)}{100} \quad (23)$$

onde  $M$  é o parâmetro tamanho das partículas,  $MO$  é a porcentagem matéria orgânica (%),  $C_{soilstr}$  é o código de estrutura do solo utilizado na classificação dos solos, e  $C_{perm}$  é a classe de permeabilidade do solo.

O parâmetro tamanho das partículas ( $M$ ) é calculado:

$$M = (m_{silte} + m_{areia}) \cdot (100 - m_c) \quad (24)$$

onde  $m_{silte}$  é a porcentagem de silte;  $m_{areia}$  é a porcentagem de areia muito fina; e  $m_c$  é a porcentagem de argila. A porcentagem matéria orgânica ( $MO$ ) é calculada:

$$MO = 1,72 \cdot orgC \quad (25)$$

Onde  $orgC$  é a porcentagem de carbono orgânico.

Os valores de  $C_{soilstr}$  e  $C_{perm}$  são adotados a partir das Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente. O  $C_{perm}$  é baseado na condutividade hidráulica saturada.

Tabela 5.2 – 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, placas, prismáticos ou maços

Tabela 5.3 - Classes de  $C_{perm}$

$C_{perm}$	Condutividade hidráulica Saturada (mm.h <sup>-1</sup> )
1	Rápido (> 150)
2	Moderado a rápido (50 - 150)
3	Moderado (50 - 150)
4	Lento a moderado (50 - 150)
5	Lento (1 - 5)
6	Muito lento (<1)

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

$$C_{USLE} = \exp \left\{ \ln(0,8) - \ln(C_{USLE,MN}) \right\} \cdot \exp \left( -0,00115 \cdot rsd_{surf} \right) + \ln(C_{USLE,MN}) \quad (26)$$

onde  $C_{USLE}$  é o fator cobertura e manejo;  $C_{USLE,MN}$  é o valor mínimo para o fator de cobertura e manejo;  $ersd_{surf}$  é a quantidade de resíduo no solo (kg.ha<sup>-1</sup>). O  $C_{USLE,MN}$  é calculado como:

$$C_{USLE,MN} = 1,463 \cdot \ln(C_{USLE,aa}) + 0,1034 \quad (27)$$

Onde  $C_{ULSE,aa}$  é o fator anual médio para fator cobertura e manejo.

O fator de práticas conservacionistas ( $P_{USLE}$ ) é definido como a taxa de perda do solo com uma específica prática. Os valores de  $P_{USLE}$  são definidos a partir da declividade (%) (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Relação entre declividade do solo e valores de  $P_{USLE}$

Declividade do Solo (%)	$P_{USLE}$
1 – 2	0,6
3 – 5	0,5
6 – 8	0,5
9 – 12	0,6
13 – 16	0,7
17 – 20	0,8
21 – 25	0,9

O fator topográfico ( $LS_{USLE}$ ) é a taxa de perda de solo esperada para um terreno uniforme de 22,1 m de comprimento e 9% de declividade e é expresso como:

$$LS_{USLE} = \left( \frac{L_{hill}}{22,1} \right)^m \cdot [65,41 \cdot \text{sen}^2(\alpha_{hill}) + 5,46 \cdot \text{sen}(\alpha_{hill}) + 0,065] \quad (28)$$

onde  $L_{hill}$  é o comprimento da encosta (m);  $m$  é o ângulo da declividade da encosta e é expresso como:

$$m = 0,6 \cdot [1 - \exp(-35,835 \cdot slp)] \quad (29)$$

onde  $slp$  é a declividade média da URH e é calculado como:

$$slp = \tan(\alpha_{hill}) \quad (30)$$

O fator fragmento grosseiro ( $CFRG$ ) é determinado como:

$$CFRG = \exp(-0,053 \cdot rock) \quad (31)$$

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

#### 5.4.1.4 Crescimento Vegetal

As condições de crescimento vegetal são estimadas diariamente pela um modelo de crescimento de planta EPIC (Williams *et al.*, 1984). O modelo EPIC diferencia entre culturas anuais e perenes.

#### 5.4.1.5 Manejo Agrícola

O manejo agrícola é um importante tópico na modelagem ambiental, pois os seus impactos interferem diretamente na dinâmica de água e sedimento em uma bacia hidrográfica. O modelo SWAT utiliza vários modelos que simulam plantio, colheita, irrigação, propagação de nutrientes e pesticidas.

### 5.4.2 Fase de propagação do ciclo hidrológico

A propagação no canal principal consiste nos componentes: (i) propagação da vazão líquida; (ii) propagação da vazão sólida; e (iii) propagação química. Neste estudo somente foram abordados a propagação da vazão líquida e sólida.

#### 5.4.2.1 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 do curso d'água

#### 5.4.2.2 Propagação da Vazão Sólida no Curso d'Água

O transporte de sedimentos nos cursos d'água é função de dos processos de deposição e degradação. A deposição no curso d'água através das sub-bacias é baseada na velocidade de queda das partículas de sedimentos e a degradação é determinada pela força do escoamento.

Na última versão do SWAT estas equações foram mais simplificadas e 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.

## 5.5 APLICAÇÃO DO SWAT

### 5.5.1 Delimitação das sub-bacias

Na aplicação do modelo, primeiramente foi inserido o MDE. A partir do MDE o modelo calculou as sub-bacias com a área mínima de 300 ha. A escolha desta dimensão foi feita pela análise visual comparando a drenagem gerada pelo modelo e a drenagem das cartas topográficas. Foi delimitado pelo modelo um total de 57 sub-bacias.

### 5.5.2 Definição das URH

Após o delineamento das sub-bacias, foram sobrepostos os mapas de solos e de uso e cobertura vegetal para definição das URH. Nesta etapa o modelo dispõe de três opções:

- i. Uma única URH para a sub-bacia caracterizada pelo uso e cobertura vegetal, solo e declividade dominante;
- ii. Uma única URH para a sub-bacia que será a URH dominante;
- iii. Múltiplas URH – com considerações de mínima porcentagem de uso e cobertura vegetal, solo e declividade.

Foi utilizada a iii) opção múltiplas URH, apresentando assim um total de 216 URH na BHRN, com consideração mínima de 10% de porcentagem de uso e cobertura vegetal, solo e declividade.

### 5.5.3 Dados Climáticos

Foram inseridos os parâmetros necessários para o gerador climático do modelo (Tabela 5.5), e a série de dados históricos diários de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. A série histórica contém os dados de agosto de 1980 a dezembro de 2010.

Tabela 5.5 – Parâmetros mensais requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.

<b>Parâmetros</b>	
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 <sup>-1</sup> )
PCPSKW	Coeficiente 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 (MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup> )
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNDVAV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s <sup>-1</sup> )

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 por ser um dos métodos mais utilizados.

#### **5.5.4 Procedimentos gerais**

A Figura 5.6 mostra o fluxograma seguido neste trabalho, já empregada por Machado (2002).

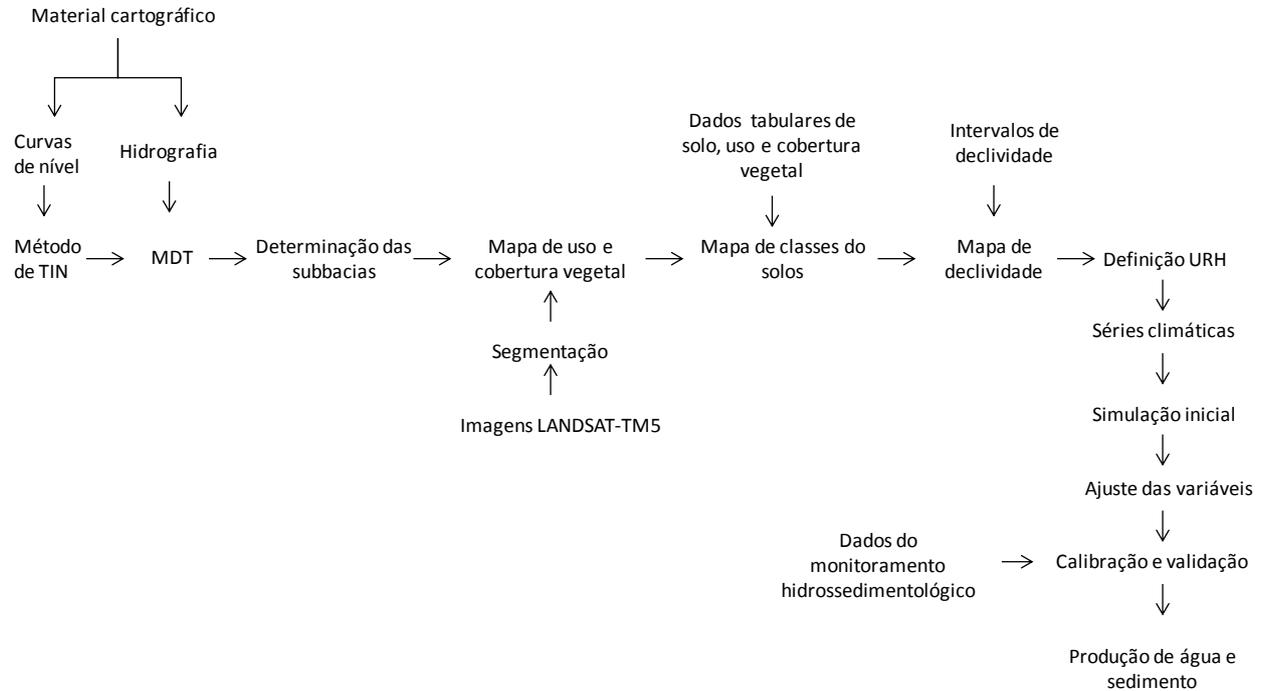


Figura 5.6 - Fluxograma do trabalho

Foram simulados os período de 1980 a 2010 porém somente o o período de 1983 a 2010 foi analisado para elaboração dos resultados.

## 5.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO

### 5.6.1 Calibração e Validação

A calibração ou estimativa de parâmetros é o ajuste dos parâmetros do modelo. O primeiro passo na calibração de modelos é separar a série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e outro para validação do modelo.

Segundo Arnold et al. (2000), no período de calibração, as entradas do modelo são variadas até um ajuste aceitável ser alcançado. Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este deve ser validado para situações semelhantes às que se quer aplicá-lo. Os resultados da validação indicam se o modelo é capaz de reproduzir a série de dados não usados em sua calibração.

Para a calibração do SWAT com os dados de vazão foram selecionados períodos de dados das estações Rio Negrinho Montante. Para validação foram utilizados outro período de dados da estação Rio Negrinho Montante e da estação SAMAE. A consistência dos dados foi analisada visualmente através do hietograma e hidrograma.

Para análise do desempenho do SWAT com os dados de sedimento foram selecionados períodos de dados contínuos da estação da SAMAE.

### 5.6.2 Análise de desempenho do modelo

Na análise do desempenho do modelo em relação aos dados de vazão e sedimentos foram utilizados o coeficiente de Nash e Sutcliffe (*NASH*), o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), erro médio (EM) e Coeficiente de massa residual (CMR).

O *NASH* descreve a variância em relação aos dados observados na escala temporal e é mais sensível aos erros nas vazões máximas do que nas vazões mínimas, sendo considerado adequado para a previsão de cheias (Tucci, 2004). É amplamente utilizado nos estudos com modelos hidrológicos para análise de desempenho do modelo, como mostra a Tabela 3.3.

Os valores de *NASH* variam entre  $-\infty$  a 1,0. Quando o valor de *NASH* é maior ou igual a zero isso significa que já está melhor que estimar o valor do dado observado pela média. Segundo Van Liew et al. (2003) valores de *NASH* maiores que 0,5 são satisfatórios.

O coeficiente de *NASH* é definido como:

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n^*} (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^{n^*} (E_m - E^*)^2} \quad (32)$$

onde *NASH* é o coeficiente de Nash e Sutcliffe;  $E_m$  é o evento monitorado;  $E_s$  é o evento simulado;  $E^*$  é a média do evento observado no período da simulação; e  $n^*$  é o número de eventos.

O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) representa a associação linear entre as dados observadas e calculados. O alcance varia de -1 a 1, com perfeita associação igual a unidade. Segundo Moriasi *et al.* (2007) valores acima de 0,5 são aceitáveis.

O erro médio é calculado como:

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{E_s - E_m}{n} \quad (33)$$

O coeficiente de massa residual indica quanto o modelo superestima (valores negativos) ou subestima (valores positivos) os dados simulados. Quanto mais próximo de zero melhor será o desempenho do modelo. O CMR é expresso pela equação:

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n E_m - \sum_{i=1}^n E_s}{\sum_{i=1}^n E_m} \quad (34)$$

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 DADOS DE ENTRADA**

#### **6.1.1 Dados Espaciais**

##### **6.1.1.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)**

O modelo digital de elevação da BHRN apresentou altitude média 800 m, sendo altitude máxima de 984 m e mínima de 780 m (Figura 6.1).

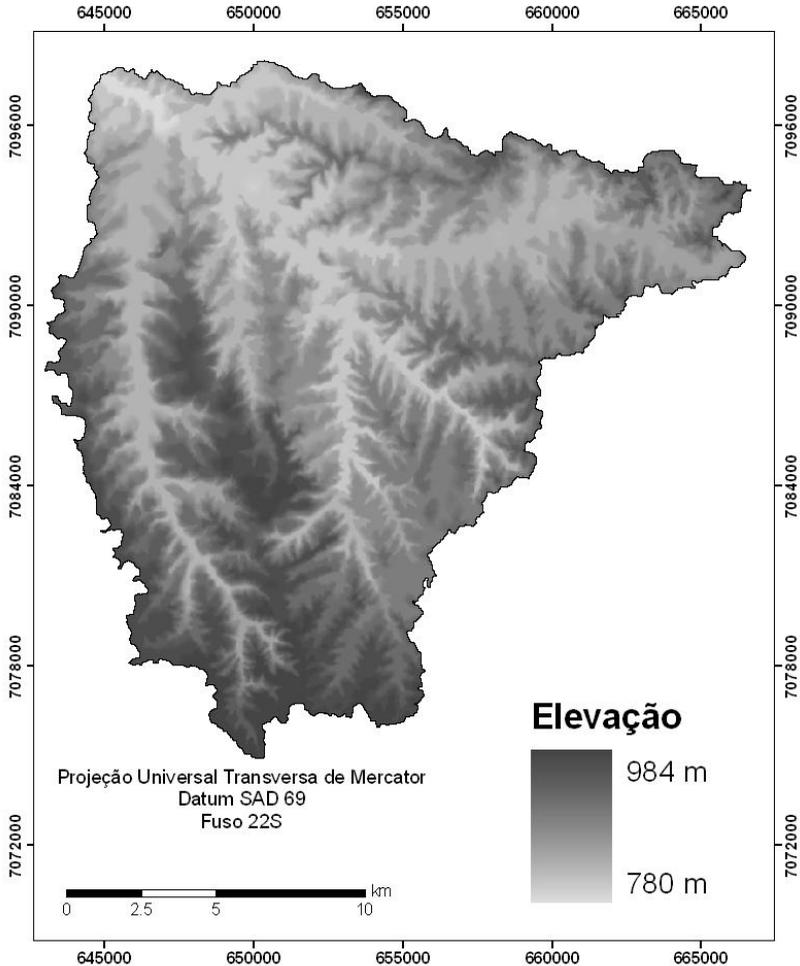


Figura 6.1 – Modelo digital do elevação da BHRN.

### 6.1.1.2 Mapa de uso e cobertura vegetal

Analisando a distribuição das classes de uso e cobertura vegetal, foi possível estimar as áreas (km<sup>2</sup>) e porcentagens de casa uso e cobertura vegetal na BHRN. A Tabela 6.1 e a Figura 6.2 mostram a distribuição das classes de uso e cobertura vegetal na BHRN.

Tabela 6.1 - Distribuição das classes de uso e cobertura vegetal na BHRN.

Classe de uso e cobertura vegetal	Porcentagem (%)	Área (km <sup>2</sup> )
Mata Nativa	59,14	210,96
Pinus	14,64	45,09
Pastagem	7,24	22,30
Agricultura	6,94	21,39
Solos Exposto	6,39	19,68
Urbano	5,46	16,81
Água	0,19	0,57
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>308,05</b>

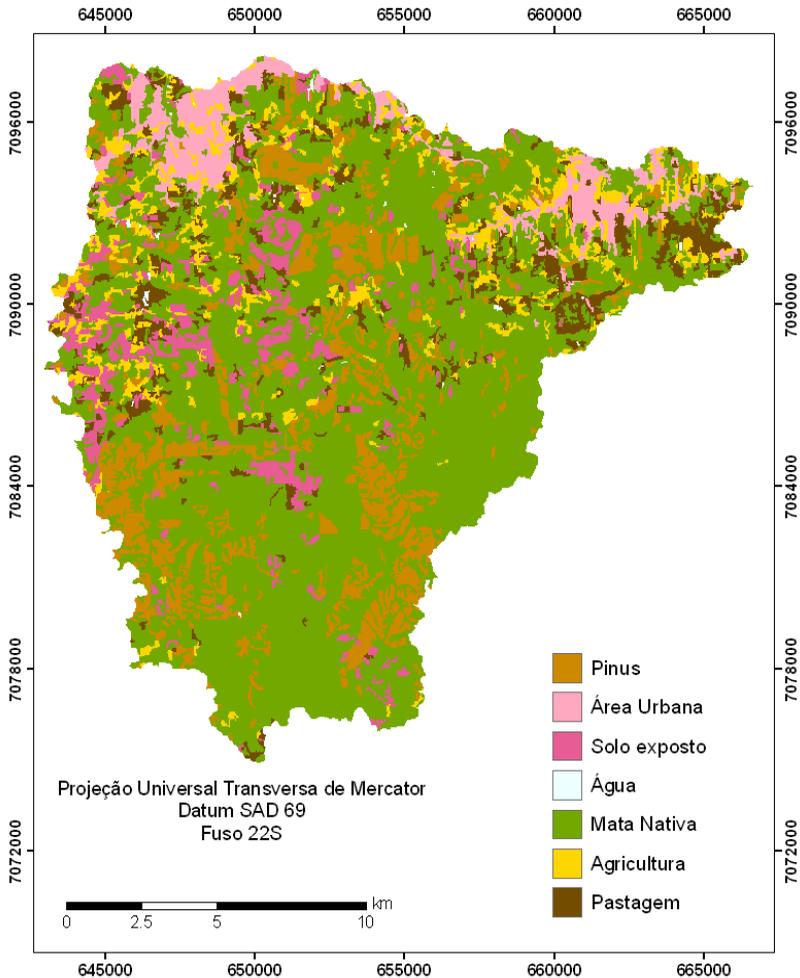


Figura 6.2 – Mapa de uso e cobertura vegetal da BHRN.

### 6.1.1.3 Mapa de classificação dos solos

O mapa de classificação dos solos da BHRN foi elaborado com base no levantamento da EMBRAPA (2004) (Figura 6.3 e Tabela 6.2).

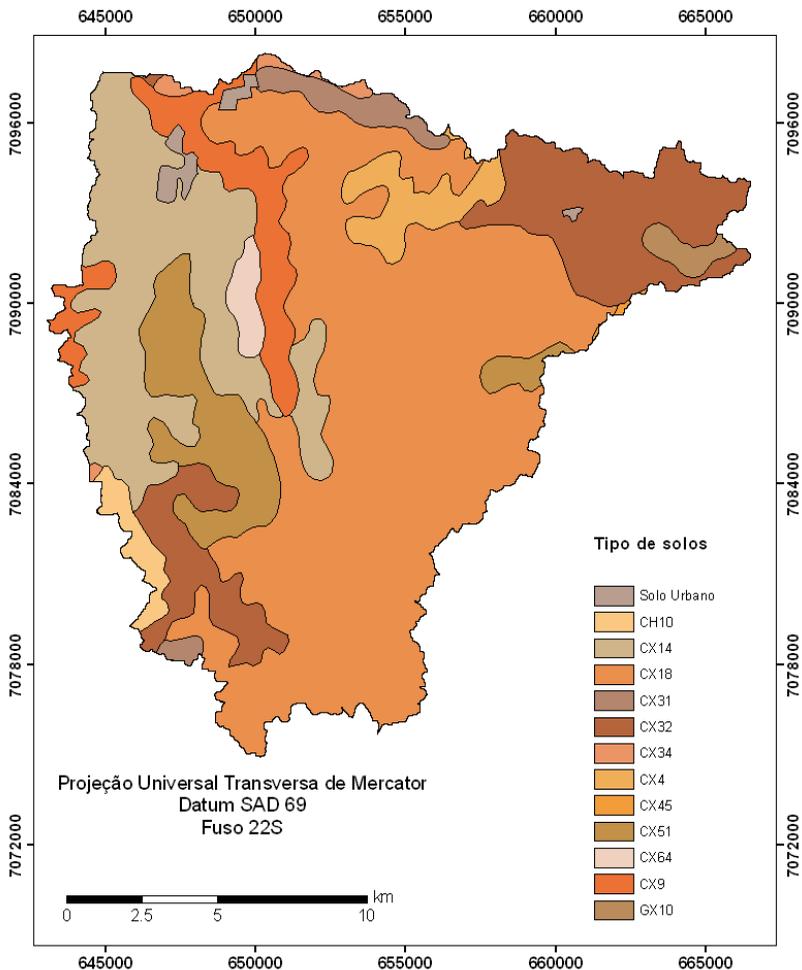


Figura 6.3 – Mapa do tipo do solos da BHRN.

Tabela 6.2 - Distribuição do tipo dos solos na BHRN.

Tipo do Solo	Porcentagem (%)	Área (km <sup>2</sup> )
CX45	0,03	0,09
CX64	1,10	3,38
CX4	3,06	9,42
GX10	0,49	1,50
CX31	2,11	6,49
CX51	7,27	22,39
CX14	16,92	52,12
Solo Urbano	0,87	2,68
CX9	6,06	18,66
CX10	1,56	4,80
CX34	0,60	1,84
CX32	13,46	41,46
CX18	46,39	142,90
<b>Total</b>	<b>99,92</b>	<b>307,80</b>

#### 6.1.1.4 Sub-bacias da BHRN

O modelo SWAT delimitou a sub-bacia automaticamente com base na drenagem, MDE e a área mínima estipulada de 0,3 km<sup>2</sup>. Foram gerados 57 sub-bacias. A menor sub-bacia é a de número 18 (0,35 km<sup>2</sup>) e a maior sub-bacia é a número 3 tem aproximadamente 19 km<sup>2</sup> (Figura 6.4).

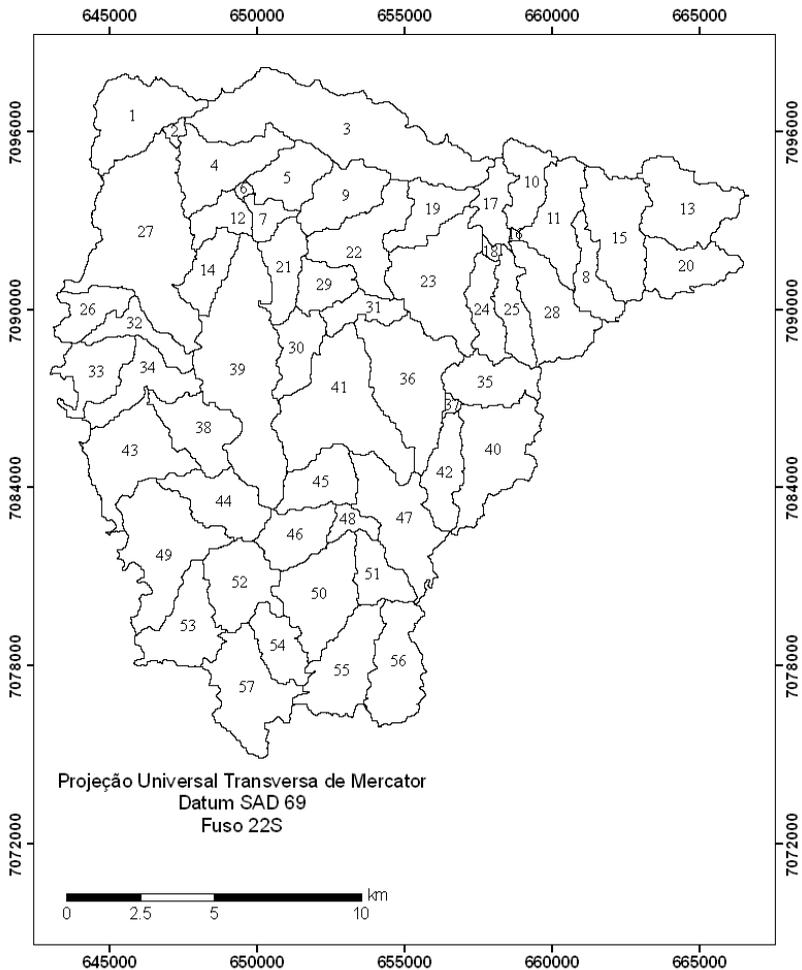


Figura 6.4 – Delimitação das sub-bacias na BHRN

## **6.1.2 Dados Tabulares:**

### 6.1.2.1 Dados Climáticos

A partir dos dados da estação meteorológica foram calculados os parâmetros requeridos pelo gerador climático do SWAT e apresentados na Tabela 6.4 (descritas na Tabela 5.1 do item 5.2.4).

Tabela 6.4 – Dados climáticos requeridos para o gerador climático

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	31,8	31,2	31,1	29,1	26,9	25,1	25,9	28,8	29,9	30,8	31,3	32,4
TMPMN	12,6	12,5	11,4	6,2	1,6	0,8	-1,58	-0,2	2,5	7,6	8,7	10,3
TMPSTDMX	1,6	0,8	1,5	1,1	1,5	1,3	1,5	1,9	2,8	1,4	2,0	1,7
TMPSTDMN	2,1	2,0	2,2	3,3	3,3	3,3	2,4	2,9	3,2	2,2	1,6	2,3
PCPMM	223,6	149,7	133,9	105,8	124,2	123,7	138,5	109,1	180,2	196,6	142,7	164,7
PCPSTD	99,2	48,4	67,0	76,8	136,4	57,7	73,6	87,5	103,9	80,6	61,7	78,8
PCPSKW	0,2	0,2	1,2	1,3	2,4	0,3	0,2	1,1	0,2	-0,3	0,4	0,6
PR_W1	0,17	0,94	0,73	0,56	0,47	0,45	0,48	0,33	0,62	0,57	0,52	0,59
PR_W2	0,65	0,59	0,6	0,43	0,47	0,45	0,46	0,43	0,62	0,57	0,52	0,59
PCPD	18	16	15	10	10	9	10	7	13	15	13	14
RAINHHMX	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
SOLARAV	16	18,5	10,8	9,9	10,3	10	9,9	14,3	14,8	17,3	19,8	13,5
DEWPT	13,6	12,8	10,7	7,3	6,5	4,8	4,6	7	9,5	10,1	12	13,4
WMDAV	2,6	2,5	2,5	2,3	2,2	2,0	0,3	2,2	2,9	3,2	3,2	2,9

### 6.1.2.2 Dados de solos

Os dados requeridos pelo SWAT foram obtidos segundo o item 5.2.2 e estão apresentados no Apêndice C.

### 6.1.2.3 Dados de vazão e sedimento

Os dados de vazão da estação Rio Negrinho Montante foram obtidos diretamente do site da ANA.

Os dados de vazão na SAMAE foram obtidos através da metodologia do item 5.3.1. Utilizando o método logarítmico foram elaboradas duas equações para determinar a vazão nesta secção descrito nas equações abaixo.

$$Q = 5,254 \cdot (H - 0,77)^{0,4042} \quad \text{se } 0,77 > H < 2,0 \quad (35)$$

$$Q = 5,4207 \cdot (H + 0,01)^{1,1525} \quad \text{se } 2,0 > H < 5,0 \quad (36)$$

onde  $Q$  é a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); e  $H$  é a altura de lâmina de água (m). Os resumos das medições de vazão estão no Apêndice A.

Os dados de sedimento na SAMAE foram obtidos através da metodologia do item 5.3.2. O resumo das coletas de sólidos em suspensão e a correlação sólidos suspensão-turbidez estão no Apêndice B.

## 6.2 CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO

### 6.2.1 Calibração – Vazão

Na etapa de calibração do modelo com os dados de vazão, foram selecionados os dados de vazão de outubro de 2007 a novembro de 2008 da estação Rio Negrinho Montante. Esse intervalo de dados foi selecionado por ser uma série de dados contínuo. Pela análise do hidrograma (Figura 6.5).

Foram realizadas as simulações iniciais (sem calibração) e foram comparadas para com os dados observados. A Figura 6.5 mostra que as simulações sem calibração já apresentaram resultado coerente com dados observados. Para simulação inicial o *NASH* foi igual a 0,02 e  $R^2$  igual a 0,35.

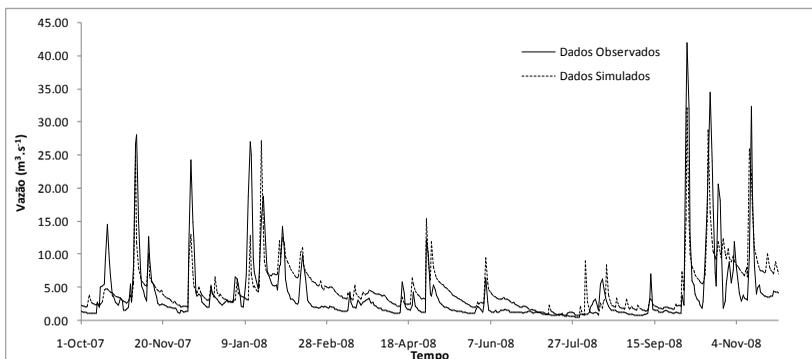


Figura 6.5 – Comparação entre dados observados e simulados de vazão – Rio Negrinho Montante (outubro de 2007 a novembro de 2008).

Antes de iniciar a calibração manual, foi realizada a análise de sensibilidade com parâmetros de vazão que evidência os parâmetros mais sensíveis e que influenciariam mais a dinâmica hidrológica no modelo. Os parâmetros encontrados pela análise de sensibilidade foram hierarquizados por ordem de influência e estão apresentados a seguir:

- Alpha\_Bf – Fator de resposta à variações na recarga do aquífero (dias)
- ESCO – Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional);
- CN2 – Curva Número;
- Canmx – Armazenamento de água máximo na copa das árvores (mm);
- Blai – Índice de área foliar potencial máxima (adimensional);
- Gwqmn – Profundidade mínima do aquífero superficial para que ocorra escoamento subterrâneo;
- Revapmm – Profundidade do aquífero superficial para que ocorra percolação ao aquífero profundo;
- GW\_Revap – Coeficiente de escoamento (movimento) de água do aquífero superficial para zona insaturada;
- Sol\_z – Profundidade da camada de solo (mm);
- Sol\_AWC – Quantidade de água disponível na camada do solo ( $\text{mm}_{\text{AGUA}} \cdot \text{mm}^{-1}_{\text{SOLO}}$ )
- Ch\_K2 – Condutividade hidráulica efetiva no canal principal ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )

- Sol\_K – Condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm.h}^{-1}$ );
- Surlag – Coeficiente de resposta do escoamento superficial (adimensional);
- GW\_Delay – Período de tempo que a água se move da camada de solo mais profunda até o aquífero superficial;
- Biomix - Eficiência de mistura dos nutrientes do solo.

Durante a calibração manual foram realizadas alterações nos parâmetros citados acima e verificando mudanças significativas na vazão. Os parâmetros que mudaram significativamente a vazão estão listados na Tabela 6.6.

Durante a calibração dos parâmetros foi analisando as alterações pela análise visual do hidrograma (Figura 6.6) e através análise de desempenho – *NASH*,  $R^2$ , EM e CMR (Tabela 6.7).

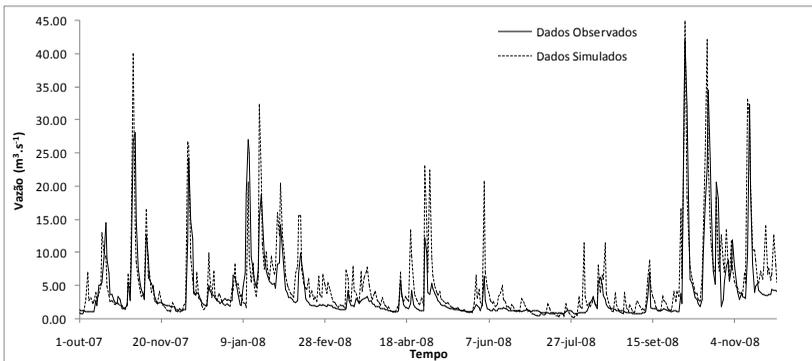


Figura 6.6 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de vazão – Rio Negrinho Montante (outubro de 2007 a novembro de 2008)

Tabela 6.6 – Valores modificados na calibração manual

Parâmetro		Valor Inicial	Calibração Manual
Alpha_Bf		0,048	0,7
ESCO		0,95	0,01
CN2	Urbano	72	67
	Pinus	70	65
	Mata Nativa	73	68
	Pastagem	79	74
Gwqmn		0	0,2
Revapmn		1	0
Gwq_Revap		0,2	0,02
Sol_AWC		0,11-0,15	0,15-0,19
Sol_K		2,41-30,21	24,41-302,10
Surlag		4	1
GwDelay		31	20

A Tabela 6.7 mostra que vários parâmetros de vazão foram ajustados. Isto foi realizado, pois o modelo adota muitos parâmetros *default*. O *NASH* e o  $R^2$  estão relativamente satisfatórios. O modelo superestimou a vazão, evidenciado visualmente e pelo *CMR*, mas ele parece responder a vazão da *BHRN*. Foi então verificada se o modelo responde ao período de dados não utilizado na calibração.

Tabela 6.7 – Valores da análise do desempenho do modelo

Parâmetro	Dados diários	
	Simulação Inicial	Calibração Manual
<i>NASH</i>	0,02	0,52
$R^2$	0,35	0,58
<i>EM</i>	1,67	1,02
<i>CMR</i>	-0,45	-0,26

### 6.2.2 Validação – Vazão

Para a validação do modelo foram utilizados os dados de vazão da estação Rio Negrinho Montante do período de janeiro de 2009 a

novembro de 2010, e os dados da estação SAMAE no período de maio de 2010 a novembro de 2010. O resultado encontra-se na Figura 6.7.

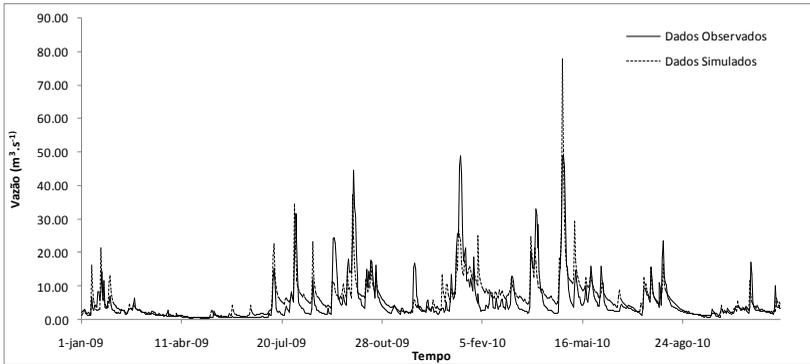


Figura 6.7 – Validação do modelo com dados de vazão – Rio Negrinho Montante (janeiro de 2009 a novembro de 2010).

Tabela 6.8 – Valores da análise do desempenho do modelo.

Parâmetro	Dados diários
	Calibração Manual
<i>NASH</i>	0,61
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,61
<i>EM</i>	1,29
<i>CMR</i>	-0,12

Apesar do bom desempenho do modelo evidenciado pelo  $R^2$  e pelo *NASH* que o modelo ainda superestima a vazão (*CMR* negativo) na secção Rio Negrinha Montante (Figura 6.7).

A validação com os dados de vazão da secção da SAMAE foi elaborada com um período menor de dados devido a falha na leitura do sensor. Foram utilizados os dados de vazão de 21 de maio de 2010 a 17 de novembro de 2010 (Figura 6.8). O desempenho do modelo na secção da SAMAE não foi tão satisfatório. Isto deve ter ocorrido devido principalmente ao curto período de dados e pouca variação das cotas registradas. Neste período a variação das cotas do rio foi de apenas 0,81 a 3,1 metros. A Tabela 6.9 mostra os coeficientes de desempenho do modelo.

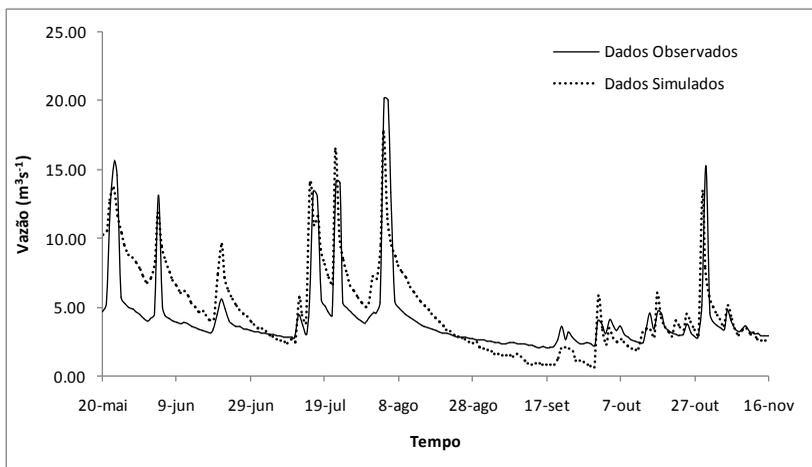


Figura 6.8 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de vazão (maio a novembro de 2010).

Tabela 6.9 – Valores da análise do desempenho do modelo.

Parâmetro	Calibração Manual
<i>NASH</i>	0,48
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,60
<i>EM</i>	0,61
<i>CMR</i>	-0,15

A Tabela 6.9 mostra que os parâmetros de desempenho do modelo também se adequaram razoavelmente a estação da SAMAE. O CMR evidencia que o modelo superestima a vazão também neste ponto de controle.

O modelo tanto na estação Rio Negrinho Montante quanto na SAMAE parece ajustar aos picos da vazões. Os picos que o modelo não respondeu deve se principalmente número reduzido de estação pluviométricas disponíveis.

Há também dados, principalmente nos dados de calibração, que o modelo simula picos no hidrograma que não aparecem nos dados observados. Observando os dados pluviométricos e fluviométricos estes picos que são simulados pelo modelo e não aparecem nos dados observados podem ser: (1) a falta de consistência dos dados observados

(leitura errada do observado) no dados fluviométricos; (2) a distribuição da precipitação na BHRN foi pouca representativa nestes eventos.

A curva de recessão da vazão ainda não está bem ajustada para as duas estações. Um dos motivos pode ser a pequena quantidade de amostra do solos que foi realizada que ainda não consegue caracterizar as propriedades do solo, como condutividade hidráulica e capacidade de água disponível do solo, significativamente.

### 6.2.3 Calibração – Sedimento

Na etapa de calibração do modelo com os dados de sedimento, foram selecionados apenas os dados de sedimento de 21 de maio de 2010 a 31 de agosto de 2010, pois era o único período contínuo e consistente.

Foram realizadas as simulações iniciais (sem calibração) e foram comparadas para com os dados observados. Os dados de sedimento gerados pela simulação inicial foram muito menores que os observados. Apesar disso o modelo está respondendo coerentemente, há uma correlação moderada entre os dados observados e simulados que é evidenciado pelo  $R^2$  de 0,41. Porém há uma amplitude entre os dados medidos e simulados evidenciado pelo *NASH* de -0,25 e pelo EM de -24,60. O CMR de 0,89 comprova a subestimação do modelo na produção de sedimento na bacia.

A baixa concentração de sedimento da secção deve-se ao fato de o modelo ter provocado pouca produção de sedimento na fase terrestre, baixa degradação ao longo do curso d'água.

Visto isso foi feita a calibração ajustando os valores listados a abaixo até o melhor ajuste ser encontrado.

- ADJ\_PKR – Fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimento na subbacia;
- Lat\_Sed – concentração de sedimentos no escoamento lateral e subterrâneo ( $\text{mgL}^{-1}$ );
- Filterw – largura da borda de campo de filtros em tira (m);
- Usle\_K – fator K de erodibilidade do solo da USLE;
- Usle\_P – fator P de práticas de suporte da USLE;
- Usle\_C – valor mínimo do fator C de cobertura vegetal da USLE;
- SPCON – parâmetro linear para cálculo da quantidade máxima de sedimento que pode estar reentrando durante o aporte de sedimento no canal;

- SPEXP – parâmetro exponencial para cálculo da reentrada de sedimento no canal;
- PRF – fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimento no canal principal;
- Ch\_Erod – fator de erodibilidade do canal;
- Ch\_Cov – fator de cobertura vegetal do canal

Foi realizada a calibração manual alterando nos parâmetros citados acima e verificando mudanças significativas na quantidade de sedimento. O parâmetro Usle\_K não foi alterado por já ter sido calculado através de dados observados. O Usle\_P e filterw também não foram alterados pois na simulação inicial os valores limite já tinham sido empregados. Os parâmetros que mudaram significativamente a quantidade de sedimento estão listados na Tabela 6.10. Durante a calibração foi analisando as alterações pela análise visual (Figura 6.9) e através análise de desempenho – *NASH*,  $R^2$ , *EM* e *CMR* (Tabela 6.11).

Tabela 6.10 – Valores modificados na calibração manual

Parâmetro	Valor Inicial	Calibração Manual
ADJ_PKR	0	2
Lat_Sed	0	100
SPCON	0,0001	0,01
SPEXP	1	2
PRF	1	2
Ch_Erod	0	1
Ch_Cov	0	0,02

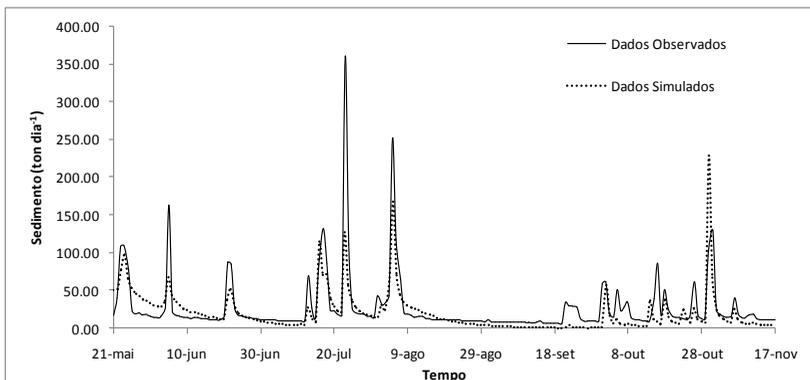


Figura 6.9 - Comparação entre dados observados e calibrados manualmente de sedimento (maio a agosto de 2010).

Tabela 6.11 – Valores da análise do desempenho do modelo.

Parâmetro	Simulação Inicial	Calibração Manual
<i>NASH</i>	-0,25	0,43
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,41	0,74
<i>EM</i>	-24,60	-2,01
<i>CMR</i>	0,89	0,07

A Tabela 6.11 mostra uma melhora significativa no desempenho através da calibração. Apesar de ser pequeno período utilizado para a comparação ser um dos limitadores, o período analisado abrange o período menos chuvoso e período chuvoso da região. E também que o modelo parece responder a dinâmica hidrossedimentológica da BHRN. O *CMR* positivo evidencia que ao contrario da vazão o modelo está subestimando os dados de sedimento. Apesar do *NASH* não ser tão significativo, o valor de *R*<sup>2</sup> mostra um bom desempenho do modelo na calibração.

A média de sedimento encontrado foi de 27 ton/dia. Porém pode se observar que há dias com grande produção de sedimento, principalmente nos dias que ocorrer aumento da vazão e dias que a produção aproxima de zero. O desvio padrão dos dados observados de sedimento neste período foi de 40,44 e o coeficiente de variação de 1,48.

### 6.3 ANÁLISE ESPACIAL DA DINÂMICA DA ÁGUA E SEDIMENTO NA BHRN

Foi analisada a dinâmica da água e sedimento na BHRN espacialmente. A Figura 6.10 mostra a distribuição pluviométrica na BHRN com os dados de 1983 a 2010.

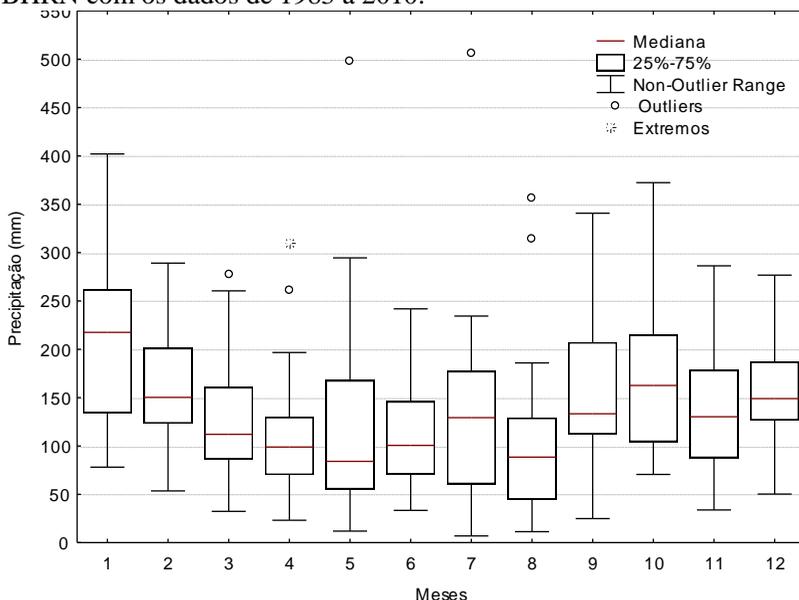


Figura 6.10 – Precipitação média mensal na BHRN.

A Figura 6.10 mostra que a região não apresenta estação caracterizada como seca, apenas os meses de setembro a março apresentam as maiores medianas mensais. A precipitação média mensal e anual é 140 e 1720 mm, respectivamente.

Na Figura 6.10 foram identificados alguns *outliers* e um valor extremo no período estudado. Os *outliers* e os valores extremos foram classificados como valores superiores a 1,5 e 3,0 vezes (respectivamente) a altura da caixa que representam os *quartis*.

Os *outliers* dos meses de maio e de julho representam a precipitação mensal nas duas maiores inundações da cidade de Rio Negrinho (julho de 1983 e maio de 1992). Nestas duas inundações os valores de precipitação mensal chegou próximo a 500 mm.

Os outros *outliers* representam a precipitação dos meses de março, abril e agosto de 1998. Segundo CPTEC (2010), no ano de 1998 a ocorrência do fenômeno El Niño foi classificada como intensa.

O valor extremo de precipitação do mês de abril foi também classificada inundação na cidade de Rio Negrinho. Na literatura, Giglio e Kobiyama (2011) e Dalagnol (1999), Schoeffel (2004) já evidenciaram a ocorrência deste evento extremo.

Com o modelo calibrado foi analisando o balanço hídrico (Figura 6.11 e Tabela 6.16) e distribuição de água e sedimento na BHRN no ano de 2010 (Figura 6.12).

Tabela 6.16 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação da precipitação, vazão, armazenamento e evapotranspiração.

	<i>Precipitação</i>	<i>Vazão</i>	<i>Aramazenamento</i>	<i>Evapotranspiração</i>
<i>Média (mm/mês)</i>	142,66	68,70	143,27	69,70
<i>Desvio Padrão (mm/mês)</i>	33,03	13,26	12,55	29,32
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	23,15	19,30	8,76	29,32

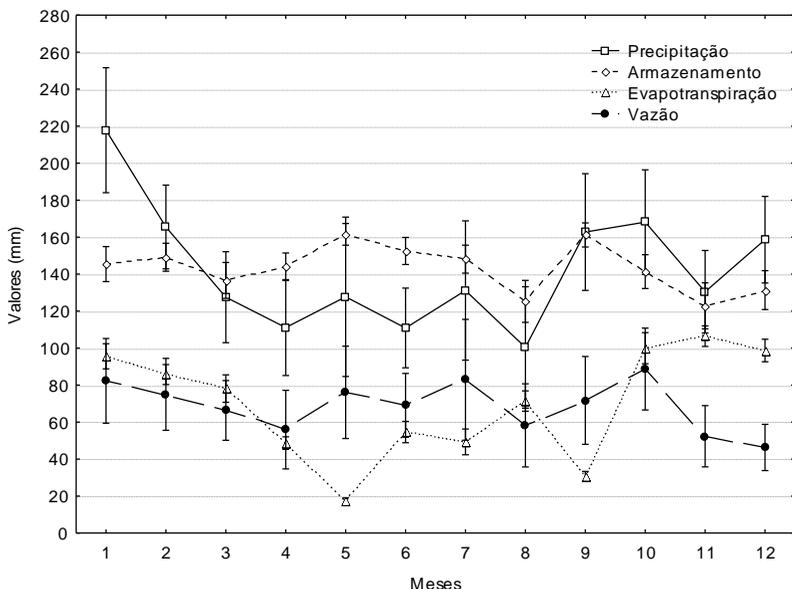


Figura 6.11 - Valores mensais de precipitação, vazão, evapotranspiração e armazenamento da água no solo nos meses do período analisado.

A Figura 6.11 apresenta os valores médios mensais com intervalo de confiança de 95% da precipitação, vazão, evapotranspiração e armazenamento da água no solo nos meses do período analisado. A partir da Figura 6.11 e Tabela 6.16, pode-se notar que os valores variam consideravelmente ao longo do ano, devido principalmente à sazonalidade do regime de precipitação. O coeficiente de variação da precipitação, vazão e evapotranspiração mensais foram de 23%, 20% e 30% respectivamente. Já o armazenamento de água no solo variou muito pouco ao longo do ano, apresentando seu coeficiente de variação de 8,7%.

Comparando o balanço hídrico do período analisado com o ano de 2010 pode-se observar que os meses de janeiro e abril a precipitação foi um pouco maior, chegando até 350 mm no mês de janeiro.

Em setembro de 2010 apresentou baixa pluviosidade (50 mm). A média da precipitação neste mês normalmente é 165 mm. Segundo relatos da população e base nos estudo de Giglio e Kobiyama (2011) e Dalagnol (1999) este mês nos últimos anos ocorreram diversas inundações.

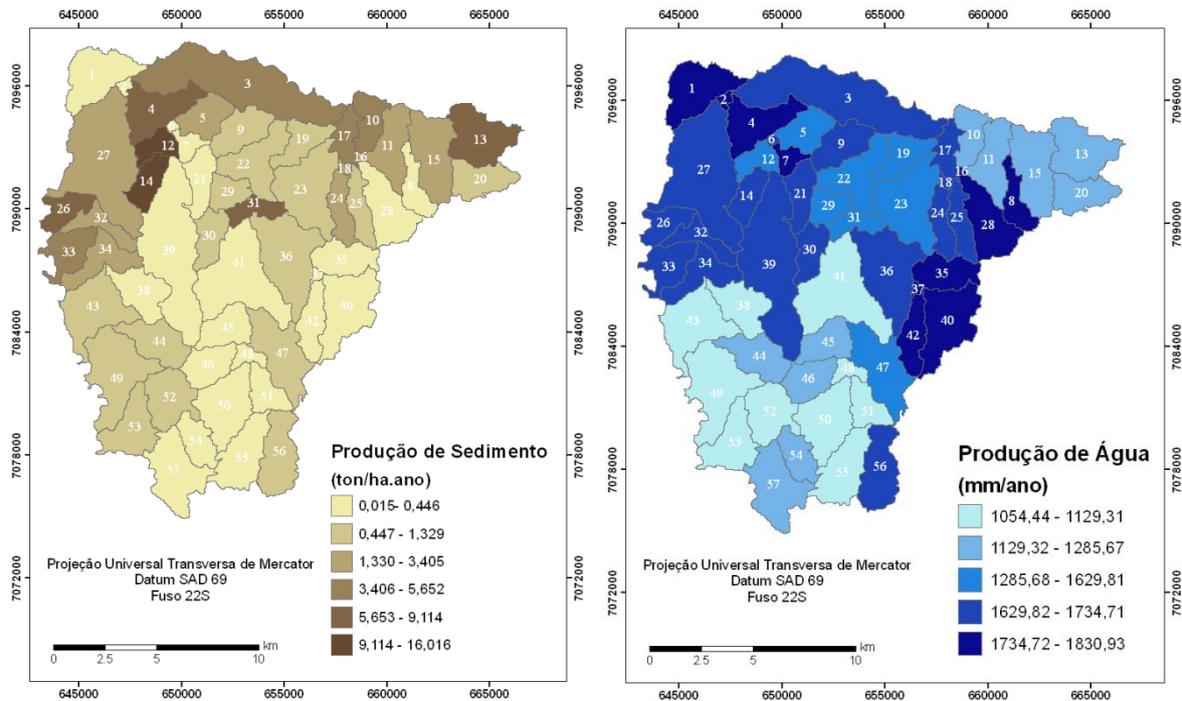


Figura 6.12 – Distribuição da produção de água da BHRN em 2010.

A Figura 6.12 mostra que a produção de água variou de 1054 a 1830 mm e a produção de sedimento foi de até 16,0 ton/ha.ano.

A menor produção de água foi evidenciada próximas as nascentes do Rio Negrinho e dos Rio dos Bugres. Esta área é a que menos sofreu intervenção das atividades antrópicas.

Entretanto as sub-bacias 54, 56 e 57 apresentam produção de água um pouco maior que o restante das sub-bacias desta região de cabeceira. Foi evidenciado que nas sub-bacias 54 e 57 a delicividade é maior que 20% em aproximadamente 40% e 70% em área, respectivamente. A sub-bacia 56 apresenta 20% da área com reflorestamento de pinus.

A região onde está localizada as sub-bacias 8, 28, 35, 37, 40 e 42 é caracterizado com um regime pluviométrico maior que o restante da baía. Além disso as sub-bacias 8 e 28 apresentam maior escoamento pois está parte oeste das nascentes da bacia já apresenta atividades antrópicas como áreas urbanas e pastagem. As sub-bacias 35, 37, 40, 42 apresetam significativa área com declividade maior que 20%.

A sub-bacia 08 apresentou maior escoamento. Ela é caracterizada por 25% de área de pastagem, 20% de área urbana (bairro Serra Alta – São Bento do sul) e 55% de mata nativa.

A sub-bacia que teve maior produção de sedimento foi a sub-bacia 12 que apresenta aproximadamente 15% da sua área coberta por pastagem, 17% coberta por pinus, 18% coberta por agricultura e 50% por mata nativa. Nesta bacia também a 11% em área de declividade maior de 20%.

Aplicando a metodologia proposta por Galindo e Margolis (1989) para os solos de SC, Bertol e Almeida (2000) mostraram que para Cambissolos húmicos o valor máximo de tolerância de perda de solo é  $0,74 \text{ ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Isto implica uma tolerância de perda de solo próxima de  $7,4 \text{ ton}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Principio do método proposto no item 5.3.3 foi calculada a tolerância de perda do solos para os solos da BHRN. A tolerância variou de 3,66 a 17,51  $\text{ton}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . Os solos que apresentaram menor tolerância foram o Ca47Pinus ( $3,66 \text{ ton}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ) e Ca9Pinus ( $4,50 \text{ ton}.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ).

A Tabela 6.17 mostra as principais sub-bacia que apresentaram no ano de 2010 produção de sedimento maior que a tolerância de perda de solo.

Tabela 6.17 – Produção de sedimento e tolerância de perda do solo nas sub-bacias da BHRN.

Sub-bacia	Tolerancia de perda de solo (ton.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Produção de sedimento (ton.ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup> )
03	3,66	5,39
10	3,66	4,18
12	8,32	16,01
14	8,32	12,89
17	4,50	5,65
31	3,66	9,11

As sub-bacias 12, 14, 17 e 31 apresentam maior produção de sedimento pois são áreas caracterizadas com declividade maior que 20% e seu cobertura vegetal de pinus, pastagem e agricultura.

Portanto as sub-bacias citadas na Tabela 6.17, que representam aproximadamente 11% da área da BHRN, apresentam produção de sedimento maior que a tolerância de perda de solo no ano de 2010.

A partir dos dados de precipitação, vazão total, escoamento superficial e produção de sedimento foi analisado a correlação entre os parâmetros simulados pelo modelo. A Figura 6.13 mostra a correlação entre precipitação, vazão total, escoamento superficial e produção de sedimento no meses de 2010 na BHRN. Nota-se que o escoamento superficial é o que mais está correlacionado com a produção de sedimento na bacia. Quando há menos de 20 mm de escoamento superficial a produção de sedimento é próxima de 0,10 ton.ha.ano<sup>-1</sup>.

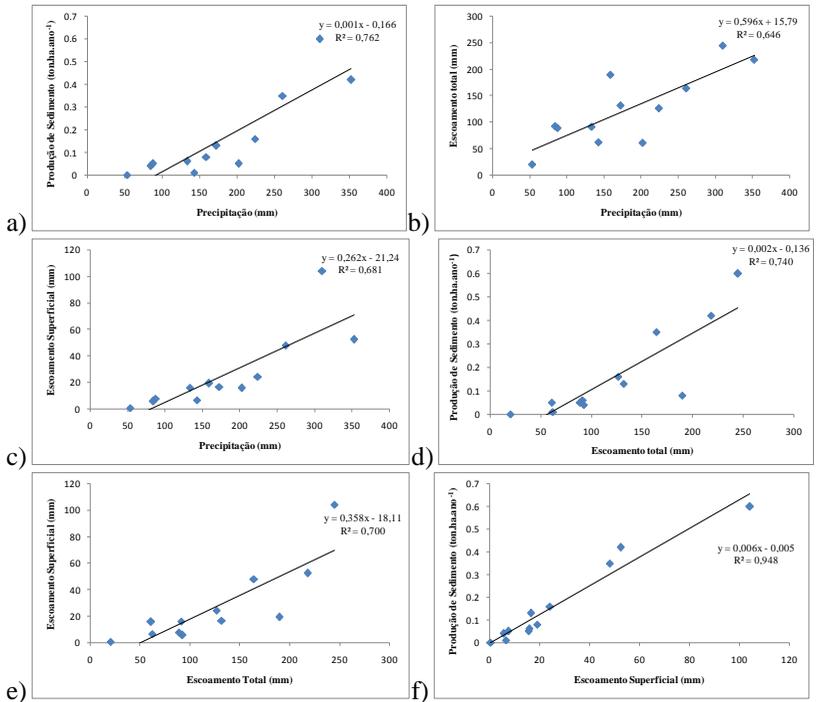


Figura 6.13 – Correlação entre precipitação, vazão total, escoamento superficial e produção de sedimento no meses de 2010 na BHRN.



## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação do modelo SWAT na BHRN apresentou bom ajuste com os dados de vazão e sedimento. Com a calibração manual foi atingindo um *NASH* de 0,52 para calibração e 0,61 para validação na secção Rio Negrinho Montante com dados diários. Na secção na SAMAE o *NASH* foi de 0,48. Acredita-se que o desempenho inferior na SAMAE foi devido ao curto período de dados observados.

A calibração com dados de sedimento também foi satisfatória. O melhor ajuste resultou um *NASH* de 0,43. Um dos fatores limitantes foi o pequeno período de dados, mesmo assim pode se dizer que o período analisado abrange a período seco e período úmido da região. O modelo parece responder a dinâmica hidrossedimentológica da BHRN. O CMR positivo evidencia que ao contrário da vazão, o modelo está subestimando os dados de sedimento.

Com a análise dos dados de sedimento no período de calibração foi encontrado uma média de 27 ton/dia. Mas pode se observar que há dias com grande produção de sedimento, principalmente nos dias que ocorrem aumento de vazão mas também há dias que a produção de sedimento aproxima de zero.

As sub-bacias que apresentaram menor produção de água são as sub-bacias localizadas nas nascentes do Rio dos Bugres e Rio Negrinho. Esta região ainda não sofreu muita intervenção antrópica.

Com a aplicação da teoria de tolerância de perda de solos para os solos da BHRN e com a análise espacial da distribuição de água e sedimento na BHRN no ano de 2010, foi possível evidenciar que 11,0% da área da bacia apresenta produção de sedimento maior que sua tolerância de perda de solo. As sub-bacias que apresentam maior produção de sedimento são áreas caracterizadas com declividade maior que 20% e cobertura vegetal de pinus, pastagem ou agricultura.

Com a análise temporal dos processos hidrológicos nos meses pode-se notar que os coeficientes de variação de precipitação, vazão e evapotranspiração são significativos, devido principalmente a sazonalidade. Porém o armazenamento da água do solo variou muito pouco. Isto mostra a importância de se preservar as propriedades hidráulicas do solo para que ele possa auxiliar no armazenamento das águas nas épocas chuvosas.

Analisando o balanço hídrico do período de 1983 a 2010 com o do ano de 2010 pode-se observar que os meses de janeiro e abril a precipitação foi um pouco maior, aproximadamente 350 mm. O mês de

setembro de 2010 apresentou baixa pluviosidade (50 mm). A média da precipitação neste mês normalmente é de 165 mm. Segundo relatos da população e base nos estudo de Giglio e Kobiyama (2011) e Dalagnol (1999) neste mês, nos últimos anos, ocorreram diversas inundações.

Um das sugestões para trabalhos futuros é a maior série na estação hidrossedimentológica da SAMAE e maior quantidade de amostras de sólidos em suspensão para que os dados possam ser mais representativos.

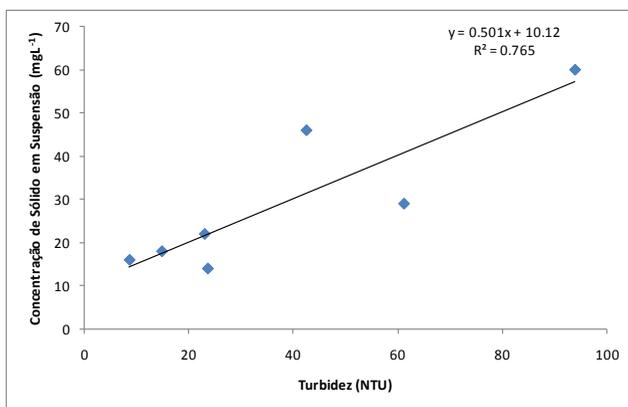
## 8. APÊNDICES

Tabela 1 - Medições de Vazão na SAMAE

Data	Cota (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade média (m/s)
24/07/2008	0,96	2,52	0,21
01/05/2009	0,78	0,87	0,07
01/10/2009	4,32	26,55	0,49
01/10/2009	4,22	25,93	0,49
02/05/2009	0,80	1,12	0,09
03/10/2009	3,84	21,31	0,45
03/10/2009	3,71	23,81	0,49
16/07/2009	1,02	3,63	0,25
23/08/2009	1,80	5,00	0,31
13/09/2009	2,15	13,88	0,43
30/09/2009	4,98	49,10	0,6
30/09/2009	4,75	30,75	0,53
10/05/2009	0,80	1,17	0,1
12/09/2009	2,68	18,51	0,473
12/09/2009	2,46	15,24	0,472

Tabela 2 - Coleta de amostra de Sólidos em Suspensão

Data	Cota (m)	Concentração sólidos suspensão (mg/L)	Turbidez (NTU)
26/08/2010	0,98	16	0,86
03/10/2010	1,15	29	61,2
05/10/2010	1,44	60	94,0
10/10/2010	0,96	18	14,8
07/11/2010	1,22	22	23,0
21/11/2010	0,92	14	23,6
01/12/2010	1,25	46	42,5



Correlação Turbidez – Sólidos em suspensão

Tabela3A – Dados físicos dos solos

NOME	Ca9 - Pinus	Ca9 - Nativa	Ca9 - Pasto
NÚMERO DE CAMADAS	3	3	2
GRUPO HIDROLOGICO	C	C	C
PROFUNDIDADE TOTAL	900	1300	1300
POROSIDADE DE ANIONS	0,5	0,5	0,5
SOLO CRK	1	1	1
<b>CAMADA 1</b>			
PROFUNDIDADE	300	400	750
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,05	1,05	2,03
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,12	0,14	0,09
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,74	1,74	2
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	6,24	5,9	3,54
ARGILA	18,77	15,76	28,9
SILTE	30,28	37,05	21,9
AREIA	50,58	47,09	49,2
ROCHA	0,09	0,1	0
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,0733	0,0690	0,0978
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
<b>CAMADA 2</b>			
PROFUNDIDADE	600	650	1300
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,05	1,05	2,09
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,15	0,12	0,11
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,74	1,74	0,72
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	5,58	3,68	3,43
ARGILA	21	27,53	30,8

SILTE	26,28	21,82	19,7
AREIA	52,27	48,88	49,5
ROCHA	0,45	1,29	0
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,0701	0,0885	0,0987
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
<b>CAMADA 3</b>			
PROFUNDIDADE	900	1300	-
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,05	1,05	-
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,17	0,15	-
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,74	1,74	-
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	4,03	4,03	-
ARGILA	5,3	25,63	-
SILTE	44,59	22,65	-
AREIA	49,8	50,44	-
ROCHA	0,31	0,31	-
ALBEDO	0,14	0,1	-
FATOR K USLE	0,1113	0,0894	-
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	-

Tabela3B– Dados físicos dos solos

NOME	Ca47 - Pinus	Ca47 - Nativa	Ca47 - Pasto
NÚMERO DE CAMADAS	3	2	3
GRUPO HIDROLOGICO	C		C
PROFUNDIDADE TOTAL	700	1400	1500
POROSIDADE DE ANIONS	0,5	0,5	0,5
SOLO CRK	1	1	1
<b>CAMADA 1</b>			
PROFUNDIDADE	250	850	600
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,95	1,95	1,95
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,14	0,15	0,12
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,17	1,17	1,17
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	4,28	4,72	8,23
ARGILA	17,3	24,7	17,18
SILTE	37,77	39,9	27,07
AREIA	44,7	35,4	55,54
ROCHA	0,24	0	0,33
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,1115	0,0714	0,1104
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
<b>CAMADA 2</b>			
PROFUNDIDADE	450	1400	800
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,95	1,95	1,95
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,14	0,12	0,12
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,11	1,11	1,11
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	2,53	5,88	7,15
ARGILA	29,62	15,7	16,89
SILTE	32,73	18,5	31,27
AREIA	34,91	65,8	51,51
ROCHA	2,73	0	0,32
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,1045	0,0659	0,0744

CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
CAMADA 3			
PROFUNDIDADE	700	-	1500
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,95	-	1,95
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,14	-	0,12
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,74	-	1,74
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	4,38	-	2,41
ARGILA	18,46	-	32,12
SILTE	37,2	-	25,69
AREIA	43,06	-	41,45
ROCHA	1,27	-	0,74
ALBEDO	0,14	-	0,25
FATOR K USLE	0,1107	-	0,0998
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1		1

Tabela3B– Dados físicos dos solos

NOME	Ca37 - Pinus	Ca37- Nativa	Ca37 - Pasto
NÚMERO DE CAMADAS	2	2	2
GRUPO HIDROLOGICO	C	C	C
PROFUNDIDADE TOTAL	1000	1400	800
POROSIDADE DE ANIONS	0,5	0,5	0,5
SOLO CRK	1	1	1
<b>CAMADA 1</b>			
PROFUNDIDADE	400	850	600
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	2,08	2,06	1,95
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,12	0,13	0,12
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,44	1,39	1,17
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	5,25	4,13	8,23
ARGILA	20,2	23,9	17,18
SILTE	31	28,6	27,07
AREIA	48,8	47,6	55,54
ROCHA	0	0	0,33
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,1071	0,0719	0,1223
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
<b>CAMADA 2</b>			
PROFUNDIDADE	1000	1400	800
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	2,07	2,07	1,95
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,14	0,14	0,12
CARBONO ORGÂNICO (%)	0,56	0,44	1,11
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	5,71	4,97	7,15
ARGILA	15,3	18,6	16,89
SILTE	39,6	34,7	31,27
AREIA	45,1	46,7	51,51
ROCHA	0	0	0,32
ALBEDO	0,14	0,1	0,25
FATOR K USLE	0,1196	0,0819	0,1196

Tabela3C– Dados físicos dos solos

NOME	Ca23 - Pinus	Ca23 - Nativa	Ca23 - Pasto
NÚMERO DE CAMADAS	1	1	1
GRUPO HIDROLOGICO			C
PROFUNDIDADE TOTAL	1010	1050	2000
POROSIDADE DE ANIONS	0,5	0,5	0,5
SOLO CRK	1	1	1
<b>CAMADA 1</b>			
PROFUNDIDADE	1010	1050	2000
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,97	1,95	1
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,17	0,19	0,14
CARBONO ORGÂNICO (%)	0,72	2,61	1,74
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	6,02	5,35	7,99
ARGILA	22,2	25,1	58,2
SILTE	47,4	55,9	22,5
AREIA	30,5	20	19,3
ALBEDO	0,1	0,14	0,25
FATOR K USLE	0,1223	0,1158	0,4
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1

Tabela3D– Dados físicos dos solos

NOME	Ca51 - Pinus	Ca51 - Pasto	Ca51 - Nativa
NÚMERO DE CAMADAS	1	1	2
GRUPO HIDROLOGICO	C	C	C
PROFUNDIDADE TOTAL	2000	2000	1200
POROSIDADE DE ANIONS	0,5	0,5	0,5
SOLO CRK	1	1	1
<b>CAMADA 1</b>			<b>CAMADA 1</b>
PROFUNDIDADE	2000	2000	770
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	1,1	0,9	1,93
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	0,17	0,14	0,16
CARBONO ORGÂNICO (%)	1,74	2,03	2,11
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	6,31	3,92	5,55
ARGILA	24,2	44	21,6
SILTE	13,5	31	43,3
AREIA	62,7	25	35,1
ALBEDO	0,1	0,1	0,14
FATOR K USLE	0,0617	0,1101	0,1121
CONDUTIVIDADE ELETRICA	1	1	1
<b>CAMADA 2</b>			
PROFUNDIDADE	-	-	1200
DENSIDADE DO SOLO (SOL_BD)	-	-	2,09
ÁGUA DISPONIVEL (mm/mm)	-	-	0,16
CARBONO ORGÂNICO (%)	-	-	0,39
CONDUTIVIDADE HIDRAULICA (mm/h)	-	-	4,80
ARGILA	-	-	18,4
SILTE	-	-	41,3
AREIA	-	-	40,3
ALBEDO	-	-	0,14
FATOR K USLE	-	-	0,0878
CONDUTIVIDADE ELETRICA	-	-	1



## 9. REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v.227, p.21-40, 2000.

BALTOKOSKI, V. **Modelo SWAT 2005 aplicado às sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco /PR**. 2008. 138f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008.

BENT, G.C. Effects of Forest-management activities on runoff components and ground-water recharge to Quabbin Reservoir, central Massachusetts. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.143, p.115-129, 2001.

BERTOL, I. & ALMEIDA, J.A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:657-668, 2000.

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

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrol. Sci. Bull.**, v.24, p.43–69, 1979.

BLAINSKI, E. GARBOSSA, L.H.P., MALUTTA, S. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. **In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Fortaleza.

BONUMÁ, N.B.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J. P.; BARROS, C. A. P.; RODRIGUES, M. F.; Buarque, D.C. Simulação da Vazão e da Produção de Sedimentos Utilizando o Modelo SWAT. **In: Engenharia de Sedimentos - Na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento**. Porto Alegre - RS: ABRH, 2011, v. , p.325 -341.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ABRH), 2000. p. 915-943.

CÂMARA, C. D. **Critérios e indicadores para o monitoramento hidrológico de florestas plantadas**. São Carlos, 2004. Tese (Doutor em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CHAFFE, P.L.B. **Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em interceptação**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

CHAFFE, P.L.B.; KOBIYAMA, M.; YAMASHIKI, Y.; TAKARA, K. Is interception information important for rainfall-runoff modeling? **Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE**, Tokyo, v.54, p.73-78, 2010.

CHANG, M. **Forest Hydrology: an introduction to water and forests**. Boca Raton: CRC Press, 2002. 373p.

CHOW, V.T. **Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology**. New York: MacGraw-Hill Book Co., 1964. 1v. (várias paginações).

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

COIADO, E.M. IN: PAIVA, J. B. e PAIVA, E. M. C. D. (Orgs.) **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p.280-281.

CPTEC. **Ocorrência de El Niño. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <[http://enos.cptec.inpe.br/tab\\_elnino.shtml](http://enos.cptec.inpe.br/tab_elnino.shtml)>. Acesso em 13 dezembro 2010.

DALAGNOL, E.F.N. **Caracterização e análise das enchentes em Rio Negrinho – SC no período de 1977 a 1995.** 57p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

DICKINSON, A.; COLLINS, R. Predicting erosion and sediment yield at the catchment scale. **Soil Erosion at Multiple Scales.** v. 20, p. 317-342, 1998.

DOOGLE, J. C. I 1973. **Linear Theory of Hydrologic Systems, Technical Bulletin** n. 1948, ARS, US Department of Agriculture.

EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WHITE, E.D.; COLLICK, A.S.; ASHARGE, B. B.; MCCARTNEY, M.; AWULACHEW, S.B.; AHMED, A. A.; STEENHUIS, T. S. A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 7, 3837–3878, 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina.** Boletim de Pesquisa n°6. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1998. 721p.

EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 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. Zoneamento Agroecológico. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/agricultura/zoneAgroecologico.js&tipo=agricultura>>. Acesso em: 10 de junho de 2009.

FAHEY, B.; JACKSON, R. Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.84, p.69-82, 1997.

FORD, A. **Modeling the Environment**. Washington: Island Press, 1999. 401p.

GALINDO, I.C.L.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do estado de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, 13:95-100, 1989.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L.R.C.; LAPA, K.R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. **In:** 2011 International SWAT Conference & Workshops. Espanha.

GARCEZ, L.N, ALVAREZ, G.A. (1988)\_**Hidrologia**. São Paulo: Edgard Blücher.

GIGLIO, J.N.; KOBIYAMA, M. Flood areas characteristics in Rio Negrinho city, Southern Brazil. **In:** 12th International Conference on Urban Drainage, 2011.

GRANDO, A. **Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental**. Florianópolis: UFSC/CTC/ECV, 2011. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

GRANDO, A.; MACIEL, C.B.; CORSEUIL, C.W.; MACCARINI, M.; KOBIYAMA, M.; HIGASHI, R.A.R. Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental. **In:** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2009: Campo Grande) Campo Grande: ABRH, Anais, 2009. CD-rom. 19p.

HEWLETT, J.D.; LULL, M.W.; REINHART, K.G. In defense of experimental watersheds. **Water Resour. Res.**, Washington, v.5, p.306-316, 1969.

HOPMANS, J.W. Experimental hydrology: A bright future. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v.29, p.117-120, 2006.

JACOBS, J.H.; ANGERER, J.; VITALE, J.; SRINIVASAN, R.; KAITHO, R. Mitigating Economic Damage in Kenya's Upper Tana River Basin: An Application of Arc-View SWAT. **Journal of Spatial Hydrology** Vol.7, No.1, p. 413-430, 2007.

JEONG, J., KANNAN, N., ARNOLD, J., GLICK, R., GOSSELINK, L., SRINIVASAN, R., Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-Runoff modeling capability within a watershed model. **Water Resources Management**.

JOHNSON, L.C. Soil loss tolerance: Fact or myth? **J. Soil and Water Cons.**, 42:155-160, 1987.

KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; CORSEUIL, C.W.; LINO, J.F.L.; LOPES, N.H.Y.; GRISON, F.; CHAFFE, P.L.B.; MALUTTA, S.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R.; BASSO, S. Forest hydrology project (UFSC-MOBASA) for water resources management in Rio Negrinho City, Santa Catarina, Brazil. In: VAN de GIESEN, XIA, J.; ROSBJERG, D.; FUKUSHIMA, Y. (eds.) Changes in Water Resources Systems: Methodologies to Maintain Water Security and Ensure Integrated Management, Wellington: IAHS, 2007. p.250-257. (IAHS Publication 315).

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, 1999. p.111-118. (Apostila do curso).

KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; CORSEUIL, C. W. **Recursos hídricos e saneamento**. 1a ed. Florianópolis: Ed. Organic Trading, 2008. 160p.

LELIS, T. A., CALIJURI, M. L. 2010. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. 5(2): 158-174

LINO, J.F.L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT** – Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2009.

LOPES, N.H.Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2008.

LOPES, N.H.Y.; KOBAYAMA, M. Análise do produção de sedimento e da qualidade da água em microbacia experimental com SWAT. **In**: VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (2008: Campo Grande) Campo Grande: UFMS, Anais, 2008. 13p.(CD-rom).

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.

MACIEL, C.B. **Análises geotécnicas e hidrossedimentológicas de estradas não pavimentadas: estudo de caso da Fazenda Cerro Azul - Planalto Norte Catarinense**. Florianópolis: UFSC/CTC/ECV, 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MACIEL, C.B.; GRANDO, A.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R.A.R. Caracterização de solos utilizados em estradas não pavimentadas: Avaliação de solos melhorados com vista na redução de processos erosivos. **In** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (2009: CampoGrande) Campo Grande: ABRH, Anais, 2009. CD-rom. 11p.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do Rio Negrinho - SC utilizando o HEC-HMS**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 50 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC).

MALUTTA, S.; KOBİYAMA, M. SWAT application to analyse the floods in Negrinho River basin – SC, Brasil. **In:** 12th International Conference on Urban Drainage, 2011.

MORIASI D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers** Vol. 50(3): 885–900.

MOTA, A.A. **Avaliação da Dinâmica da Água na Zona Vadosa em Solos de Diferentes Usos com o Modelo HYDRUS-1D.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 45f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC).

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

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture, 2007.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da; MATOS, A. T. de. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p.423-429, 2003.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI, A. J.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas.** Jaguariúna: EMBRAPA, CNPMA, 1997. 83p. (EMBRAPA. CNPMA. Documentos, 8).

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRINHO. Informações gerais. Disponível em: <<http://www.rionegrinho.sc.gov.br/caracteristicas.htm>>. Acesso em: 10 junho de 2009.

REID, I.; BARTHURST, J. C.; CARLING, P. A.; WALLING, D. E.; WEBB, B. Sediment Erosion, Transport and Deposition. **In:** THORNE, C. R.; HEY, R. D.; NEWSON, M. D. **Applied Fluvial Geomorphology**

**for River Engineering and Management.** New York: John Wiley & Sons, 1997. p. 95-135.

RODDA, J.C. Basin studies. In: RODDA, J.C. (ed.) **Facets of hydrology**, London: John-Wiley & Sons, 1976. p.257-297.

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, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica.** Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 2009. 167f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina

SANTOS, I.; FILL, H.D. ; SUGAI, M.R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada.** Porto Alegre: Editora da ABRH, 2001. 371 p.

SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: Teoria e Prática.** Sao Paulo: Oficina de Textos, 2004.184p.

SCHOEFFEL, E.C. **Relação cidade e natureza na evolução urbana da cidade de Rio Negrinho/SC associada à ocupação de áreas de risco de enchentes.** 76p. Monografia (Especialização em Cidade, Meio Ambiente e Políticas Públicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SILVA, A. M. da; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. de. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 320 p.

SMITH, D.D. & WHITT, D.M. Evaluating soil losses from field areas. **Agr. Eng.**, 29:394-396, 398, 1948.

SONG, X.; DUAN, Z.; KONO, Y.; WANG, M. Integration of remotely sensed C factor into SWAT for modeling sediment yield. **Hydrological Processes**, v.20, p.1439-1445, 2011.

SOUZA, A. M. L., **Estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação de modelagem hidrológica**. Porto Alegre. 2010. 128f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SPAROVEK, G. e VAN LIER, J.Q. Definition of tolerable soil erosion values. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:467-471, 1997.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Res. Bull**, v.30, p. 453-462, 1994.

STAMEY, W.L. & SMITH, R.M. A conservation definition of erosion tolerance. **Soil Sci., Baltimore**, 97:183-186. 1964.

STAMEY, W.L. & SMITH, R.M. How to establish erosion tolerances. **J Soil and Water Cons.**, Fairmont, W. Va. 19(3):110-111, 1964

TOEBES, C.; OURRYVAEV, V. **Representative and experimental basins: an international guide for research and practice**. Haarlem: UNESCO, 1970. 348p.

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

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª edição, Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2004.

UDA, P. K. **Análise de Evapotranspiração Potencial Distribuída por Meio de Imagens NDVI, na Bacia do Rio Negrinho - SC.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2010. 84f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC).

UDA, P.K.; CORSEUIL, C.W.; NETTO, A.O.A.; BORTOLOTTI, N.L. Análise da Evapotranspiração Potencial Distribuída por meio de Imagens NVDI, na Bacia do Rio Negrino, SC. **In:** IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal. Curitiba: CIETEP, Anais, 2010. 8p.

VAN LIEW, M. W.; GARBRECHT, J. (2003) Hydrologic simulation of the little washita river experimental watershed using SWAT. **Journal of the American Water Resources Association.** p. 413 – 426. 2003.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental Hydrology.** 2ed. Boca Raton: CRC/Lewis, 2004. 475p.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, v.111, p.89-106, 1989.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. Washington D.C., **Departament of Agriculture**, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)