

Programa de Pós-Graduação em **Engenharia Civil e Ambiental**

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Departamento de Engenharia Civil

**SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA
DA BACIA DO RIACHO DOS NAMORADOS
COM O MODELO SWAT**

JOSÉ GUIMARÃES DE CARVALHO NETO

Campina Grande
Data: FEVEREIRO / 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIACHO DOS
NAMORADOS COM O MODELO SWAT**

JOSÉ GUIMARÃES DE CARVALHO NETO

CAMPINA GRANDE-PB

FEVEREIRO DE 2011

JOSÉ GUIMARÃES DE CARVALHO NETO

**SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIACHO DOS
NAMORADOS COM O MODELO SWAT**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, na área de Engenharia de Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

ORIENTADORES: Prof. PhD. Vajapeyam S. Srinivasan. UAEC/CTRN/UFCG
Prof. Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino. UAEC/CTRN/UFCG

**CAMPINA GRANDE-PB
FEVEREIRO DE 2011**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

C331s

Carvalho Neto, José Guimarães de.

Simulação hidrossedimentalógica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT / José Guimarães de Carvalho Neto. — Campina Grande, 2011.
216 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Ph.D. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, Prof^o. Dr^a Iana Alexandra Alves Rufino.

1. Bacias Hidrográficas. 2. Geração de Escoamento Superficial. 3. Produção de Sedimentos. 4. SWAT (Soil and Water Assessment). I. Título.

CDU – 556.51(043)

JOSÉ GUIMARÃES DE CARVALHO NETO

**SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIACHO DOS
NAMORADOS COM O MODELO SWAT**

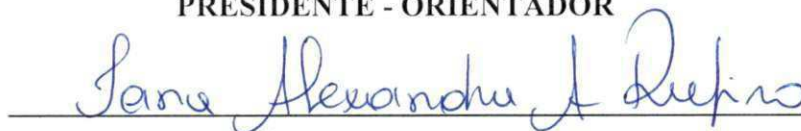
APROVADA EM 28/02/2011

PELA SEGUINTE COMISSÃO EXAMINADORA:



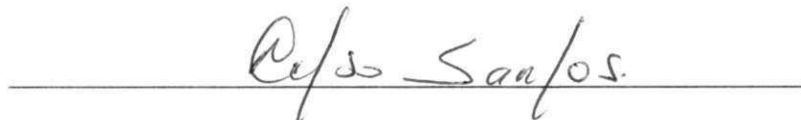
Prof. Phd. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

PRESIDENTE - ORIENTADOR



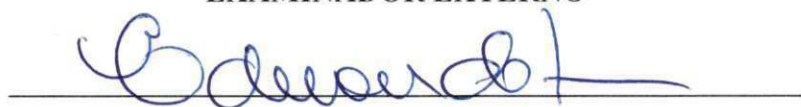
Prof. Dr.^a. IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO

CO-ORIENTADOR



Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS

EXAMINADOR EXTERNO



Prof. Dr. EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO

EXAMINADOR INTERNO

CAMPINA GRANDE-PB

FEVEREIRO DE 2011

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo esforço e comprometimento,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais. Meu pai, José Antônio Xavier Neto, por demonstrar enorme capacidade e força de vontade ao se graduar em outro Estado, em tempos difíceis, sem jamais perder a perseverança e sendo um aluno notável. Minha mãe, Geovânia Nunes de Carvalho Xavier, cujo o gosto pela leitura e conhecimento em muito influenciou minha pessoa, também superando obstáculos para alcançar a titulação de mestre em filosofia. A vocês, meu primeiro agradecimento. Agradeço também a minha irmã, Bárbara Nunes de Carvalho Xavier, por ser uma boa amiga e estar se tornando uma grande pessoa.

Agradeço a meus avôs e avós, por terem sido grande exemplo de luta, honestidade e perseverança.

Aos amigos Otávio Augusto e Thiago Euzébio, por estabelecerem o alicerce fundamental da minha estada em Campina Grande. O primeiro, inclusive, foi parceiro de muitos debates sobre a vida acadêmica durante a graduação – o que fortaleceu esta minha inclinação que agora se torna realidade. O segundo por ser um suporte seguro de informações e críticas sobre conhecimento e tecnologia, sendo um “porto-seguro” nesta cidade – até então desconhecida por mim.

Pelo nome de Thaynara Rabelo, Luigi Antônio, Carlos Eduardo e do Professor Renan Tavares agradeço a todos os colegas e corpo docente da graduação de engenharia ambiental da Universidade Tiradentes, em que o ambiente agradável foi, deveras, essencial para o meu objetivo profissional.

Pelos nomes dos grandes amigos Tássio de Souza, Victor Acioli, Pedro Ivo, Caroline Barros e Glauberton Max agradeço a todos os demais, pela convivência sólida e equilibrada de divertimento e seriedade.

A Viviane Leal Dantas um grande agradecimento pela estimada força no difícil primeiro ano de mestrado.

Lorena Brizza Soares Freitas, a você um agradecimento especial, repleto de carinho. Muito obrigado pelo importante suporte e incentivo a mim dedicado em momentos difíceis.

Agradeço a Gisele Baldisserra, a Nancy Sammons – representando toda a equipe do SWAT – e, de forma especial, a Nádia Bonumá pela cooperação solidária e precisa nas mais diversas dúvidas que surgiram durante o trabalho. Também fico

bastante grato a colaboração dos professores Lêde Chaves, Hugo Alcântara e Ricardo Aragão e do colega de laboratório John Elton no firmamento deste trabalho.

Ao professor orientador Vajapeyam S. Srinivasan pelo seu vasto conhecimento e sabedoria, proporcionando uma orientação firme e segura em todos os aspectos, em muito agradeço. Sinto-me honrado.

Muito agradeço pela colaboração dos avaliadores professores Celso Augusto Guimarães e Eduardo Enéas Figueiredo, cujas abordagens e contribuições na defesa foi bem definida pelo professor Srinivasan: uma aula.

Pelos nomes das professoras Márcia Maria Rios Ribeiro e Iana Alexandra Alves Rufino, cuja entrevista no processo seletivo tornou-se fato histórico em minha vida, agradeço a todo o corpo docente do programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.

Pelo nome do grande e estimado amigo Zacarias Caetano Vieira, agradeço aos demais colegas do mestrado e do laboratório BU.

Aos funcionários do AERH dedico agradecimento especial, pelo bom humor sempre presente nos corredores, proporcionando um ambiente saudável e que desde já sinto saudades.

Pelos nomes de Elliott Victor e Rafael Leal, agradeço aos demais amigos que fiz nesta cidade. Ao primeiro quero registrar sua grande habilidade em informática, "salvando" meu *notebook* em um momento vital do andamento deste trabalho.

A CAPES pelo suporte financeiro, através da bolsa de mestrado, tornando possível minha estabilidade durante todo o curso.

A cidade de Campina Grande, por ter proporcionado diversos encontros e desencontros que produziram uma experiência de vida inestimável em minha pessoa.

Por fim, sinto-me um vitorioso ao ter terminado esta etapa determinante em minha vida e poder dar prosseguimento para um novo passo.

EPÍGRAFE

**“Eu prefiro um galope soberano,
A loucura do mundo me entregar.”**

Zé Ramalho

RESUMO

Nas regiões em que a rede de monitoramento hidrossedimentológico é precária ou inexistente, a utilização de modelos hidrológicos, de base física que proporcionem estimativas da geração de escoamento superficial e a perda de solo, se torna muito útil para fins de planejamento das bacias hidrográficas. A presente dissertação trata da aplicação do modelo hidrossedimentológico SWAT para a Bacia do Riacho dos Namorados e para as Sub-Bacias 1 e 2 da Bacia Experimental de São João do Cariri. O modelo, junto com a interface ArcSWAT, do SIG, necessita da entrada de "Modelo Digital de Elevação" (MDE) da bacia. Foram utilizados dois diferentes MDEs nas simulações com o modelo para fins comparativas: um gerado a partir da interpolação de dados de campo e outro obtido através de sensoriamento remoto. Em nível das sub-bacias experimentais, foi realizada a parametrização, na Sub-Bacia 2, e a validação, na Sub-Bacia 1. O desempenho do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2) e do fator da eficiência de Nash-Sutcliffe. A Bacia do Riacho dos Namorados foi simulada pelo modelo parametrizado na situação atual do uso do solo, com e sem a presença de açudes. Estas simulações permitiram uma avaliação da influência dos açudes. Para avaliar os efeitos das mudanças do uso do solo na Bacia de Riacho dos Namorados, outros quatro cenários em que a bacia poderia estar com: (1) a vegetação nativa (caatinga), (2) reflorestada com Algaroba, (3) com a monocultura de milho, e (4) totalmente desmatada, também foram simulados com o modelo. A influência dos açudes na bacia foi caracterizada pela atenuação da vazão líquida e da carga de sedimentos. Entre os cenários simulados, verificou-se que a situação do reflorestamento com algaroba protegeria a bacia melhor do que a caatinga e, a cultura de milho é apenas melhor que o solo nu em termos da erosão. Em conclusão, o modelo SWAT apresenta-se como uma boa ferramenta para simulação hidrossedimentológica na região do Cariri paraibano.

Palavras Chave: geração de escoamento superficial, produção de sedimentos e SWAT ("Soil and Water Assessment Tool")

ABSTRACT

In the regions where the monitoring network for runoff and erosion is deficient or inexistent, the use of hydrological models can provide reasonable estimates of surface runoff and soil loss, for watershed planning. This study deals with the application of the model SWAT (**S**oil **W**ater **A**ssessment **T**ool) in the "Riacho dos Namorados" Watershed and two of its sub-basins, 1 and 2 in the "São João do Cariri" Experimental Basin. The model, with the GIS interface ArcSWAT, requires the "Digital Elevation Model" (DEM) of the basin. The simulations were carried out using two different DEMs for the purpose of comparison: one was derived from the interpolation of field data and the other obtained through remote sensing. The model parameterization was done in the sub-basin 2 and the validation performed in sub-basin 1. The model performance was evaluated by the determination coefficient (R^2) and of the efficiency factor of Nash-Sutcliffe. Riacho dos Namorados Watershed was simulated by the model under the present conditions of land use, by considering the presence of storage dams in one case and by ignoring them in another. These simulations permitted an evaluation of the influence of the dams. In order to evaluate the effects of changes of land use in the Riacho dos Namorados Watershed, four other scenarios in which the basin could be found were simulated in which the soil use considered were: (1) the native vegetation, (2) reforested with Mesquite (*Prosopis Juliflora*), (3) with the monoculture of corn, and (4) soil cleared bare. The influence of the dams in the basin simulated by the SWAT model was the attenuation of both surface flow and the sediment load. Among the simulated scenarios, reforestation with Mesquite protected the watershed against erosion better than the native vegetation "caatinga" and the cultivation of corn was just better than bare soil surface in terms of erosion. In conclusion, the SWAT model presented itself as a good tool for hydrosedimentological simulation in the region of Cariri in Paraíba.

Key-Word: surface runoff, sediment yield and SWAT (Soil and Water Sediment Tool)

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS DO ANEXO 2	XVI
LISTA DE FIGURAS DO ANEXO 3	XVI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Ciclo Hidrológico	5
2.2 Bacia Hidrográfica e Balanço Hidrológico	8
2.3 Ciclo Hidrossedimentológico e suas implicações	10
2.4 Taxa de Transporte de Sedimentos e Efeito de Escala.....	15
2.5 Modelos Hidrológicos	18
2.5.1 Aplicações do SWAT	22
2.6 Geoprocessamento e SIG.....	27
2.7 SIG e Modelos Hidrológicos	30
2.7.1 Abordagens de Integração	32
CAPÍTULO 3 O MODELO SWAT E SEUS COMPONENTES.....	34
3.1 O Modelo "Soil And Water Assessment Tool".....	34
3.2 Equações do Modelo SWAT.....	38
3.2.1 Fase da terra	38
3.2.2 Fase da água ou de propagação.....	56
3.2.3 Reservatórios	59
3.3 ArcSWAT.....	60
CAPÍTULO 4 ÁREA DE ESTUDO E GERAÇÃO DE BANCO DE DADOS	62
3.2 Área de Estudo	62

	XI
4.1.1	Breve Histórico e Relevância 62
4.1.2	Localização..... 63
4.1.3.	Características Físico-Climáticas da Bacia Riacho dos Namorados..... 66
4.1.4	Unidades Experimentais da BESJC 70
4.1.5	Coleta de Dados..... 72
4.1.6	Dados utilizados 72
4.2	Geração do Banco de Dados 73
4.2.1	Modelo Digital de Elevação..... 73
4.2.2	Uso e Ocupação do Solo..... 74
4.2.3	Parâmetros e Tipo de Solo..... 75
4.2.4	Parâmetros Climáticos..... 82
4.2.5	Açudes 85
4.2.6	Outros Parâmetros..... 86
CAPÍTULO 5	APLICAÇÃO DO MODELO SWAT 88
5.1	Processo de Parametrização / Calibração e Validação 88
5.2	Cenários para a Bacia Riacho dos Namorados..... 91
5.3	Período de Aquecimento do Modelo..... 93
5.4	Delimitação das sub-bacias e determinação das URH 94
5.4.1	Delimitação das Sub-Bacias 1 e 2..... 95
5.4.2	Delimitação da Bacia Riacho dos Namorados 101
5.5	Parametrização na Sub-Bacia 2..... 107
5.5.1	Escoamento na Sub-bacia 2..... 108
5.5.2	A Produção de Sedimentos..... 116
5.6	Validação na Sub-Bacia 1..... 119
5.6.1	Lâmina Escoada..... 119
5.6.2	A Produção de Sedimentos..... 121

5.7	Resumos e Visualização Espacial dos Resultados	124
5.8	Cenário 1 – Condição Atual com a Presença de Açudes	133
5.9	Cenário 2 – Condição Atual Sem a Presença dos Açudes.....	140
5.10	A Influência dos Açudes sobre o Escoamento e o Transporte de Sedimentos	144
5.11	Cenário 3 – Simulação com Cobertura Vegetal Uniforme "Range-Brush"	149
5.12	Cenário 4 – Simulação com a Bacia Coberta por Algaroba	151
5.13	Cenário 5 – Simulação com o Plantio de Milho	153
5.14	Cenário 6 – Simulação da Condição da Bacia Totalmente Desmatada.....	155
CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		158
6.1	Delimitação das Bacias	158
6.2	Escoamento Superficial para as Sub-Bacias 2 e 1	159
6.3	Aporte e Produção de Sedimentos para as Sub-Bacias 2 e 1	161
6.5	Distribuição Espacial dos Resultados Obtidos nos Cenários	167
6.6	Cenários 1 e 2.....	172
6.7	Cenários 3, 4, 5 e 6	176
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		178
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		181
ANEXO 1		195
ANEXO 2		198
ANEXO 3		200
ANEXO 4		201

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ciclo Hidrológico	7
Figura 2.2 Formas de erosão.....	11
Figura 2.3 Taxa de entrega de sedimentos para várias bacias.....	17
Figura 2.4 Valores da produção de sedimentos em suspensão em função da área da bacia para várias partes do mundo.	18
Figura 3.1 Origem do modelo SWAT.....	35
Figura 3.2 Fluxograma dos processos de execução do modelo SWAT.....	37
Figura 3.3 Variação de ESCO para a máxima demanda evaporativa e profundidade do solo ...	50
Figura 3.4 Diferentes valores de SURLAG em função da retenção do escoamento superficial e o tempo de concentração (h).....	52
Figura 4.1 Localização das mesorregiões e microrregiões do Estado da Paraíba.....	64
Figura 4.2 Região do Cariri Paraibano, Bacias dos Rios Taperoá e Paraíba e localização da BESJC no Estado da Paraíba.	1
Figura 4.3 Limitação da BESJC (de verde) e suas unidades experimentais.....	65
Figura 4.4 Classes de solo da Bacia do Riacho dos Namorados	67
Figura 4.5 Classes de vegetação na Bacia do Riacho dos Namorados	69
Figura 4.6 Vertedor da Sub-Bacia 1	70
Figura 4.7 Vertedor da Sub-Bacia 2.....	71
Figura 4.8 - Delimitação da SB1 e SB2	71
Figura 4.9 Janela de edição de dados da cobertura do solo pela interface ArcSWAT	76
Figura 4.10 Reclassificação da cobertura do solo como dado de entrada para a simulação no modelo SWAT.....	76
Figura 4.11 Reclassificação dos tipos de solo como dados de entrada para simulação no modelo SWAT.....	77
Figura 4.12 Classificação Textural do Solo	79
Figura 4.13 Janela de inserção dos dados de solo na interface ArcSWAT	80
Figura 4.14 Inserção de parâmetros climáticos	84

Figura 5.1 Mapa de solo na área das sub-bacias 1 e 2	89
Figura 5.2 Mapa de cobertura do solo na área das sub-bacias 1 e 2.....	90
Figura 5.3 Definição da simulação com solo exposto diretamente no modelo	92
Figura 5.4 Mapa da delimitação automática a partir do MDE interpolado de 20 m (A) e do MDE ASTER (B) das sub-bacias 1 e 2	99
Figura 5.5 Mapa da identificação dos solos nas sub-bacias delimitadas pelo interpolado de 20 m (A) e pelo MDE ASTER (B)	99
Figura 5.6 Mapa da identificação da cobertura do solo pela delimitação a partir do MDE interpolado (A) e do MDE ASTER (B)	100
Figura 5.7 Mapa da distribuição da ocorrência das declividades para MDE interpolado (A) e do MDE ASTER (B).....	100
Figura 5.8 Mapa da distribuição dos dois tipos de solo na Sub-Bacia 2.....	101
Figura 5.9 Mapa do resultado da delimitação da Bacia do Riacho dos Namorados utilizando o interpolado (A) e o MDE ASTER (B)	103
Figura 5.10 Mapa da distribuição das classes de declividade utilizando o interpolado (A) e o MDE ASTER (B).....	104
Figura 5.11 Mapa dos tipos de solo após o resultados das simulações na Sub-Bacia 2.....	104
Figura 5.12 Mapa da cobertura do solo para o cenário 1 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)	105
Figura 5.13 Mapa da cobertura do solo para o cenário 1 através do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)	105
Figura 5.14 Mapa da cobertura do solo para o cenário 2 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)	106
Figura 5.15 Mapa do tipo de solo para o cenário 2 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B) .	107
Figura 5.16 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os perfis de solo 31-41 para a Sub-Bacia 2.....	110
Figura 5.17 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os perfis de solo 31-41 para a Sub-Bacia 2.....	110
Figura 5.18 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2.....	111

Figura 5.19 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2	112
Figura 5.20 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2	112
Figura 5.21 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2	113
Figura 5.22 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos	114
Figura 5.23 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos	115
Figura 5.24 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos	115
Figura 5.25 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos	116
Figura 5.26 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 1	119
Figura 5.27 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 1	120
Figura 5.28 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2004 pelo MDE interpolado	127
Figura 5.29 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2004 pelo MDE interpolado	128
Figura 5.30 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2005 pelo MDE interpolado	129
Figura 5.31 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2005 pelo MDE interpolado	130
Figura 5.32 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2006 pelo MDE interpolado	131
Figura 5.33 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2006 pelo MDE interpolado	132
Figura 5.34 Mapa do assoreamento das Sub-Bacias pelo MDE interpolado	133
Figura 6.1 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 1994 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)	167
Figura 6.2 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 1994 pelo MDE ASTER no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)	168

Figura 6.3 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)	168
Figura 6.4 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE ASTER.....	169
Figura 6.5 Mapa do assoreamento no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE interpolado, entre 1988 a 2006	169
Figura 6.6 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e pelo cenário 2 (B).....	170
Figura 6.7 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B).....	170
Figura 6.8 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 3 (A) e no cenário 4 (B).....	171
Figura 6.9 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 5 (A) e no cenário 6 (B).....	171

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO 2

Figura 1 Mapa da distribuição das elevações pelo MDE interpolado(A) e pelo MDE ASTER (B) nas sub-bacias delimitadas.....	1
Figura 2 Mapa da localização das sub-bacias delimitadas pelo MDE interpolado (A) e pelo MDE ASTER (B) inseridas na Bacia do Riacho dos Namorados	1
Figura 3 Mapa do intervalo de altitude da delimitação com MDE interpolado (A) e com o MDE ASTER (B).....	199

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO 3

Figura 1 Mapa do assoreamento no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE ASTER, entre 1988 a 2006.....	1
--	---

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO 4

Figura 1 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 no cenário 3 (A), coberto por "range brush", no cenário 4 (B), coberto por algaroba, no cenário 5 (C), coberto por milho e no cenário 6 (D), sem cobertura, pelo MDE ASTER	1
---	---

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Na região semi-árida do Nordeste do Brasil, onde a baixa precipitação anual concentrada em geral em um único quadrimestre, o aproveitamento racional da água se torna fundamental. O Nordeste brasileiro apresenta também solos rasos, com uma camada de nutrientes fina, tornando o processo erosivo associado as chuvas bastante preocupante. Em outras palavras, no Nordeste a pouca chuva que promove as atividades de campo e a sobrevivência da população rural também provoca a erosão e a conseqüente degradação da terra.

A degradação da terra está associada com a degradação dos solos, dos recursos hídricos e da vegetação e a ação do homem ainda pode acelerar os processos e suas conseqüências, provocando a desertificação em diversas regiões semi-áridas no mundo (Ministério do Meio Ambiente, 2007). As ações antrópicas também favorecem as mudanças climáticas que podem fomentar a desertificação em diferentes áreas do planeta (Dhar, 2009). Tratam se de ações potencialmente devastadoras para as regiões mais carentes de fenômenos de precipitação.

A Paraíba, um Estado situado no Nordeste brasileiro, possui grande parte de sua área no clima semi-árido e suscetível à desertificação e muito desta área apresenta focos graves deste processo (Ministério do Meio Ambiente, 2007). E, diante da luta contra os efeitos perversos da seca, foram construídas diversas barragens e açudes para armazenar as águas da chuva e torná-las disponíveis no período de estiagem. Contudo, a existência de muitos pequenos açudes no Estado em muito pouco proporciona tranquilidade às comunidades dependentes, haja vista que muito do volume armazenado se perde por evaporação.

Sendo assim, há uma grande necessidade de um planejamento e gerenciamento adequado e adaptativo da água na região do nordeste. Para tal, a aplicação de ferramentas capazes de fornecer informações confiáveis sobre o escoamento superficial gerado e a erosão do solo associado a este processo se torna

imprescindível. Modelos hidrológicos são ferramentas capazes simular processos hidrológicos quando não são disponíveis normalmente. Há os modelos ditos distribuídos que quantificam espacialmente dentro da área da bacia a ocorrência dos processos hidrológicos, gerando informações que relacionam a topografia, cobertura e tipo de solo a tais processos.

A Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), no Estado da Paraíba, inserida no clima semi-árido, tem sido alvo da aplicação de diversos modelos hidrológicos em pequenas escalas. Esta bacia é representativa da região semi-árida, de modo que estudos nela realizados podem ser estendidos para outras áreas semelhantes. O grupo de recursos hídricos da Universidade Federal de Campina Grande há muito tempo desenvolve projetos e pesquisas nesta bacia, utilizando diversos modelos hidrológicos em diversas unidades experimentais que ali foram criadas. Tais unidades experimentais possuem tamanho reduzido (parcelas e microbacias) além de sub-bacias (Srinivasan, 2003). Contudo, havia a necessidade de se trabalhar em maior escala e ampliar os trabalhos de modelagem, tornando possível também o estudo da influência dos açudes neste processo.

Entre os diversos modelos hidrossedimentológicos disponíveis, o modelo SWAT (*Soil And Water Assessment Tool*) apresentou grande destaque, com seu uso em ampla ascensão em todo o mundo. Este modelo pode utilizar dados provenientes do sensoriamento remoto tais como os Modelos Digitais de Elevação adquiridos por sensores orbitais além de outros mapeamentos como dados de cobertura e tipo de solo. As tecnologias atuais permitem assim, a aquisição de tais dados através de satélites, o que possibilita a execução do modelo em áreas que não possuem estes levantamentos de campo.

Dito isto, o objetivo geral deste trabalho é de aplicar o modelo SWAT, explorando as possibilidades de integração eficiente com um Sistema de Informações Geográficas, em duas unidades experimentais e em toda área da Bacia do Riacho dos Namorados, visando adquirir resultados concretos com a viabilidade do uso deste modelo na região semi-árida. Entre os objetivos específicos encontram-se:

- Parametrizar o modelo SWAT para duas sub-bacias inseridas na Bacia Experimental de São João do Cariri, usando de forma integrada o modelo e o SIG;
- Simular os processos hidrossedimentológicos, na escala de tempo mensal, na Bacia do Riacho dos Namorados para gerar estimativas anuais de escoamento superficial e erosão do solo;
- Avaliar a influência dos açudes presentes na Bacia sobre os processos de escoamento e erosão;
- Simular os efeitos da mudança de uso do solo para diversos cenários;
- Estabelecer comparações objetivas quanto ao uso do modelo digital de elevação enquanto dado de entrada para o modelo SWAT, e
- Avaliar os resultados e o processo de trabalho integrado (modelo hidrológico com o SIG).

O presente documento encontra-se dividido em sete capítulos, incluindo este primeiro. A revisão bibliográfica, tratando dos principais temas que embasam este trabalho, está no capítulo dois. O ciclo hidrológico, os processos na bacia e modelo hidrológicos são abordados, além de sistemas de informações geográficas.

O capítulo três traz a descrição do modelo SWAT e a interface que foi utilizada, de modo a fazer um breve apanhado de trabalhos anteriores e dos principais componentes da simulação. A descrição da área de estudo está apresentada no capítulo quatro, incluindo um breve histórico da implantação da BESJC bem como os aspectos físico-climáticos. Ainda neste capítulo será tratada a criação do banco de dados para execução do modelo SWAT.

O capítulo cinco trata da aplicação do modelo SWAT, descrevendo o processo de parametrização e a escolha dos cenários. A execução do modelo nas duas Sub-Bacias, inseridas na BESJC, resultaram na parametrização do modelo e a sua eficiência verificada – realizado através do Coeficiente de Nash e R^2 . Foram ao todo seis cenários, entre os quais aqueles que buscavam avaliar a influência dos açudes. Todas as simulações foram realizadas utilizando dois diferentes modelos digitais de elevação, um gerado por dados de campo e outro por satélite, com o intuito de adquirir conhecimentos suficientes sobre o efeito deste importante dado de entrada nos

resultados da simulação do modelo SWAT. As discussões e análises dos resultados são apresentadas no capítulo seis. Enquanto que as conclusões e recomendações estão no capítulo sete.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é observado como um processo fechado, em nível global, no qual a água circula entre os reservatórios terrestres (continentes e oceanos) e atmosférico, impulsionada, principalmente, pela energia solar sob os três estados físicos (líquido, gasoso e sólido) (Tucci, 2009). Papel importante também é atribuído à gravidade, fundamental no processo de precipitação e dos diversos fluxos de água na superfície (Hornberger, 1998).

Observa-se que o fluxo de água se dá entre os reservatórios e quando o fluxo é da superfície para a atmosfera ocorre predominantemente no estado de vapor – devido principalmente ao processo de evapotranspiração. Da atmosfera para a superfície, a transferência de água pode ocorrer nos três estados físicos, sendo a precipitação da chuva em estado líquido o mais representativo (Tucci, 2009). “Processos hidrológicos” é o nome dado a estas passagens da água pelo espaço e tempo, delineando o ciclo hidrológico (Chow, 1964).

Por tratar-se de algo cíclico, qualquer etapa pode ser acionada como a primeira, mas a precipitação é o motor principal dos estudos hidrológicos e por ela serão mais bem explicados os fenômenos.

- Precipitação: trata-se de toda água que passa da atmosfera para o continente, seja em qual for o estado físico. Possui forte dependência quanto à localização geográfica – latitude, elevação e distância do mar (Hornberger, 1998).
- Interceptação: trata-se de toda a água proveniente de um evento de precipitação que é retida acima do solo, principalmente sobre os vegetais. Dito isto, trata-se de um fenômeno intimamente relacionado às condições dos vegetais e ao clima (Tucci, 1997).

- Infiltração e percolação: o primeiro trata da passagem da água da superfície para o interior do solo, enquanto o segundo diz respeito ao movimento descendente da água para as camadas inferiores do solo (Tucci, 2009). É possível que percolação seja rasa, alimentando os corpos hídricos superficiais, ou profunda, na qual alimentará os aquíferos subterrâneos. Tratam-se de processos fundamentais que influenciam diversos outros, tais quais o escoamento superficial, evapotranspiração e erosão do solo, e estão fortemente ligadas a propriedades físicas do solo (condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento do solo) (Maidment, 1993)
- Escoamento superficial (precipitação efetiva): parcela da precipitação que se desloca, regido por leis físicas (em especial a gravidade), sobre a superfície que irá alimentar um corpo hídrico (Tucci, 2009). Ocorre quando a taxa de água que atinge o solo supera a taxa de infiltração ou mesmo quando o solo está devidamente saturado (Hillel, 2004).
- Evapotranspiração: tal fenômeno é o conjunto da evaporação e da transpiração. O primeiro diz respeito a passagem do estado líquido para o gasoso da água contida no solo, nos corpos hídricos e que foi interceptada. O segundo trata da água que vai para a atmosfera a partir dos vegetais (Hornberger, 1998).

É possível observar que as etapas do ciclo hidrológico, em via de regra, obedecem duas direções: vertical e longitudinal. O fluxo vertical se dá pela precipitação e evapotranspiração, enquanto que o fluxo longitudinal ocorre pelo escoamento superficial e subterrâneo (Tucci, 1997)

As etapas do ciclo hidrológico estão dispostas na Figura 2.1, onde é possível observar os principais processos e fenômenos, além da quantificação aproximada do volume que é transferido entre os reservatórios. Verifica-se ainda que os corpos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneo, irão alimentar os oceanos e, estes proverão o superávit de água na atmosfera por evaporação.

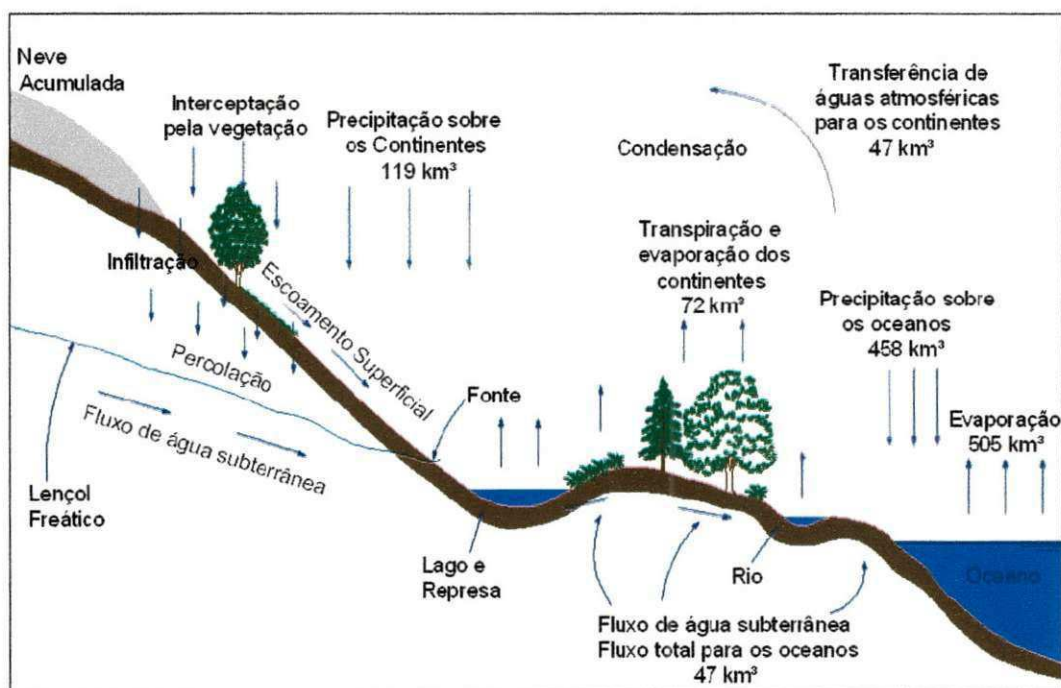


Figura 2.1 Ciclo Hidrológico (Fonte: Uzeika, 2009)

O solo, no âmbito do ciclo hidrológico, representa um papel relevante, podendo ser apontado como interface entre atmosfera e hidrosfera, uma vez que possibilita o armazenamento e posterior circulação da água entre eles sob as condições de suas características físicas. Neste aspecto, a relevância do solo inicia-se com o processo de infiltração, que é estreitamente dependente de sua porosidade ou capacidade de infiltração. Em seguida há redistribuição da água pelo processo de percolação e mesmo pela captação por partes dos vegetais, provendo ainda meios para o escoamento subsuperficial.

Diversas são as formulações que buscam quantificar o escoamento superficial. Para tal, faz-se uma análise da infiltração e quantifica-se o volume disponível para escoar superficialmente. Rawls (1993) destaca três modelos principais: modelos empíricos de infiltração, modelos empíricos de excesso de chuva e modelos de infiltração com aproximação física. O modelo de Horton lida com a capacidade de infiltração, de modo que o volume de água que não infiltra torna-se disponível para o escoamento superficial. Enquanto que o modelo de Curva Número trabalha com a capacidade de armazenamento e redução de parte da precipitação a partir da chamada

abstração inicial. O modelo de infiltração com aproximação física que se destaca é o "Green-Ampt". Este modelo assume que o perfil do solo é homogêneo e que a distribuição de umidade ocorre de maneira uniforme, de modo que proporciona uma frente saturada bem definida que se propaga para baixo – no solo devidamente seco.

2.2 Bacia Hidrográfica e Balanço Hidrológico

Uma bacia hidrográfica representa uma área na qual toda a parcela da precipitação nela incidente, que venha a se transformar em escoamento superficial, tenderá para um único corpo hídrico principal e, por conseqüência, uma única saída ou exutório. Tal fenômeno do fluxo superficial se dá devido as conformações topográficas da área da bacia (Dingman, 2002). Sabe-se que uma bacia hidrográfica pode conter sub-bacias que, a depender do contexto do estudo e sua escala, pode representar isoladamente uma bacia hidrográfica. Ou seja, diversas sub-bacias podem estar associadas ao corpo hídrico principal, sendo representadas pela área que contribui através da precipitação efetiva (Hornberger, 1998). Ora, a bacia hidrográfica enquanto sistema¹ representa a transformação da precipitação (entrada) em vazão do rio principal (saída), de modo que há perdas intermediárias – representadas pela evapotranspiração e infiltração profunda (Tucci, 2009), sendo a primeira a principal saída de água do sistema (Hornberger, 1998).

Com isto tem-se a estrutura para elaboração de um balanço hídrico para uma bacia hidrográfica, que é norteado pelo princípio de conservação da massa para um determinado intervalo de tempo. Em termos gerais, tem-se a desagregação da precipitação da seguinte forma, para qualquer período de tempo e com dimensão [L³] (Dingman, 2002).

$$P = \Delta S - G_{en} + (Q + ET + G_{sai}) \quad (1.1)$$

¹ Sistema pode ser entendido como "qualquer engenho que responde, através de uma saída, a uma entrada" (Tucci, 2005). Todo sistema possui características próprias e é passível de subdivisões.

Onde:

- P : volume de água precipitado;
- ΔS : mudança de volume em todas as formas de armazenamento (líquido e sólido) durante o intervalo de tempo;
- G_{en} : volume de entrada de água subterrânea;
- Q : volume da calha fluvial;
- ET : volume da evapotranspiração, e
- G_{sai} : volume de saída da água subterrânea o volume evaporado.

Como foi percebida, a possibilidade de estudo da transformação da precipitação nos diversos processos fica bem explicada dentro do contexto de uma bacia hidrográfica. De acordo com Cruz (2003) apud Prado (2005), não há uma área sequer no planeta Terra que não esteja contida em uma bacia hidrográfica. Com isto é possível apontar o fato de que, tecnicamente, a bacia hidrográfica tornou-se unidade territorial para gerenciamento e implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos, representada pela lei 9.433 de 1997 (Campos, 2001). Esta lei busca uma conformação das necessidades técnicas e sociais perante o uso da água, estabelecendo os Comitês de Bacia Hidrográfica que responderão pelo gerenciamento da unidade territorial que representam (Campos, 2001), evidenciando a importância dos recursos hídricos e o papel de uma bacia hidrográfica.

Haja vista a atual importância dada às bacias hidrográficas, os estudos científicos trataram de identificar as ditas bacias representativas, cujas características são intrínsecas de uma determinada região, do ponto de vista hidrológico (Lopes, 2003). Em paralelo existem as bacias hidrográficas experimentais, em que o monitoramento contínuo da precipitação e da vazão são pré-requisitos básicos, visando o fornecimento de dados para melhor entendimento do fluxo da água e sedimentos (Lopes, 2008). Desta maneira, busca-se o entendimento da dinâmica da água em bacias hidrográficas de escala reduzida, as bacias experimentais, possibilitando a sua extrapolação para áreas maiores – respeitando o efeito de escala.

Microbacias experimentais são utilizadas em diversos trabalhos para investigar como as mudanças na cobertura do solo afetam os processos hidrológicos e o transporte de sedimentos. Em extenso trabalho, Tucci (1997) relata diversas

experiências que documentaram como o impacto das mudanças na cobertura vegetal afeta o escoamento superficial.

2.3 Ciclo Hidrossedimentológico e suas implicações

Paralelamente ao ciclo hidrológico, e dependente deste, ocorre o ciclo hidrossedimentológico. Tal ciclo lida com a circulação aberta dos sedimentos no continente, onde há os processos de desagregação, transporte e deposição das partículas (Tucci, 2009), sejam estas provindas da superfície da bacia hidrográfica ou mesmo do leito do canal.

O processo de desagregação, ou erosão, das partículas do solo, dentro do escopo natural, se dá através do impacto das gotas de água de chuva e do escoamento superficial. As principais características da chuva que influenciam a desagregação são a sua intensidade, duração e sua energia – observada como a soma da energia cinética de todas as gotas de água que caem sobre uma área (Hillel, 2004). O impacto da gota de água de chuva provoca o desprendimento da partícula do solo e ainda, em seguida, pode proporcionar o transporte por salpicamento a curta distância. Neste contexto, verifica-se que a existência de vegetação ameniza tal processo, uma vez que há interceptação e atenuação da energia cinética. A ação do impacto da gota de água da chuva responde por maior contribuição neste processo (Tucci, 2009).

Uma vez que foram desagregadas, o escoamento superficial responde pelo transporte das partículas da superfície para a calha fluvial. Porém, o processo de erosão na superfície da bacia hidrográfica pode acontecer de diferentes maneiras através do escoamento superficial. Têm-se, basicamente, três processos erosivos que se sucedem: erosão laminar ou em camadas, em sulcos e em ravinas. Na primeira delas acontece a remoção de sedimentos através da retirada de uma fina camada do solo, relativamente uniforme podendo abranger uma grande área, sendo transportados de maneira generalizada e não canalizada. Este processo resulta na perda das partículas menores, incluindo nutrientes e matéria orgânica e acontece de maneira

gradual, porém acumulativa, passando muitas vezes despercebida até que seus efeitos façam surgir sulcos. A erosão em sulcos ocorre de maneira aleatória formando canais normalmente rasos, respeitando a variação da resistência do solo e as nuances da declividade do terreno. Uma vez que o solo encontra-se desprotegido pelos processos anteriores, o acúmulo de canais superficiais proporciona a formação de um sulco ainda maior e mais profundo originando a ravina. As voçorocas, ou ravinas, possuem profundidade de 0,3 a 30 metros, podendo crescer na cabeceira devido ao contínuo carreamento de sedimentos e lateralmente devido ao colapso de seus taludes. A soma do material erodido nestes processos denomina-se erosão bruta. Observa-se que os sulcos podem ser remediados através do uso de máquinas e técnicas agrícolas, enquanto que as ravinas apresentam dimensões que dificultam o processo de recuperação do solo (Borah, 2007).

A Figura 2.2 ilustra os processos erosivos.

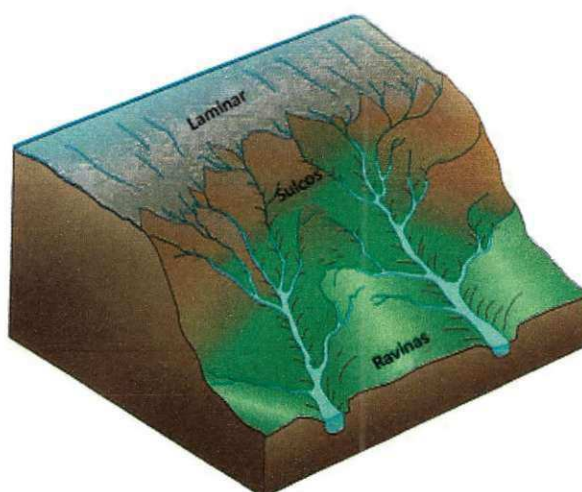


Figura 2.2 Formas de erosão

Na calha fluvial, os sedimentos são transportados através do fluxo de água, seja arrastados em contato com o leito ou de maneira suspensa (carga do leito e material em suspensão, respectivamente). Para tal, é necessário que a força exercida pelo fluxo supere a resistência exercida pela partícula. Esta resistência é resultado, principalmente, do peso do sedimento e seu arranjo, no caso das partículas de areia, e coesão, para a situação de partículas finas como argila (Raudkivi, 1976). Observa-se

que o transporte da carga do leito, via rolamento, representa entre 5 a 25% da carga total transportada, e possui a importância de fornecer estabilidade do canal bem como na proteção, uma vez que cessa o movimento, das partículas mais finas - fenômeno denominado de encarouçamento (Simons, 1992). A carga do leito tem sua representatividade ampliada quando existem quantidades significativas de partículas maiores, como areia (Carvalho, 2008). Enquanto a carga em suspensão mantém-se devido às condições de turbulência do fluxo, que se deslocam para cima, excedendo a velocidade de queda de tais sedimentos (Raudikivi, 1972). Ainda, as condições do fluxo determinarão o tamanho de sedimento que poderá ser transportado por suspensão.

Tem-se na deposição o fim do transporte, determinada fração ou em sua totalidade, dos sedimentos, no qual as partículas voltam a fazer parte da superfície da área de drenagem ou do leito do canal. A deposição irá ocorrer sempre que a capacidade de transporte do fluxo for superada, uma vez que um fluxo de água com certa vazão e velocidade é capaz de transportar apenas uma determinada carga de material sólido (Carvalho, 2008).

O estudo dos fenômenos hidrossedimentológicos tornou-se proeminente no século XIX, com os estudos realizados por DuBoys – em 1879 –, nos quais idealizou-se o leito de um rio como formado por camadas de sedimentos, cuja espessura era correspondente ao diâmetro da partícula (Raudkivi, 1976). Deste ponto adiante vários pesquisadores destacam-se com suas colaborações para o entendimento dos processos hidrossedimentológicos: Schoklistch, Meyer-Peter, Shields, Hans Albert Einstein, Yalin, Bagnold e outros (Raudkivi, 1976). Busca-se o entendimento da relação água e sedimento, e a relação do homem entre os processos, uma vez que tais questões possuem imensa importância no âmbito do gerenciamento de bacias hidrográficas. Carvalho (2008) aponta diversos problemas devido ao processo hidrossedimentológico, tais quais:

- Na erosão:
 1. Pode provocar destruição de nascentes;
 2. Remoção da camada fértil do solo, e o conseqüente empobrecimento deste;
 3. Aumento do risco de desertificação, e

4. A erosão em torno de obras e estruturas.
- No transporte dos sedimentos:
 1. As partículas em suspensão degradam o uso consultivo da água, aumentando seu custo de tratamento. Mesmo para uso não-consultivo há desvalorização do recurso natural, podendo provocar danos a turbinas de usinas hidrelétricas;
 2. O aumento da turbidez, devido a presença de sedimentos, reduz a qualidade estética da água e ainda impede a penetração de luz e calor – o que reduz a atividade fotossintética do corpo hídrico;
 3. O sedimento pode atuar como portador de poluentes, agregando nutrientes químicos, pesticidas e microrganismo;
 4. Durante enchentes, o impacto das partículas em estruturas pode danificar suas fundações, e
 5. A carga sólida provoca uma perturbação na forma do canal.
 - Na deposição
 1. A deposição de sedimentos em reservatórios provoca redução do volume de água passível de ser armazenado e a redução da vida útil da represa;
 2. Pode assorear rios, prejudicando a vida aquática, e mesmo terrestre, além da navegação;
 3. Em certos locais, a deposição pode reduzir ou impedir o crescimento de vegetais ou, inversamente, pode favorecer ao crescimento de vegetais em área inapropriada, e
 4. Em certos locais, a deposição de sedimentos pode reduzir a drenagem superficial.

Ainda é identificado por Carvalho (2008) que a ocorrência da erosão predomina na parte alta bacia, sendo transportados sedimentos maiores que ao decorrer do transporte vão se fracionando e, conforme são levados na calha fluvial, sofrem deposição na parte baixa da bacia.

De uma maneira geral, verifica-se que os processos acima citados são dependentes do tamanho da partícula e propriedades do solo, topografia do terreno e

características da rede de drenagem – tal qual uso e cobertura do solo, além da velocidade e do próprio volume escoado (Simons, 1992).

O escoamento sobre a superfície responde pelo transporte de sedimentos até a calha fluvial. Assim, impactos na cobertura do solo que favoreçam ao aumento do fluxo superficial irão, em consequência, provocar maior transporte de partículas. Srinivasan (2003) evidencia que o retardamento do fluxo e o aumento da infiltração no solo, devido a existência de vegetação, favorece a proteção do solo raso contra a erosão. Além disso, as raízes das plantas proporcionam ao solo maior sustentação mecânica, atenuando os processos erosivos. Para pequenas bacias, o desmatamento favorece a maior produção de escoamento superficial devido, principalmente, à redução da evapotranspiração e da capacidade de infiltração do solo (Tucci, 1997). A ligação entre o desmatamento e a produção de sedimentos também foi verificada por Figueiredo (1998), sendo analisados diferentes índices de vegetação. Refosco (1999) verificou que a redução em 19% da vegetação nativa da bacia hidrográfica do Rio Hercílio, com área de 3,3 km², proporcionou um aumento de 60% na vazão média do rio principal.

Santos (2000) demonstrou que a vegetação da caatinga é capaz de proteger o solo contra erosão, ao passo que o cultivo de palma enquanto fator de proteção do solo é insignificante. Ainda no que se refere ao trabalho de Srinivasan (2003), foi observado que a vegetação rasteira com cobertura morta proporciona um alto nível de proteção do solo, mesmo para chuvas intensas.

Através da análise direta de parcelas desmatadas com diferentes declividades, foi possível observar que aquela que apresenta maior declive produziu maior erosão. Sobre as mesmas parcelas, a investigação do escoamento superficial não proveu grande discrepância. Diante disto, concluiu-se que a declividade é fator bastante sensível para a erosão de sedimentos e pouco sensível para escoamento superficial (Srinivasan, 2003).

Dito isto, observa-se que a ação do homem é um condicionante aos processos erosivos, uma vez que somos capazes de modificar a paisagem natural. O desmatamento proporciona maior facilidade no processo de desagregação, e ainda no transporte superficial dos sedimentos. Este último se dá uma vez que o fluxo superficial não encontra maiores obstáculos ao seu movimento, o que favorece a uma maior

velocidade, e mesmo poder erosivo (Sangoi, 2007). É devido à necessidade humana de usar o espaço natural, bem como favorecer tal uso de maneira menos negativamente impactante, que modelos capazes de simular a realidade vêm sendo cada vez mais empregados nos dias atuais.

2.4 Taxa de Transporte de Sedimentos e Efeito de Escala

Os sedimentos erodidos em uma bacia hidrográfica estão sujeitos ao processo de deposição. Assim verifica-se que apenas uma fração do material erodido na superfície da bacia alcança seu exutório, e a esta fração dá-se o nome de “produção de sedimentos” – do inglês *sediment yield* (Borah, Livro de Sedimentos – 2007; Carvalho 2008; Rawls, 1993). A quantidade de sedimento que deposita ao longo da bacia, seja na superfície ou no canal, é função de fatores topográficos e ambientais. O material pode ficar retido em reservatórios, depressões, margens de cheia ou na vegetação, sendo também possível cessar seu movimento ao encontrar uma encosta de declividade mais suave ou mesmo devido à extrapolação da capacidade de transporte no próprio canal.

Foi definida então a chamada “taxa de entrega de sedimentos” (TES) – do inglês *sediment delivery ratio* – que traça uma relação entre a fração de sedimento que alcança o exutório (ou outro ponto qualquer) com a quantidade de erosão bruta a montante (Borah, 2007; Carvalho 2008; Rawls, 1993). Esta é uma variável de grande importância, que pode inclusive caracterizar uma determinada bacia (Walling, 1999). Walling (1999) ressalta em seu trabalho um caso de uma bacia que sofreu considerável desmatamento, durante um período de 30 anos, mas que não refletiu na produção de sedimentos. Este acontecimento enaltece a TES de modo que busca a consideração dos sedimentos erodidos a montante.

Na falta de estudos específicos, há uma relação proposta pelo Serviço de Conservação do Solo dos EUA apud Borah (2007) que mostra a taxa de entrega de sedimentos em função da área da bacia, conforme a Tabela 2.1:

Tabela 2.1 Relação entre área e a Taxa de Sedimentos (Fonte: Borah, 2007)

Área da Bacia Hidrográfica (km ²)	Taxa de Entrega de Sedimentos (TES)
0,1	0,53
0,5	0,39
5,0	0,35
10,0	0,24
50,0	0,15
100,0	0,13
500,0	0,085

Percebe-se a redução da TES conforme o aumento da área da bacia hidrográfica. A este fato, Vestraeten (2001) aponta a área de drenagem como um parâmetro *caixa preta* uma vez que não fornece explicações concisas e diretas quanto a produção de sedimentos, mas agrega em si um conjunto de parâmetros que influenciam a erosão e a TES. Tornando, de tal modo, a área da bacia enquanto um índice representativo da produção potencial de sedimentos de uma bacia (Vestraeten, 2001).

Assim, é verificada a existência de um efeito de escala espacial dos processos hidrológicos dentro de uma bacia hidrográfica, de modo que pequenas bacias podem ter seus parâmetros e variáveis bem definidos e a busca por dados que representem uma área maior está sujeito a uma extrapolação onde há incertezas.

É possível citar alguns estudos que trataram do efeito de escala aos quais determinados parâmetros foram submetidos:

- O número de Manning foi estudado por Figueiredo (1998) na bacia Representativa de Sumé e pode observar que este parâmetro cresce conforme a escala da bacia. A tal fato atribui-se que para áreas maiores há o aumento da rugosidade da superfície devido à presença de vegetação e mesmo a topografia do terreno.
- O parâmetro "Curva Número" para estimativa do escoamento superficial foi estudado por Simanton (1996) em 18 bacias no Estado do Arizona, EUA. Diante de seus estudos, os autores verificaram que este parâmetro

tem seu valor reduzido conforme o aumento da escala espacial. A este resultado argumenta-se a variabilidade espacial da precipitação e as perdas por infiltração nos canais arenosos presentes nas grandes bacias hidrográficas.

- Figueiredo (1998) verificou ainda em seu trabalho a redução da produção de sedimentos conforme o aumento da escala da bacia para diversos índices de desmatamento – tendo também como resultado o aumento da produção de sedimentos, para uma mesma área, quanto menos seja vegetada. Walling (1983) expôs em seu trabalho diversos comportamentos da TES e da produção de sedimentos em diferentes locais do mundo em função do tamanho da bacia, conforme pode ser visto nas figuras a seguir. A tais comportamentos permanece a regra de redução com o aumento da área da bacia – havendo sim exceções.

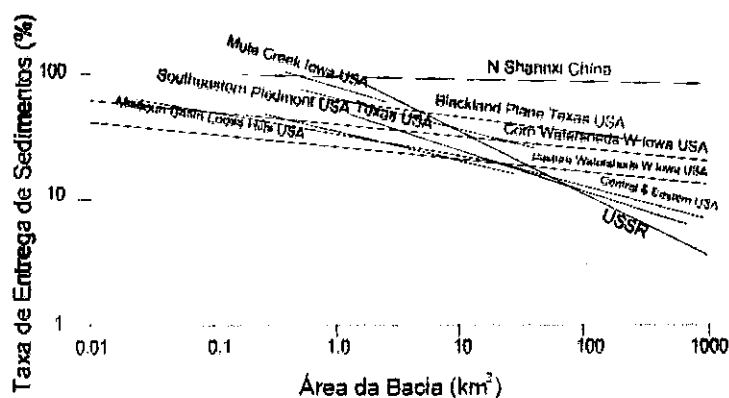


Figura 2.3 Taxa de entrega de sedimentos para várias bacias (Fonte: Walling, 1983)

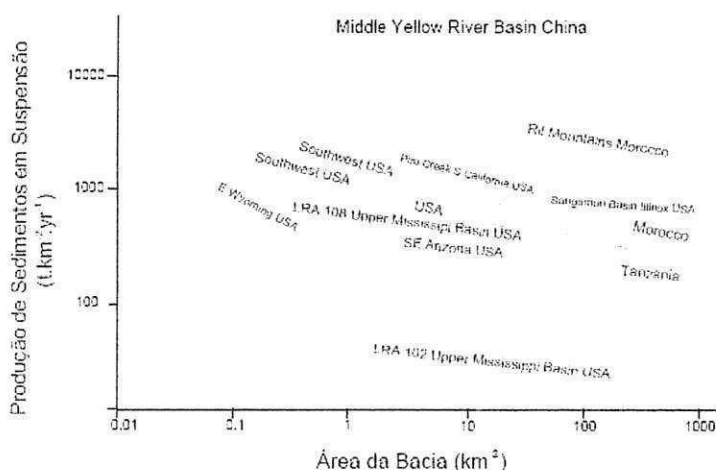


Figura 2.4 Valores da produção de sedimentos em suspensão em função da área da bacia para várias partes do mundo (Fonte: Walling, 1983).

2.5 Modelos Hidrológicos

A necessidade de representar os processos físicos da natureza em relações analíticas para simulação fez surgir os modelos. Um modelo, segundo a conceituação de Tucci (2005), “é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas”, ou, de maneira mais direta, “é uma representação do comportamento do sistema”. Ao passo que “sistema”, como visto anteriormente pela ótica do mesmo autor, é “qualquer engenho que responde, através de uma saída, a uma entrada”.

Ou seja, busca-se no modelo a melhor representação possível do sistema real para que o estudo associado obtenha um maior grau de precisão. Um modelo pode ser classificado como físico, analógico ou matemático (Tucci, 2005). O primeiro diz respeito, na maioria das vezes, na representação do sistema através de um protótipo em menor escala. Os modelos analógicos se valem de equivalências entre diferentes sistemas, utilizando equações de um deles no outro. Enquanto o último, os modelos matemáticos

– também chamados por modelos digitais –, estruturam a realidade do sistema através de equações matemáticas.

Neste sentido, surgem os modelos matemáticos hidrológicos, no qual o sistema representado é a bacia hidrográfica, visando entendê-la e buscar respostas para diferentes entradas através de diversas equações matemáticas que configuram o fluxo de água. Sendo necessário para tal que o modelo hidrológico seja capaz de reproduzir os principais processos na bacia, lidando com fenômenos contínuos e dinâmicos. Com isto, o modelo hidrológico, devido à sua versatilidade favorece uma gama de oportunidades para simulações em bacias hidrográficas, sendo possível estudar o comportamento da mesma quando submetidas a diferentes usos e ocupações do solo. Tal fato denota o poder do estabelecimento de cenários, que favorece a previsão de situações futuras perante uma condição proposta para que assim seja possível prever o comportamento de algum processo e, de tal forma, antever seus impactos.

Modelos hidrológicos diferem-se entre si de acordo com algumas considerações, podendo ser classificado perante a sua análise espacial, quanto a representação dos dados, quanto as variáveis utilizadas, e, por fim, o tipo de relação entre estas variáveis (Rennó, 2003).

A análise espacial distingue um modelo hidrológico em global ou em distribuído. Um modelo global considera que todos os dados de entrada, em consequência também, os de saída são representativos da área estudada. Enquanto que um modelo distribuído é capaz de enxergar peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, e, portanto, tais observações são expressas nos dados de entrada e saída. Matematicamente verifica-se que o modelo concentrado apresenta apenas o “tempo” enquanto variável independente, sendo representado diretamente por um equação diferencial ordinária. Por outro lado, modelos distribuídos, possuindo variáveis de “tempo e espaço” independentes, são representados por equações diferenciais parciais (Tucci, 2005).

Os dados podem ser representados de maneira contínua ou discreta. Observa-se que os fenômenos naturais acontecem de maneira contínua no tempo, porém são representados pelos modelos através de um intervalo de tempo. Pode-se conceber modelos com diferentes representações do tempo, ao passo que quanto menores

intervalos obtém-se maior precisão e maior custo computacional (Rennó, 2003). Esta classificação pode sugerir também modelos que podem trabalhar por evento de precipitação ou aqueles que exigem longos períodos para prover a simulação – discreto e contínuo, respectivamente.

A divisão entre modelo determinístico e estocástico refere-se às variáveis utilizadas. O primeiro diz respeito a extinção de probabilidade ligada a um processo, de modo que um determinado dado de entrada favorecerá a um determinado dado de saída. Sendo assim, inversamente, um modelo estocástico considera as leis da probabilidade, de modo que um valor fixo de uma variável de entrada poderá gerar diferentes saídas (Tucci, 2005; Rennó, 2003).

A relação entre as variáveis é observada sob duas maneiras básicas. Uma que considera de maneira simplista as relações entre as variáveis, baseando-se em observações para que ocorra o ajuste dos dados simulados com os observados, que são os modelos empíricos. E outro que se baseia nas leis físicas que regem os mais diversos processos de um determinado fenômeno, que são os modelos conceituais. Esta classificação sofre de uma subdivisão (Tucci, 2005), havendo os modelo semi-conceituais e os de base física. Os modelos semi-conceituais seguem a premissa da relação com as leis que regem os fenômenos, contudo ainda possuem algum grau de empirismo nos parâmetros das equações envolvidas. Enquanto que os de base física utilizam-se efetivamente das principais equações diferenciais que norteiam a realidade, e seus parâmetros possuem significado físico – sendo por este motivo de difícil estimação. Os modelos de base física possuem a grande vantagem da possibilidade de aplicação em áreas de pouco conhecimento, uma vez que a atribuição dos valores dos parâmetros físicos devem ser suficientes para estabelecer uma simulação razoável.

Entre os modelos hidrológicos, há aqueles que possuem equações ou modelos capazes de investigar os processos hidrossedimentológicos e por este motivo são chamados modelos hidrossedimentológicos.

Como exemplo é possível citar alguns modelos hidrológicos que foram ferramenta de trabalho durante anos no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Campina Grande: WESP, WEPP e Kineros.

- WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*, Lopes, 1987): consiste em um modelo hidrológico de base física e distribuído que considera as mudanças na topografia do terreno, as propriedades do solo e a rugosidade da superfície e a geometria dos canais. Divide a sub-bacia de maneira simplificada, em planos e canais. Os planos são representados por valores médios de largura, declividade e rugosidade, e contribuem lateralmente para a formação dos canais (Srinivasan, 1995).
- WEPP (*Water Erosion Predict Project*, Flanagan & Nearing, 1995): este modelo de base física e contínuo no tempo tem como objetivo estimar os processos hidrossedimentológicos (erosão e deposição) no espaço e no tempo para pequenas bacias hidrográficas rurais – que chegam até 260 hectares (Raclot, 2006). Este modelo considera os seguintes componentes em suas simulações: hidrologia e balanço hídrico, crescimento vegetal e práticas agrícolas – incluindo processos de decomposição -, composição e consolidação do solo e clima (Raclot, 2006).
- KINEROS (*Kinematic Erosion Simulation*, Woolhiser, 1990): é um modelo semi-conceitual e distribuído usado para determinar os efeitos, no hidrograma e no sedimentograma de um trecho de rio, de possíveis mudanças nas características da bacia, sejam elas urbanização, desmatamento, construção de reservatórios e outras (Aksoy, 2005).
- SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*): trata-se de um modelo distribuído, contínuo e de base física. Originou-se a partir da necessidade de se prever o efeito de diferentes cenários de manejo da terra na qualidade da água, aporte de sedimentos e cargas de poluentes em uma bacia hidrográfica respeitando suas condições espaciais para um longo período de tempo (Neitsch, 2005). Agrega em si a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MEUPS), que procede com a estimativa do aporte de sedimentos.

O modelo SWAT será descrito com maiores detalhes no capítulo três. Algumas aplicações deste modelo são apresentadas a seguir.

2.5.1 Aplicações do SWAT

O modelo SWAT tem sido bastante empregado nas simulações hidrológicas. Neste sentido é apresentado neste trabalho um levantamento dos trabalhos internacionais e nacionais de maior relevância no âmbito desta pesquisa.

Trabalhos Internacionais

O trabalho de Gassman (2007) aponta diversas possibilidades que o modelo SWAT possui e o que levou para que fosse escolhido por diversas agências governamentais nos Estados Unidos e União Européia. Uma das grandes aplicações do modelo se deu através do projeto HUMUS (*Hydrologic Unit Model of US*), na qual buscou-se simular os processos hidrológicos, poluição e outros impactos devidos ao uso de água na agricultura e municípios nas 2.149 unidades hidrológicas catalogadas pelo USGS (*US Geological Survey*). Também foi um dos modelos escolhidos pelo departamento de agricultura dos Estados Unidos para o Projeto de Análise dos Efeitos da Conservação na Agricultura, no qual visa estimar os impactos ambientais benéficos das práticas de conservação em escala nacional e em nível de bacias hidrográficas. Na Europa foi um dos modelos utilizados para verificar o impacto das mudanças climáticas em cinco bacias hidrográficas. Em outro projeto europeu foi usado para verificar a capacidade do modelo em estimar fontes não-pontuais de nitrogênio e fósforo (Gassman, 2007).

Interessante trabalho foi realizado por Shen (2009) no qual buscou-se comparar o desempenho dos modelos WEPP e SWAT perante uma pequena bacia hidrográfica, de cerca de 1,6 km², contribuinte para o reservatório de Três Gargantas, na China. Esta bacia possui precipitação média anual na ordem de 1440 mm e possui predominantemente área de cultivo de arroz, amendoim e citrus. O autor verificou o desempenho de ambos os modelos perante a produção de escoamento superficial e sedimentos utilizando o coeficiente de Nash. No que diz respeito ao escoamento, observou-se que o WEPP responde melhor quando há baixos valores de escoamento superficial observado, enquanto que o SWAT subestima picos de fluxo superficial.

Quanto à produção de sedimentos, excluindo situações de pico, o WEPP respondeu superestimando e o SWAT subestimando. Com isto, foi possível indicar o melhor desempenho do WEPP perante os dois processos analisados, obtendo valores de coeficiente de Nash, para os períodos de calibração e validação, na ordem de 0,8 para produção de escoamento superficial e sedimentos, enquanto que o SWAT obteve valores entre 0,6 e 0,8. Concluiu-se que ambos os modelos ofereceram bons resultados em nível mensal diante das suas respectivas limitações.

Govender (2005) aplicou o SWAT em duas pequenas bacias na África do Sul. Porém, apenas na primeira delas, com área de 0,677 km² e vegetação predominante rasteira, foi realizada uma avaliação do desempenho do modelo. O autor enalteceu o coeficiente de determinação encontrado, de 0,65 por ajustes manuais, enfatizando que o modelo foi inicialmente desenvolvido para grandes bacias. Verificou que o desempenho do modelo foi melhor para anos secos que para anos úmidos, havendo nestes últimos uma subestimativa dos picos de escoamento superficial. Por fim, o autor ressalta a necessidade de aplicação do modelo para grandes bacias no país, a fim de ajudar nos processos decisórios quanto ao manejo e uso do solo.

Na literatura, é possível encontrar diversos trabalhos que identificam os parâmetros mais sensíveis para as respostas do modelo SWAT. A análise de sensibilidade é um passo importante no processo de calibração do modelo, identificando os parâmetros que levam a um melhor entendimento do modelo e do seu desempenho e, por conseqüência, reduz as incertezas intrínsecas ao processo de simulação (Lenhart, 2002).

Lenhart (2002) utilizou uma microbacia virtual, em formato de "V", para efetuar uma análise de sensibilidade em 41 parâmetros para todas as respostas do modelo SWAT. Mesmo consentindo com o fato de que em bacias reais e maiores alguns parâmetros fornecerão comportamento diferentes para as respostas, este trabalho fornece direcionamentos básicos quanto ao peso de cada parâmetro na simulação.

Cibin (2010) identificou 13 parâmetros que mais afetam o fluxo nos canais, divididos entre os processos de água subterrânea, escoamento superficial, evapotranspiração, neve e rugosidade da superfície. Destes, quatro parâmetros regem o escoamento superficial (valor da "Curva-Número", declividade média da bacia e por

sub-bacia e o coeficiente de atraso do escoamento superficial), seis regem a água subterrânea (coeficiente de atraso do fluxo de base e da recarga do aquífero, coeficiente de "revap", valor limite para propiciar recarga pelo aquífero, condutividade hidráulica do solo e capacidade de água disponível) e dois regem a evapotranspiração (coeficiente de evapotranspiração do solo e capacidade de água disponível). De acordo com a revisão bibliográfica realizada, é possível atentar que estes 11 parâmetros, dentro daqueles três processos, foram os mais amplamente trabalhados durante a calibração e verificação da análise de sensibilidade do modelo SWAT nos mais diversos trabalhos.

O trabalho de Cibin (2010) mostrou ainda que o modelo SWAT possui um efeito de escala para alguns de seus parâmetros, variando assim sua influência nos resultados para diferentes áreas de bacias. E, não menos importante, o autor constatou a dependência de alguns parâmetros em função da lâmina precipitado no período simulado.

Dentre os 13 parâmetros apontados por Cibin (2010), Green (2008) utilizou quatro parâmetros, dos quais apenas um não listado no primeiro trabalho, para calibrar seis pequenas bacias hidrográficas. Tais bacias possuem área entre 4 e 8,4 hectares, com plantação uniforme de milho e/ou trigo e declividade suave – variando entre 1,1 a 3,2%. Foram investigados os valores de Curva Número, o coeficiente de evapotranspiração do solo e o coeficiente de atraso do escoamento superficial, além de um fator que expressa a capacidade de campo. Os coeficientes de Nash e de determinação obtidos foram superiores a 0,8 para a produção de escoamento superficial – seja para verificação mensal e diária. Por outro lado, enquanto análise da produção de sedimentos, tais coeficientes não foram tão bons, sendo o coeficiente de Nash entre valores de 0,46 a 0,6 (havendo para uma sub-bacia o valor negativo de 2,92) e o de determinação entre 0,44 a 0,74. Em conclusão, o autor verificou a alta sensibilidade do modelo apresentada para os parâmetros Curva-Número e o coeficiente de evapotranspiração do solo.

Arabi (2008) avaliou as respostas de sete práticas de manejo do solo na agricultura, na parte alta da bacia, e três técnicas de coberturas de canal em uma pequena bacia (7,3 km²) frente à produção de escoamento superficial, sedimentos,

nutrientes e pesticidas. Seus resultados tornaram possível a observação da sensibilidade do modelo perante os diferentes manejos, e com isto apontar as melhores práticas para a conservação do solo.

Trabalhos Nacionais

O trabalho realizado por Lopes (2008) teve como objetivo principal de analisar o equilíbrio hidrossedimentológico em sete microbacias hidrológicas experimentais no Estado de Santa Catarina, de área variando de 8 a 856 hectares. Com precipitação média anual variando entre 1300 a 1900 mm, as microbacias apresentavam áreas predominantemente uniforme de vegetação nativa, reflorestamento de pinus, agricultura e mista. O desempenho do modelo mostrou-se pouco satisfatório, observando-se valores negativos do coeficiente de Nash e grande flutuação do valor de R^2 , para o processo de calibração manual e automático. Por outro lado, a produção de sedimentos não foi verificada com dados reais, e a resposta do modelo forneceu subsídios para se concluir que o estabelecimento de áreas de preservação ao longo dos cursos d'água e a aplicação de práticas conservacionistas na agricultura são medidas suficientes para o controle da erosão.

Baldisserra (2005) testou a aplicabilidade do SWAT na bacia do Rio Cuiabá, Mato Grosso, comparando a vazão observada e a simulada pelo modelo sob diferentes cenários definidos em função da construção de uma barragem naquele rio e do uso e ocupação do solo na referida bacia. Com aproximadamente 29.000 km², a bacia do Rio Cuiabá foi dividida pelo modelo em 34 sub-bacias. Baldisserra (2005) realizou simulação encarando dois cenários: o primeiro representativo da realidade da bacia e um segundo tomando a existência de apenas vegetação nativa em toda ela ("cenário ideal"). No primeiro cenário foi verificado que o modelo obteve um bom desempenho ao longo de postos fluviométricos localizados ao longo da rede de drenagem – deixando a desejar em apenas um.

Outro importante trabalho foi realizado por Uzeika (2009). Buscando verificar a aplicabilidade do SWAT na microbacia hidrográfica de Arvorezinha, Rio Grande do Sul, de apenas 1,19 km², investigando os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos sem calibração do modelo. Após analisar o modelo para as condições reais de cobertura de solo para três diferentes anos, a autora procedeu o trabalho com

o estabelecimento de três cenários: floresta nativa, a condição do solo para o ano de 2006 e o terceiro cenário estabeleceu apenas uma diferença quanto ao manejo do solo frente ao cenário anterior. Os resultados mostraram que o escoamento superficial foi pouco sensível aos cenários dois e três, enquanto que o segundo cenário apresentou-se cerca de 40% superior ao terceiro quanto ao aporte de sedimentos. Diante disto, percebe-se o quão importantes práticas de manejo do solo são para o estabelecimento de medidas de controle de erosão, como também a capacidade de assimilação do modelo com respeito a práticas de conservação. Por outro lado, o primeiro cenário não apresentou volumes significativos de escoamento superficial, tampouco de produção de sedimentos. Para tal fato, a explicação plausível foi a superestimação da evapotranspiração devido a totalidade da cobertura do solo por floresta.

Moro (2005) utilizou o SWAT para a identificação de diferentes respostas para onze diferentes cenários submetidos a microbacia hidrográfica de Ribeirão Martins, de 59,73 km². Os cenários permeavam inversões na cobertura do solo, a perspectiva de apenas um cenário ocupando toda a área e o estabelecimento de coberturas do solo tomando como base a declividade do terreno. Diante do seu experimento, a autora verificou que a vegetação nativa proporcionou redução significativa nos processos erosivos.

O processo de outorga de água para uma grande bacia foi analisado por Souza (2009), uma vez que o volume estipulado para concessão de outorga se dá através de medição localizada no exutório de toda área de drenagem. Com isto, tem-se a possibilidade de superestimar o valor real da vazão passível de outorga nas diversas sub-bacias. Assim, a delimitação efetuada encontrou 47 sub-bacias na bacia do Altíssimo Rio Negro, com 787 km², encontrando-se um bom coeficiente de Nash (0,72). O satisfatório desempenho do modelo mostrou que o valor da vazão outorgada não é atingido em diversas sub-bacias. Assim, a aplicação deste modelo hidrológico distribuído, integrado a um SIG, proporciona conhecimento suficiente para que a concessão de outorga aconteça de forma mais precisa respeitando os tributários de um rio principal.

O projeto desenvolvido pela Universidade Federal da Bahia (2004) destaca-se devido à aplicação do modelo SWAT em região semiárida daquele Estado, na bacia do Rio Salitre. Nesse projeto, foi visado fundamentar e orientar a implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos de forma adequada às regiões semiáridas. Para tal buscou-se calibrar e validar o modelo, atingido resultados satisfatórios – por mais que as vazões máximas fossem superestimadas pelo modelo SWAT.

Por fim, a tabela 2.2 apresenta a pesquisa bibliográfica de diversos trabalhos nacionais de pós-graduação que aplicaram o modelo SWAT.

2.6 Geoprocessamento e SIG

A possibilidade de registrar e apresentar a distribuição geoespacial de fenômenos, fatos e experiências que ocorrem na superfície da Terra fundamenta a importância da ciência do geoprocessamento. Geoprocessamento é entendido como a ciência que “utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica” (Câmara, 2001). Desta forma, o geoprocessamento pode ser encarado como uma tecnologia interdisciplinar que permite a agregação de diferentes ciências, conquanto a localização de algo seja requisitada (Câmara, 2001).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas computacionais utilizadas para coletar, armazenar, verificar, agregar, manipular, analisar e exibir dados georreferenciados (Gregory, 2007). Em uma abordagem mais ampla, Brimicombe (2010) adiciona, enquanto definição de SIG, o corpo físico dos computadores, as pessoas, as organizações e instituições que trabalham provendo coleta, armazenamento, manipulação, visualização e disseminação de informações espacial referente à superfície da Terra. Quanto ao seu conceito, verifica-se que o SIG coleciona mais de 11 definições e nenhuma responde por um consenso entre os pesquisadores (Brimicombe, 2010).

Tabela 2.2 Trabalhos acadêmicos utilizando SWAT

Descrição	Referência	Instituição / Área	Observações
A utilização da Interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos	Moro, 2005 Dissertação, Mestrado	Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / Pós Graduação em Agronomia	Bom desempenho do modelo para o escoamento superficial e produção de sedimentos, além do estudo de vários cenários alternativos.
Análise da Produção de Água e Sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT	Lopes, 2008 Dissertação, Mestrado	UFSC / Pós Graduação em Engenharia Ambiental	Resultados satisfatórios para pequenas bacias após calibração.
Aplicabilidade do Modelo de Simulação hidrológica SWAT para uma Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá	Baldisserra, 2005 Dissertação, Mestrado	UFMT / Pós Graduação de Física e Meio Ambiente	Bons coeficientes de desempenho por sub-bacia, na bacia com 28.500km ² .
Aplicabilidade do Modelo Swat na Simulação da Produção de Sedimentos Em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural	Uzeika, 2009 Dissertação, Mestrado	UFRS / Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento	Utilização direta do modelo, sem calibração, obtendo resultados satisfatórios para escoamento a nível mensal e superestimação da produção de sedimentos.
Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim	Prado, 2005 Dissertação, Mestrado	Instituto Agrônomo / Pós Graduação em Agricultura Tropical e Sub-Tropical	Execução do modelo SWAT para cinco diferentes cenários.
Contribuições metodológicas para ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Mano utilizando o modelo SWAT	Xavier, 2009 Dissertação, Mestrado	UFMT / Pós Graduação de Física e Meio Ambiente	Estudo de cenários.
Modelo SWAT 2005 aplicado às sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiros – Pato Branco / PR	Baltokoski, 2008 Dissertação, Mestrado	Universidade Estadual do Oeste do Paraná / Pós Graduação em Engenharia Agrícola	Aplicação de testes de sensibilidade do modelo, além de estudo de dois cenários. Bons resultados quanto ao desempenho do modelo, no escoamento superficial, produção de sedimentos e concentração de fósforo.
Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia –Lontras, SC	Lubitz, 2008 Dissertação, Mestrado	Universidade Regional de Blumenau / Pós Graduação em Engenharia Ambiental	Bons resultados a nível mensal da vazão e produção de sedimentos. Índices baixos quanto a concentração de nitrito, nitrato, ortofosfato e fósforo total.

A ferramenta SIG proporciona a criação do "Plano de Informação", PI, que é a camada de dados que contém informações geográficas contendo uma coleção coerente de características geográficas e os atributos utilizadas para sua descrição (Moro, 2005). Os PI possibilitam a confecção dos mapas temáticos, que é fator de interdisciplinaridade entre as ciências. Mapas temáticos são aqueles vinculados a um tema específico, proporcionando sua representação sobre a superfície terrestre (Fitz, 2008). Torna-se possível a criação de mapas que especifiquem o uso e ocupação do solo, o tipo de solo, que denotam áreas desmatadas e diversos outros. Há também o Modelo Numérico de Terreno (MNT) que possibilita a representação contínua de qualquer fenômeno geográfico que ocorra na superfície, ou mesmo na atmosfera da Terra. Quando se é representada a topografia de um terreno tem-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) (Fazal, 2008).

Os dados espaciais, aqueles representados espacialmente de maneira gráfica, podem ter sua estrutura por base vetorial ou matricial. Na representação vetorial a realidade simplificada através de pontos, linhas e polígonos utilizando um sistema de coordenadas. Os dados em estrutura matricial, ou em grade (do inglês "*raster structure*"), são apresentados sob forma de uma matriz em que cada célula denota um elemento de imagem – chamada em inglês "*pixel*" (Fitz, 2008). A cada elemento de imagem é vinculado um atributo, seja quantitativo ou qualitativo (Moro, 2005).

Diversos campos da ciência e de atividades humanas fazem uso das aplicações do SIG, tais quais sociologia, geografia, jornalismo, hidrologia, gestão de uso e ocupação do solo, projetos de engenharia (transporte, irrigação, mineração e etc), mapeamento de patologias, planejamento urbano, manejo de florestas e outros (Brimicombe, 2010). O avanço tecnológico proveu meios pelos quais a flexibilidade do SIG foi aliada a novas capacidades, tais quais ferramentas de suporte a decisão e a modelos hidrológicos.

2.7 SIG e Modelos Hidrológicos

Na atualidade, o SIG vem sendo usado extensivamente na área de planejamento e projetos de engenharia de recursos hídricos e, por consequência, modificando a maneira para qual essas atividades costumavam ser desenvolvidas (Johnson, 2009).

O fluxo de água em uma bacia hidrográfica está sujeita a localização no espaço, e por este motivo o uso do SIG na hidrologia adquiriu motivação e força para se difundir nas mais diversas áreas que envolvem a engenharia de recursos hídricos (Johnson, 2009). DeVantier (1993) realizou um trabalho revisando as mais diversas aplicações de SIG em modelagem hidrológica. Anos mais tarde, Johnson (2009) faz em seu livro um apanhado geral do uso do SIG em engenharia de recursos hídricos, abordando projetos de irrigação e abastecimento de água, qualidade da água, planejamento contra enchentes, gerenciamento e planejamento de bacias hidrográficas. Todos estes trabalhos partem da premissa que o SIG pode ser um poderoso banco de dados das mais diversas informações espaciais (Saghafian, 2000).

Através de uma representação numérica do terreno com um MDE, um SIG pode gerar delimitação de bacia hidrográfica, verificar a declividade do terreno, modelar a direção do fluxo superficial e, por conseguinte, propor a rede de drenagem e sub-bacias – identificando os divisores topográficos (Devantier, 1993; Johnson, 2009). Mais recentemente, as técnicas de análises de MDE se dão de maneira automática, cabendo ao usuário o conhecimento necessário para orientação de determinadas premissas (Johnson, 2009) – como por exemplo a área de drenagem mínima para que se considere a formação de um canal.

Um Modelo Digital de Elevação ou MDE pode ser obtido através de levantamentos de campo ou de produtos digitais advindos das técnicas de Sensoriamento Remoto (orbital ou aerotransportado).

A partir de um levantamento topográfico, técnicas de interpolação espacial podem ser utilizadas para a geração de um MDE. A interpolação espacial apresenta vários aspectos a serem considerados: inicialmente considera-se o tipo de dado a ser interpolado e o método de interpolação a utilizar. As amostras podem ser pontuais ou

podem ser as próprias isolinhas (ou curvas de nível) tradicionalmente utilizadas em levantamentos topográficos. Todas as amostras devem estar distribuídas espacialmente e cartograficamente referenciadas.

Outra fonte de dados para MDE é o imageamento por RADAR que são transmissões de micro-ondas ativas de comprimento de ondas mais longos (3 a 25 cm) através da atmosfera e na detecção de quantidade de energia retroespalhada pela superfície do terreno (Jensen, 2009). A missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) consiste em um sistema de radar que permitem a utilização de MDE de resolução com 90 m.

De grande relevância há ainda o projeto TOPODATA, no qual os dados obtidos pela SRTM de resolução de 90 m são trabalhados, dentro do território nacional, para possuírem melhor resolução. Com isto os dados são refinados para atingir uma resolução de 30 m (Valeriano, 2004).

Além destas fontes de dados citadas, atualmente, é possível que pares de satélites sejam capazes de gerar imagens estereoscópicas em órbita, como é o caso do satélite TERRA e seu sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) lançado em 1999 como parte do programa EOS (*Earth Observing System*). O ASTER é um esforço cooperativo entre a NASA, e o Ministério da Economia e do Comércio e Indústria do Japão (METI) e do ERSDAC (Centro de Análise de Dados de Sensoriamento Remoto da Terra), que proporciona mapas detalhados de terra com informações de temperatura, reflectância e elevação. Os produtos, disponibilizados pelo USGS (*United States Geological Survey*) de forma gratuita, possuem resolução de 30 m.

A conciliação entre SIG e modelos hidrológicos distribuídos é apontada por Ferraz (1999) como "um grande avanço na área e uma tendência irreversível".

A variabilidade espacial considerada nos modelos distribuídos pode ser suprida pelo uso de mapas que representem o uso e tipo de solo, considerando ainda a topografia do terreno, através da ferramenta SIG (Ferraz, 1999). Ou seja, o SIG pode fornecer parâmetros de entrada referentes a distribuição espacial exigidos pelo modelo hidrológico (Saghafian, 2000). E ainda, ao fim do processo de simulação, o software de geoprocessamento poderá prover meios pelo quais os resultados serão analisados

perante a distribuição executada (Pullar, 2000). Diversas são as abordagens metodológicas que buscam classificar a integração entre SIG e modelos hidrológicos (Melo, 2009).

2.7.1 Abordagens de Integração

Ao longo dos anos, diversas abordagens de integração entre Modelos Hidrológicos e SIG têm sido apresentadas (Pullar, 2000; Melo 2010). Nesse sentido Melo (2010) propõe uma classificação abrangente de forma a facilitar a escolha por algum método de integração (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 Critérios de classificação (Fonte: Melo, 2010)

Critério	Classificação	Sub-Classificação 1	Sub-Classificação 2
Relacionamento de Dados	Com compartilhamento	-	-
	Sem compartilhamento		
Modificação do Código Fonte	Integração externa	-	-
	Integração interna	Modelo no SIG	Conectado
		SIG no modelo	Embutido
Grau de Complexidade	Integração básica	-	-
	Integração avançada		

De acordo com a abordagem de Melo (2010), o relacionamento de dados enfatiza o acoplamento entre subsistemas de acordo com a proximidade entre os dados sendo subdividido entre as classes com e sem compartilhamento de dados. Na primeira não se observa a existência de um banco de dados único para o sistema acoplado, acarretando na necessidade de uma ferramenta externa para intercâmbio de dados, fazendo do SIG o gerenciador de tais dados. Enquanto que no compartilhamento de dados há a troca automática de dados favorecendo melhoria no desempenho computacional.

A modificação de código na fonte busca trabalhar a existência ou não de um elo na linguagem de programação entre os sistemas. Assim há a divisão entre integração externa e interna. Na integração externa não há modificação no código fonte, fazendo

com que o SIG e o modelo sejam executados de maneira independente, não existindo interface entre eles.

A existência de uma interface caracteriza a integração interna, proporcionando uma facilidade no manejo dos dados envolvidos por parte dos usuários. Trata-se de uma classe complexa e, portanto, uma maior discretização foi realizada. Pode haver ainda a integração interna em que o SIG está contido no modelo ou, inversamente, o modelo está contido no SIG. Na primeira se observa um modelo hidrológico que é capaz de realizar a função clássica de visualização do espaço bem como da distribuição espacial dos resultados. Enquanto que o modelo que está contido no SIG em muito se assemelha a integração classificada como "acoplamento firme". Nesta classificação o modelo é executado sobre a interface que o integra ao SIG, de tal forma que o modelo pode estar apenas conectado ao SIG ou embutido no mesmo.

Por fim, tem-se o critério que identifica o grau de complexidade da integração através da funcionalidade proporcionada pelo sistema SIG/modelo. Tem-se a integração básica na qual o SIG limita-se a sua funcionalidade de visualização de resultados. Por outro lado há a integração avançada que proporciona também a integração de ferramentas de otimização com gerenciamento de dados por meio de ferramentas analíticas, gerando relatórios e previsões.

CAPÍTULO 3 O MODELO SWAT E SEUS COMPONENTES

Neste capítulo serão abordadas as principais características da interface ArcSWAT utilizada neste trabalho e do modelo SWAT. No que diz respeito ao modelo SWAT serão apresentados importantes equações que governam os processos de modelagem e os dados de entrada necessários.

3.1 O Modelo “Soil And Water Assessment Tool”

Com de cerca de 30 anos de trabalho conduzidos pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service*), o modelo hidrossedimentológico SWAT agrega em si diversos fundamentos de outros modelos. Os modelos SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), QUAL2E e ROTO (*Routing Outputs To Outlets*) foram diretamente adaptados para a origem do SWAT. O primeiro citado, SWRRB, foi originado através da junção das funcionalidades dos modelos GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*), além de diversas modificações que proporcionaram maior avanço para realizar as simulações. Com isto, é possível perceber que o modelo foi concebido já com uma vasta gama de experiência intrínseca, haja vista que tais modificações, agregada pelos diversos modelos, foram feitas visando a superação de obstáculos (Gassman, 2007). Um esquema do desenvolvimento histórico do SWAT e suas adaptações pode ser observado na figura 3.1.

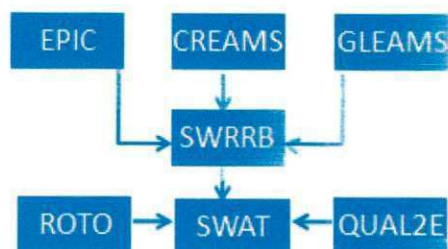


Figura 3.1 Origem do modelo SWAT. Adaptado de Gassman (2007)

Com diversas atualizações e revisões, a versão 2005 do modelo SWAT possui as seguintes principais características (Neitsch, 2005):

- Trata-se de um modelo de base física que requer informações quanto ao clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo e gerenciamento da terra para a sua devida execução. Esta primeira característica denota sua capacidade de simulação em bacias sem monitoramento, ou seja, sem calibração, favorecendo resultados realistas;
- Utiliza dados normalmente disponíveis;
- Computacionalmente eficiente, é capaz de simular bacias de diferentes tamanhos com estabelecimento de diferentes cenários e estratégias de manejo da terra, por longos períodos, com baixo investimento de capital e tempo e,
- É um modelo contínuo no tempo favorecendo as simulações de longos períodos – até 150 anos (Winchell, 2007).

Em sua estrutura, o modelo SWAT incorpora oito componentes principais para prover suas simulações. São eles (Dhar, 2009):

1. Hidrologia: escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem. Incluindo ainda a análise em reservatórios;
2. Aporte de sedimentos: abrange o ciclo hidrossedimentológico utilizando a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (MEUPS);
3. Clima: precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar;

4. Temperatura do solo: o modelo simula diariamente uma temperatura média no centro de cada camada do solo com objetivo do uso nos processos hidrológicos e no declínio de resíduos orgânicos;
5. Crescimento vegetal;
6. Nutrientes: investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e do fósforo;
7. Pesticidas e bactérias: investiga o movimento de tais elementos, analisando a biodegradação e transformação dos pesticidas, além do declínio de bactérias. O modelo pode ainda acompanhar a existência de metais pesados, contudo sem analisar possíveis transformações.
8. Práticas agrícolas: analisa o cultivo de cultura considerando irrigação e o manejo de resíduos na terra.

De maneira ainda incipiente o SWAT 2005 calcula a quantidade de algas, oxigênio dissolvido e demanda bioquímica do oxigênio que são incorporados no componente de qualidade de água (Neitsch, 2005).

Dito isto, o modelo possui as diversas rotinas de tais componentes, sendo a simulação dos processos do ciclo hidrológico realizada sob duas divisões principais, a da terra e a da água. A fase da terra trata do volume de água (tratando efetivamente do ciclo hidrológico), sedimentos, nutrientes e pesticidas que chegam ao canal de cada sub-bacia, enquanto que a fase da água trata da propagação destes pelo canal (Neitsch, 2005).

Quanto a integração com o software SIG, verifica-se que isto acontece sob a forma do "acoplamento firme" ou, segundo a proposta de Melo (2009): existe uma integração avançada, na qual o modelo opera internamente no SIG de maneira conectada, e com total compartilhamento de dados.

O fluxograma com os procedimentos para a devida execução do modelo SWAT está apresentado na Figura 3.2.

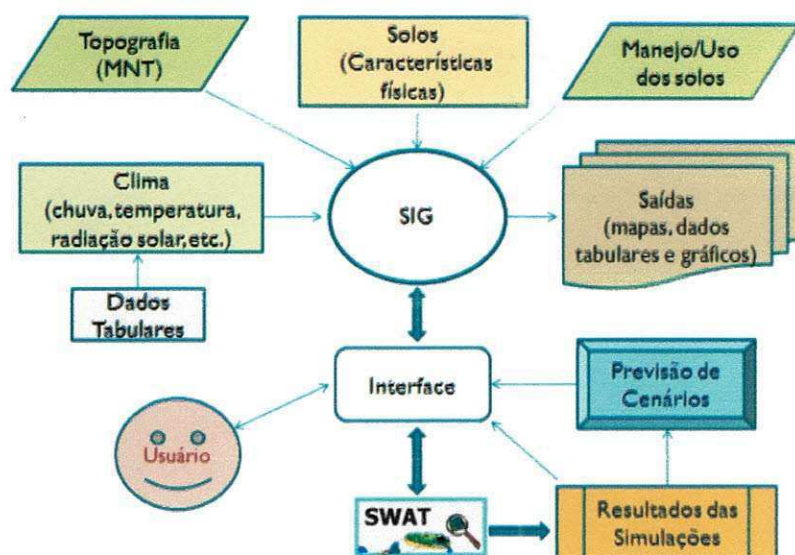


Figura 3.2 Fluxograma dos processos de execução do modelo SWAT (Uzeika, 2009).

Logo, constata-se que o modelo requer necessariamente três diferentes arquivos geoespaciais: modelo digital de elevação, mapa de tipo de solo e mapa de cobertura do solo. Dados tabulares referentes às condições climáticas também são requisitos básicos para a simulação de uma determinada bacia através do modelo. É através da interface ArcSWAT que os dados geoespaciais são convertidos em informações para a execução do modelo.

Os dados de entrada geoespaciais são de grande vantagem para execução do modelo SWAT, mesmo em comparação a outros modelos hidrológicos. Isto devido ao fato da aquisição de dados por sensoriamento remoto de tal modo que facilita a aplicação em grandes bacias hidrográficas. Estas características, além do crescente uso deste modelo pelo mundo, forneceram os subsídios necessários para sua escolha na realização deste trabalho.

Durante o presente trabalho, verificou-se que havia varias alternativas para gerar os modelos digitais de elevação para servir como dado de entrada para o modelo SWAT. Então, foi realizado um trabalho preliminar para a avaliação de alguns MDEs gerados a partir de diferentes técnicas de interpolação, além daquele provindo do projeto TOPODATA (Neto, 2010). Em conclusão foi verificado que a imagem de satélite

proveu os resultados mais estáveis na geração de escoamento superficial e aporte de sedimentos.

Com tais resultados obtidos, foram utilizados neste trabalho dois MDEs, um advindo da imagem de satélite ASTER, com resolução de 30 metros, e o outro originado a partir da interpolação de dados de campo.

Machado (2002) aponta em seu trabalho que a resolução apropriada para trabalho em pequenas bacias deve estar entre 10 a 30 metros, com preferência a primeira. Estima-se que a resolução de 10 metros seria a mais indicada para melhores resultados em bacias como a estudada neste trabalho.

3.2 Equações do Modelo SWAT

Os processos que o caracterizam (duas rotinas: a da terra e a de propagação) o modelo SWAT e as principais relações entre estes processos são apresentados a seguir.

3.2.1 Fase da terra

Esta é a etapa que trata dos cálculos referentes ao fracionamento da precipitação nos diversos processos do ciclo hidrológico.

Balanço Hídrico

O presente modelo considera quatro volumes de controle para basear sua estrutura no balanço hídrico. São os reservatórios: superficial, sub-superficial, subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo. O balanço hídrico fica assim representado:

$$SW_t = SW_o \sum_{t=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - w_{vad} - Q_{sub}) \quad (3.1)$$

No qual:

- SW_t : quantidade de água no solo no fim do dia (mm);
- SW_0 : quantidade de água no início do dia (mm);
- t : representa o intervalo de tempo em dia;
- P_d : a precipitação no dia (mm);
- Q_{sup} : representa o escoamento superficial (mm);
- E_a : quantidade de água que evapotranspirou no dia (mm);
- w_{vad} : quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm), e
- Q_{sub} : quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

O balanço hídrico é efetuado para cada Unidade de Resposta Hidrológica identificada, favorecendo melhor precisão e resultando em uma melhor descrição física dos processos.

Modificação da Equação Universal de Perda do Solo

O modelo hidrossedimentológico SWAT simula os processos erosivos através do modelo “Modificação da Equação Universal de Perda do Solo” (MEUPS). Mas, para melhor entendimento deste, faz-se necessário discorrer sobre o modelo ao qual o originou, a “Equação Universal de Perda do Solo” (EUPS). A EUPS trata-se de uma equação empírica no qual, acredita-se, que é possível de aplicação em qualquer local onde seja possível a obtenção dos valores numéricos de suas seis variáveis (Wichmeier and Smith, 1978), sendo considerada a mais simples dentre aquelas para estimação de processos erosivos (Beskow, 2009).

Produto da pesquisa de vários anos da “*National Runoff and Soil Loss Data Center*” em cooperação com a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos, através de estudos em 49 diferentes localidades, relacionando mais de 10 mil relações entre escoamento superficial e perda do solo, a EUPS surgiu como uma ferramenta para prover melhores práticas na agricultura. Este modelo permite que o planejador estime a taxa média anual de perda do solo para várias combinações de cultura, técnicas de manejo e práticas de controle em um determinado local (Wichmeier and Smith, 1978).

A EUPS apresenta-se como o produto de seis fatores, tal qual a equação (3.2), sendo seus parâmetros padronizados para uma parcela de determinado solo totalmente exposto, com um comprimento de 22,13m e declividade de 9%. Sendo assim, os valores para diferentes áreas são relações com os respectivos valores padrão da parcela.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (3.2)$$

No qual:

- *A*: perda do solo anual por unidade da área, expressa sob as unidades de *R* e *K* (ton/ha);
- *R*: fator de energia chuva e escoamento superficial (Mj*mm/ha*hr*ano);
- *K*: erodibilidade do solo [(0,013ton m² hr)/(m³ ton cm)];
- *L*: comprimento do declive (adimensional);
- *S*: grau do declive (adimensional);
- *C*: fator de cobertura do solo (adimensional), e
- *P*: fator das práticas conservacionistas (adimensional).

Neste ponto, é importante expor a diferença entre a EUPS e a MEUPS. A primeira possui bons resultados em termos anuais, uma vez que o fator *R* requer um estudo abrangente das médias anuais de precipitação. Por outro lado, a MEUPS substitui o termo *R* por um fator de escoamento superficial, que proporciona a aplicação do modelo para eventos isolados, simulando a erosão e a carga de sedimentos (Williams, 1975). A EUPS considera a "taxa de entrega" (a relação entre a carga de sedimentos em qualquer ponto ao longo de um canal pela carga a montante no ponto de origem) para representar o fator *R*, que está intimamente ligado com a energia de impacto da gota de chuva na desagregação das partículas do meio sólido. Enquanto na MEUPS a taxa de entrega não é considerada, uma vez que seu fator de escoamento superficial representa a energia para desprendimento das partículas do meio sólido e seu posterior transporte.

A equação da MEUPS nas unidades métricas é escrita na seguinte forma:

$$sed = 11,8(Q_{sup} \times q_{pico} \times \text{área}_{URH})^{0,56} \times K_{EUPS} \times C_{EUPS} \times LS_{EUPS} \times P_{EUPS} \times CFRG \quad (3.3)$$

no qual:

- *sed*: produção de sedimento, após evento de precipitação, no dia (ton);

- Q_{sup} : escoamento superficial (mm H₂O/ha);
- Q_{pico} : taxa de escoamento de pico (m³/s);
- área_{URH} : área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada o aporte de sedimentos (ha);
- LS : o produto do comprimento do declive e grau do declive proporciona o denominado “fator topográfico”, e
- $CFRG$: fator de fragmentação esparsa.

Escoamento Superficial (Q_{sup})

O escoamento superficial calculado no MEUPS, na rotina de simulação do SWAT, se dá através do Método de Curva Número, elaborado em 1954 pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service*, atualmente *Natural Resources Conservation Service*) dos Estados Unidos (Zhang, 2009). Tal método foi desenvolvido para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (Neitsch, 2005). Com diversas revisões, este método possui relevante popularidade entre os hidrólogos, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das predições (Zhang, 2009).

O escoamento superficial por este método se dá conforme equação 3.4:

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (3.4)$$

Onde:

- Q_{sup} : escoamento superficial (mm),
- P : precipitação (mm), e
- S : capacidade máxima de armazenamento (mm)

O parâmetro S varia espacialmente, considerando mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (Neitsch, 2005). Sua determinação considera o fator CN (Curva Número), e é dado pela seguinte equação – em unidades métricas:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.5)$$

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (Neitsch, 2005).

O "Natural Resources Conservation Service" propôs uma classificação hidrológica dos solos, na qual solos que oferecem um determinado potencial de escoamento superficial para a mesma intensidade de precipitação são postos no mesmo grupo. Com isto, foram propostos quatro grupos hidrológicos do solo (Neitsch, 2005). São eles:

- Grupo A: possuem elevada taxa de infiltração - por conseqüência produzem baixo escoamento superficial - mesmo quando úmidos. São solos arenosos profundos com pouco silte e argila, que possuem elevada transmissão de água, superior a 7,6 mm/h (Rawls, 1993).
- Grupo B: possuem infiltração moderada. São solos menos arenosos e menos profundos que o do grupo A e com moderada transmissão de água, entre 3,8 a 7,6 mm/h (Rawls, 1993).
- Grupo C: gera escoamento superficial acima da média, devido a sua baixa capacidade de infiltração. São solos que possuem uma fração considerável de argila e são pouco profundos. Sua taxa de transmissão está situada no intervalo entre 1,3 a 3,8 mm/h (Rawls, 1993).
- Grupo D: gera a maior proporção de escoamento superficial, motivo de sua baixa capacidade de infiltração. Solos que contém argilas expansivas e são poucos profundos. Possuem taxa de transmissão de água inferior a 1,3 mm/h (Rawls, 1993).

Por fim, a consideração da umidade antecedente do solo pode corrigir o valor de CN, quando há uma situação seca, ponto de murcha, ou uma situação em que está saturado, capacidade de campo (Neitsch, 2005). A condição de CN 2 expressa a condição normal do solo, CN 1 indica a condição do solo em ponto de murcha enquanto que CN 3 o solo na capacidade de campo. O cálculo de CN 1 e 3 se dá através uso do valor médio, CN 2, conforme as equações (3.6) e (3.7).

$$CN_1 = CN_2 \frac{20 \times (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636 \times (100 - CN_2)])} \quad (3.6)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0,00673 \times (100 - CN_2)] \quad (3.7)$$

Vazão de Pico (*qpico*)

Vazão de pico é considerada como o máximo do escoamento superficial, para um determinado evento de precipitação, sendo um indicador do potencial erosivo usado no cálculo da produção de sedimento para aquele fenômeno (Neitsch, 2005). O Método Racional, utilizado para encontrar a vazão de pico, é comumente usado para bacias pequenas, mas no modelo SWAT o cálculo é feito para as diversas Unidades de Resposta Hidrológica (Neitsch, 2005).

Este método baseia-se na consideração de que um evento de precipitação com intensidade "*i*", começando no tempo $t = 0$ e continuando indefinidamente, proverá um aumento na taxa do escoamento superficial até que atinja o tempo de concentração, $t = t_{conc}$, e desta maneira toda a área estará contribuindo com o fluxo no exutório (Neitsch, 2005).

A equação do método racional é dada por:

$$q_{pico} = \frac{C \times i \times A}{3,6} \quad (3.8)$$

A saber que 3,6 é um fator de conversão, tem-se:

- q_{pico} : vazão de pico (m^3/s);
- C : coeficiente de escoamento superficial;
- i : intensidade da precipitação (mm/h), e
- A : área da sub-bacia (km^2).

O coeficiente de escoamento superficial é dado pela razão entre o escoamento superficial, Q_{sup} (mm de H_2O), calculado pelo método SCS-CN, e o total diário precipitado P_{dia} (mm de H_2O). Ou seja:

$$C = \frac{Q_{sup}}{P_{dia}} \quad (3.9)$$

A intensidade da precipitação é a relação entre a quantidade de chuva durante o tempo de concentração, P_{tc} (mm de H_2O), e o tempo de concentração, t_{con} (h). Logo:

$$i = \frac{P_{tc}}{t_{conc}} \quad (3.10)$$

O valor de P_{tc} é dado por:

$$P_{tc} = \alpha_{tc} \times P_{dia} \quad (3.11)$$

O termo α_{tc} é a fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração.

Com isto, substituindo as equações (3.9), (3.10) e (3.11) na equação (3.8), resulta no dito Método Racional Modificado, ao qual o modelo SWAT realiza suas simulações.

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{sup} \times A}{3,6 \times t_{conc}} \quad (3.12)$$

Erodibilidade do Solo (K)

Tal fator busca evidenciar a facilidade com que determinado solo erode, a partir do impacto da chuva e/ou do escoamento superficial, sendo, portanto, estimado a partir das características intrínsecas ao tipo de solo e propriedades físicas (Bertoni, 2005). Seu conceito, segundo Wichmeier (Wichmeier and Smith, 1978), é a taxa de perda de solo, para um tipo de solo específico, em uma parcela padrão.

As propriedades físicas do solo que influenciam a erodibilidade podem ser observadas sob dois pontos principais: as que afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água, e as que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento (Wichmeier and Smith, 1978).

Uma verificação interessante do trabalho de Wichmeier (Wichmeier and Smith, 1978) foi que o solo torna-se menos erodível conquanto diminua a sua fração de silte, seja proporcionando aumento de areia ou argila.

A medição direta deste fator é dispendiosa, seja economicamente e temporalmente falando, por este motivo Wichmeier (Wichmeier and Smith, 1978) propôs uma equação geral, para solos com fração de silte inferior a 70%, que considera a fração de matéria orgânica no solo, a estrutura do solo e o perfil de permeabilidade, além do diâmetro representativo das partículas.

O método pelo qual este fator foi calculado, no presente trabalho, foi através da proposta de Williams (1995):

$$K_{USLE} = f_{areia,gr} \times f_{ar-si} \times f_{corg} \times f_{areia,fn} \quad (3.13)$$

Sendo:

- $f_{areia,gr}$: fator que representa o conteúdo de areia grossa;
- f_{ar-si} : representa a fração do solo que contem argila e silte;
- f_{Corg} : trata da estimativa da contribuição do carbono orgânico e
- $f_{areia,fn}$: é o fator que representa o conteúdo de areia fina.

Cada um destes fatores é calculado separadamente através das seguintes equações:

$$f_{areia,gr} = (0,2 + 0,3 \exp[-0,256 \times m_s * (1 - \frac{m_{silte}}{100})]) \quad (3.14)$$

$$f_{ar-si} = \left(\frac{m_{silte}}{m_c + m_{silte}} \right)^{0,3} \quad (3.15)$$

$$f_{corg} = \left(1 - \frac{0,25 \times orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95 \times orgC]} \right) \quad (3.16)$$

$$f_{areia,fn} = \left(1 - \frac{0,7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[5,51 + 22,9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (3.17)$$

Onde m_s é a percentagem de areia (partículas de diâmetro entre 0,05 a 2mm), m_{silte} é a percentagem de partículas de silte (com diâmetro entre 0,002 a 0,05 mm), m_c é a percentagem de argila (partículas cujo diâmetro é inferior a 0,002 mm) e $orgC$ é a fração de carbono orgânico para cada camada do solo.

Fator de Cobertura do Solo (C)

Conceituado enquanto a relação entre as perdas de solo de um determinado terreno cultivado sob dadas condições e as perdas correspondentes desse mesmo solo

na parcela padrão (Wichmeier and Smith, 1978). Com isto, para determinado solo desprovido de cobertura, este fator apresenta valor numérico 1 e conforme o grau de cobertura vegetal, provendo redução de erosão e a tendência deste valor para o zero. Tal fator é evidenciado uma vez que a cobertura dos vegetais reduz a energia do impacto das gotas de chuva, e a conseqüente desagregação das partículas.

Este é um fator que busca considerar o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura e manejo que incluem: tipo de vegetação, população, desenvolvimento (estágio da cultura), época do ano e manejo da cultura (Bertoni, 2005). O fator *C* verifica ainda os restos de vegetais que podem ser deixados na superfície, que favorecem a existência de irregularidades (Bertoni, 2005).

Fator Topográfico (LS)

O produto da comprimento do declive (*L*) e o grau de declive (*S*) origina o fator topográfico, que considera a topografia do terreno influencia no efeito da erosão. O comprimento do declive é a distância horizontal da origem do fluxo superficial até o ponto em que o gradiente de declividade possibilita a deposição ou quando o escoamento alcança fluxo bem definido. Enquanto o grau de declividade reflete a influência da declividade na erosão (Wichmeier and Smith, 1978).

Segundo Wichmeier (Wichmeier and Smith, 1978), o comprimento do declive apresenta influência desprezível, em termos anuais, para a geração de escoamento superficial. O mesmo não pode ser dito para a declividade, a qual o escoamento superficial possui influência direta. Por outro lado, ambas variáveis respondem com grande influência para a perda de solo.

Este fator é estimado diretamente pelo MDE utilizado como dado de entrada para a simulação através do modelo SWAT. Como abordado anteriormente, o modelo aplica a MUSLE, identificando o valor do fator *LS* para cada URH. Trata-se de um processo com bastante incerteza agregada, haja vista que o cálculo do comprimento do declive é dado pela distância entre os pontos extremos – mais alto e mais baixo – da UHR, e a declividade baseia-se na relação entre a diferença altimétrica e a distância entre esses pontos (Uzeika, 2009). Esta abordagem bastante simplificada não considera o espaço entre os pontos extremos podendo ocasionar estimativas fora da realidade, de modo

que se este espaço for na realidade uma superfície convexa haverá uma subestimativa e se for côncava haverá uma superestimativa (Bertoni, 2005).

Práticas Conservacionistas (P)

Relação da perda de solo, para uma cultura específica, de uma determinada prática de conservação do solo com a plantação “morro abaixo” (no sentido do declive) (Wichmeier and Smith, 1978). O pesquisador atentou que tais práticas mudam o padrão, grau e direção do fluxo, reduzindo a quantidade e taxa de erosão do solo.

Logo, áreas que não apresentem tais práticas, proporcionam a erosão sem obstáculos, e o fator tem valor igual a 1.

Fator de fragmentação esparsa (CFRG)

Este fator considera o afloramento de rocha na área, através da seguinte equação:

$$CFRG = \exp(-0,053 \times \text{rochas}) \quad (3.18)$$

No qual o termo “rochas” representa a fração da área de afloramento rochoso.

Evapotranspiração

O modelo SWAT permite o cálculo da evapotranspiração potencial através de três métodos: (1) Penman-Monteith, (2) Priestley-Taylor e (3) Hargreaves. Para a correta estimativa desta variável, o modelo requer dados médios climáticos mensais referentes ao período simulado. Ainda é possível entrar diretamente com os dados de evapotranspiração observados para o período simulado.

Uma vez que a evapotranspiração potencial é determinada, busca-se a real através da demanda evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, da transpiração dos vegetais e da evaporação do solo.

Armazenamento na Copa

A copa dos vegetais é uma variável que pode influenciar significativamente os processos de transformação da precipitação, capaz de reduzir o a quantidade de água que alcança a superfície e diminuindo o poder erosivo das chuvas.

A quantidade máxima de água que pode ser armazenada nas copas é calculada em função do índice de área foliar, conforme:

$$cop_{dia} = cop_{mx} \frac{IAF}{IAF_{mx}} \quad (3.19)$$

Com cop_{dia} a quantidade máxima de água que pode ser armazenada na copa em um dado dia, cop_{mx} a quantidade máxima de água armazenada na copa quando esta está completamente desenvolvida, IAF trata do índice de área foliar para um determinado dia e IAF_{mx} o índice de área foliar máximo quando do completo desenvolvimento do vegetal.

Diante desta condição, o modelo considera que a copa dos vegetais deverá ser preenchida antes que a outra fração da precipitação alcance o solo. Assim, o modelo considera que o volume interceptado está disponível para evapotranspiração sob as seguintes condições (com todas as variáveis possuindo como unidade "mm"):

1. Se a evapotranspiração potencial (E_0) for inferior a quantidade de água armazenada na copa (R_{int}), então a quantidade de água interceptada no dia ($R_{int,d}$) será resultado da subtração da quantidade água interceptada no início do intervalo de tempo ($R_{int,0}$) pela evapotranspiração potencial (ou diretamente a evapotranspiração da quantidade de água livre existente no vegetal - E_{cop}):

$$E_a = E_{cop} = E_0 \Rightarrow R_{int,d} = R_{int,0} - E_{cop} \quad (3.20)$$

2. No caso da evapotranspiração potencial ser superior a quantidade de água armazenada na copa, então toda lâmina interceptada será evaporada:

$$E_{cop} = R_{int,0} \Rightarrow R_{int,d} = 0 \quad (3.21)$$

Uma vez que este processo é estimado, o modelo procede com o cálculo da demanda evaporativa restante pelos vegetais e pelo solo.

Transpiração

Este cálculo é efetuado diretamente sob duas condições, considerando o crescimento vegetal ideal, conforme:

$$E_t = (E'_o \times IAF) / 3 \quad \text{se } 0 \leq IAF \leq 3 \quad (3.22)$$

$$E_t = E'_o \quad \text{se } IAF > 3 \quad (3.23)$$

Sendo:

- E_t : transpiração máxima para o dia (mm), e
- E'_o : demanda evaporativa restante (mm), resultada da subtração direta da demanda evaporativa potencial por aquela que se deu pela interceptação.

Esta é uma estimativa que pode não ser realista – por tratar o solo com água disponível para compensação pelos vegetais.

Evaporação do Solo

A quantidade de evaporação do solo é estimada através de uma função exponencial, obedecendo a profundidade do solo e a quantidade de água existente. Diante disto, o SWAT é capaz de avaliar a demanda evaporativa para diferentes camadas do solo, de modo que não é possível a compensação da evaporação entre diferentes camadas.

$$E_{solo,z} = E_z'' \times \frac{z}{(z + \exp(2,374 - 0,00713 \times z))} \quad (3.24)$$

onde $E_{solo,z}$ é a demanda evaporativa (mm) na profundidade z , E_z'' é a evaporação máxima do solo para o dia (mm) e z é a profundidade do solo (mm).

Visando uma melhor estimativa da distribuição da evaporação, o modelo incorpora o coeficiente de compensação da evaporação do solo ($ESCO$). Este coeficiente rege a extração de demanda evaporativa das camadas inferiores do solo, de modo que quanto menor seu valor mais será retirado de profundidades maiores do solo. Diferentes valores de $ESCO$, que pode variar entre 0,01 a 1, estão apresentados na figura a seguir.

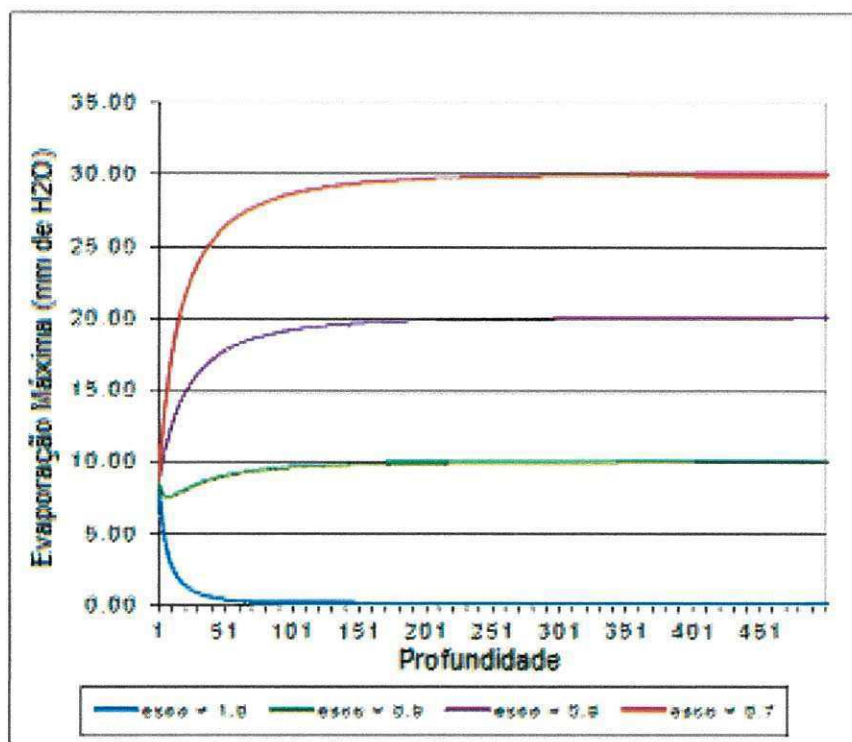


Figura 3.3 Variação de ESCO para a máxima demanda evaporativa e profundidade do solo (Neitsch, 2005)

O modelo SWAT não permite que a demanda por evaporação de uma camada do solo seja compensada por uma inferior.

Tempo de Concentração

Tempo de concentração é aquele necessário para que, em um evento de precipitação, toda área da bacia hidrográfica esteja contribuindo para o fluxo no exutório. Ou seja, o tempo em que a fração da precipitação incidente no ponto mais distante do exutório, contido na sub-bacia, alcançará seu exutório.

No modelo SWAT este parâmetro é calculado através da soma do tempo de concentração do fluxo superficial (entendido como o tempo necessário para que o fluxo superficial alcance o canal desde o ponto mais distante da sub-bacia) e do tempo de concentração do fluxo através do canal (tempo requerido para que o fluxo desde o ponto mais a montante alcance o exutório).

$$t_{conc} = t_{c\,sup} + t_{c\,can} \quad (3.25)$$

no qual t_{con} é o tempo de concentração na sub-bacia, $t_{c\,sup}$ é o tempo de concentração do fluxo superficial e $t_{c\,can}$ é o tempo de concentração no fluxo do canal. Todos esses parâmetros são dados na unidade de hora.

O tempo de concentração do fluxo superficial é dado por:

$$t_{c\,sup} = \frac{L_{slp}^{0,6} \times n^{0,6}}{18 \times slp^{0,3}} \quad (3.26)$$

no qual L_{slp} é o comprimento da encosta dado em metros, n é o coeficiente de rugosidade de Manning e slp é a declividade média da sub-bacia (m/m)

Enquanto que o tempo de concentração do fluxo superficial é encontrado pela seguinte equação:

$$t_{c\,can} = \frac{0,62 \times L \times n^{0,75}}{Area^{0,125} \times slp_{can}^{0,375}} \quad (3.27)$$

sendo L o comprimento do canal em quilômetros, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, $Area$ é a área da sub-bacia (km²) e slp_{can} é a declividade média do canal (mm).

Retardo do Escoamento Superficial

O modelo SWAT processa um armazenamento do escoamento superficial visando simular seu retardamento para alcançar o canal principal.

Uma vez que o escoamento superficial é calculado, o volume de água que chega ao canal principal é dado pela seguinte equação:

$$Q_{sup} = (Q'_{sup} + Q_{arm,i-1}) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{SURLAG}{t_{conc}}\right) \right] \quad (3.28)$$

Sendo:

- Q_{sup} : quantidade de água que chega ao canal principal por escoamento superficial(mm);
- Q'_{sup} : quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm);
- $Q_{arm,i-1}$: quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm);
- $SURLAG$: coeficiente de atraso do escoamento superficial, e

- t_{conc} : tempo de concentração (horas).

O segundo termo do lado direito da equação representa a fração do total do volume de água ao qual será permitido alcançar o canal em um dia. O valor de *SURLAG* rege tal fração de modo que quanto maior, menos água será mantida armazenada. A figura 3.4 plota diferentes valores de *SURLAG* e do tempo de concentração para aquele termo.

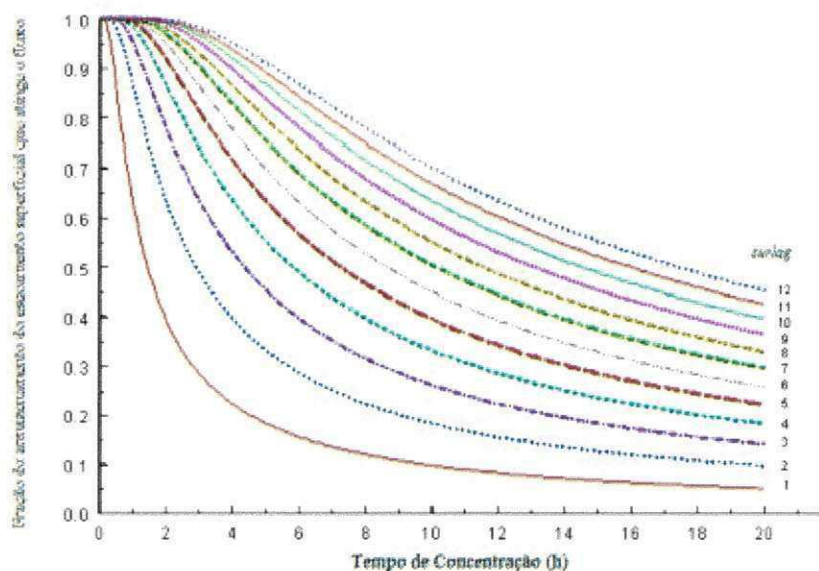


Figura 3.4 Diferentes valores de *SURLAG* em função da retenção do escoamento superficial e o tempo de concentração (h) (Neitsch, 2005)

Percolação

Este processo combina duas condições, a primeira através da propagação do armazenamento e a segunda pelo fluxo por fendas existentes no solo. A percolação através da propagação do armazenamento no solo é calculada para cada horizonte, uma vez que o volume de água exceda a capacidade de campo deste sob a condição de que a camada seguinte não esteja saturada.

Assim, o volume de água disponível para percolar deve obedecer a seguinte condição:

$$SW_{cam,excesso} = SW_{cam} - FC_{cam} \quad \text{se } SW_{cam} > FC_{cam} \quad (3.29)$$

$$SW_{cam,excesso} = 0 \quad \text{se } SW_{cam} \leq FC_{cam} \quad (3.30)$$

Com $SW_{cam,excesso}$ a quantidade de água disponível para percolar no dia (mm), SW_{cam} a quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm) e FC_{cam} é a quantidade de água na capacidade de campo (mm).

A quantidade de água que efetivamente se moverá para a camada de solo inferior é calculada pela equação:

$$w_{perc,cam} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (3.31)$$

Sendo:

- $w_{perc,cam}$: quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm);
- ΔT : duração do intervalo de tempo (h), e
- TT_{perc} : tempo de percolação entre as camadas (h).

O tempo de percolação entre as camadas é dado por:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{cam} - FC_{cam}}{K_{sat}} \quad (3.32)$$

Com SAT_{cam} a quantidade de água no solo completamente saturado (mm) e K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada.

A água que percola abaixo da última camada do solo entra na zona vadosa, para só depois adentrar no aquífero subterrâneo.

Escoamento Sub-Superficial Lateral

Calculado em paralelo com o processo de percolação para profundidade de até 2 m, o fluxo de base é calculado através do Modelo de Armazenamento Cinético. Este modelo considera o balanço hídrico com todo o segmento da encosta utilizado como volume de controle, em um fluxo bi-dimensional.

O escoamento sub-superficial lateral é estimado pela seguinte equação:

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2 * SW_{cam,excesso} * K_{sat} * slp}{\Phi_d * L_{slp}} \right) \quad (3.33)$$

Onde:

- Q_{lat} : escoamento lateral (mm/dia);

- $SW_{cam,excesso}$: volume de água drenável armazenada na zona saturada da encosta por unidade de área (mm);
- K_{sat} : condutividade hidráulica do solo saturada (mm/hr);
- s/p : declividade da encosta (m/m);
- Φ_d : porosidade drenável do solo (mm/mm) e
- $L_{s/p}$: comprimento da encosta (m).

Água Subterrânea

O volume de água que percola tende a recarregar os aquíferos, o raso e o profundo, caso não ascenda através das franjas capilares.

A quantidade de água que pode recarregar ambos aquíferos é dada por:

$$W_{rec} = \left(1 - \exp\left[-1/\delta_{aq}\right]\right) W_{seep} + \exp\left[-1/\delta_{aq}\right] W_{rec,i-1} \quad (3.34)$$

sendo:

- W_{rec} : quantidade de água que adentra os aquíferos no dia "i" (mm);
- δ_{aq} : tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia);
- W_{seep} : quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm), e
- $W_{rec,i-1}$: quantidade de água que entra no aquífero no dia $i-1$ (mm)

Com isto, o modelo regula a quantidade de água que recarrega o aquífero profundo pelo uso da seguinte equação:

$$W_{prf} = \beta_{prf} \times W_{rec} \quad (3.35)$$

Identificando W_{prf} como quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo no dia i e β_{prf} como o coeficiente de percolação do aquífero.

Assim, a quantidade de água destinada ao aquífero raso é dada diretamente por:

$$W_{rec,rs} = W_{rec} \times W_{prf} \quad (3.36)$$

$W_{rec,rs}$ é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero raso no dia "i".

Em conclusão tem o balanço hídrico para o aquífero raso dado por:

$$aq_{rs,i} = aq_{rs,i-1} + W_{rec,rs} - Q_{aq} - W_{revap} - W_{bomba,rs} \quad (3.37)$$

sendo:

- $aq_{rs,i}$: quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia " (mm);
- $Aq_{rs,i-1}$: quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia "i" (mm);
- $W_{rec,rs}$: quantidade de água que recarrega o aquífero raso no dia (mm);
- Q_{aq} : escoamento subterrâneo que recarrega o canal principal (mm);
- W_{revap} : quantidade de água que ascende por franjas capilares (mm), e
- $W_{bomba,rs}$: quantidade de água retirada através de bombas (mm).

REVAP

Afim de considerar o volume de água que ascende através de franjas capilares, em função da demanda de evapotranspiração, o modelo SWAT incorpora o processo denominado por "REVAP". Este processo não é contabilizado no volume evapotranspirado, sendo de fundamental importância em bacias onde a zona saturada encontra-se próxima a superfície e há raízes profundas.

A máxima quantidade de água que poderá ser retirada via *REVAP* é dada por:

$$W_{revap,mx} = \beta_{rev} \times E_o \quad (3.38)$$

sendo $W_{revap,mx}$ a máxima quantidade de água (mm) que ascende em resposta ao déficit hídrico, β_{rev} é o coeficiente de *REVAP* e E_o é potencial de evapotranspiração (mm) daquele dia.

A quantidade de água na qual efetivamente passa por tal processo é determinada pelas seguintes condições:

$$1. \quad W_{revap} = 0 \quad \text{se } aq_{rs} \leq aq_{lim,rv} \quad (3.39)$$

$$2. \quad W_{revap} = W_{revap,mx} - aq_{lim,rv} \quad \text{se } aq_{lim,rv} < aq_{rs} < (aq_{lim,rv} + W_{revap,mx}) \quad (3.40)$$

$$3. \quad W_{revap} = W_{revap,mx} \quad \text{se } aq_{lim,rv} \geq (aq_{lim,rv} + W_{revap,mx}) \quad (3.41)$$

Com:

- W_{revap} : quantidade de água que ascende (mm);
- aq_{rs} : quantidade de água armazenada no aquífero raso (mm), e
- $aq_{lim,rv}$: valor limite do nível de água a ser superado para ocorrer o processo *REVAP* (mm).

Este processo possibilita reger a quantidade de água que recarregaria os aquíferos. No caso da área de estudo, que não há aquíferos, este processo é levado ao máximo para computar as perdas do volume que percola.

Crescimento Vegetal

O modelo SWAT simula o crescimento das plantas através de uma versão simplificada do modelo EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate Model*), desenvolvido por Williams (1995).

Neste modelo, o desenvolvimento das plantas se dá como função de unidades de calor, assumindo que cada espécie possui uma temperatura de base, abaixo da qual não se desenvolve, uma temperatura ótima, e uma temperatura máxima, que quando alcançada também faz cessar o crescimento. Um valor de unidades de calor é estipulado para que a planta alcance a maturidade. A maturidade será atingida quando a soma das diferenças entre as temperaturas médias diárias e a temperatura de base da planta alcançar o valor de unidade de calor estabelecido.

3.2.2 Fase da água ou de propagação

Nesta fase são realizados os cálculos de movimento da água e os elementos nela presentes.

Propagação da Vazão Líquida no Canal

O método de propagação da vazão líquida utilizado neste trabalho foi o de Armazenamento Variável, desenvolvido por Williams (1969). Este método considera o canal de seção trapezoidal e sua vazão e velocidade calculadas através da equação de Manning, sendo o tempo de propagação calculado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade.

Neste método o cálculo da propagação da vazão líquida é dado para um segmento do canal por um determinado intervalo de tempo, considerando a equação da

continuidade, de modo que se torna possível encontrar o volume armazenado no trecho.

$$\Delta V_{arm} = V_{in} - V_{out} \quad (3.41)$$

Onde ΔV_{arm} é o volume armazenado no trecho (m^3), V_{in} e V_{out} são os volumes de entrada e saída no segmento, respectivamente (m^3).

Assim, utilizando o "tempo de viagem" e o coeficiente de armazenamento, encontra-se o volume de água que sai do trecho em um determinado intervalo de tempo. Conforme as equações a seguir:

$$V_{out,2} = SC(V_{in} + V_{arm,1}) \quad (3.42)$$

Com:

- $V_{out,2}$ o volume que sai do trecho no fim do intervalo de tempo (m^3);
- SC o coeficiente de armazenamento;
- V_{in} o volume de água que entra no início do intervalo de tempo (m^3), e
- $V_{arm,1}$ é o volume armazenado no início do intervalo de tempo (m^3).

Sendo o coeficiente de armazenamento dado por:

$$SC = \left(\frac{2 \times \Delta T}{2 \times TT + \Delta T} \right)$$

(3.43)

O intervalo de tempo é dado por Δt , e a variável TT significa o "tempo de viagem" encontrado através da divisão entre o volume armazenado e o fluxo de saída. Esta variável parte do princípio que a relação em que se estabelece é constante, assim:

$$TT = \frac{V_{arm}}{q_{out}} = \frac{V_{arm,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{arm,2}}{q_{out,2}} \quad (3.44)$$

Com:

- TT tempo de viagem (segundo);
- V_{arm} , $V_{arm,1}$ e $V_{arm,2}$ são os volumes armazenados no tempo (m^3), e
- q_{out} , $q_{out,1}$ e $q_{out,2}$ são as vazões de saída no tempo (m^3/s).

O volume de entrada no segmento é conhecido através dos cálculos anteriores, e o volume de saída no início do intervalo de tempo. O fluxo no canal é submetido a perdas por transmissão e evaporação.

Propagação da vazão sólida no canal

O transporte de sedimentos é encarado como função dos processos de degradação e deposição acontecendo simultaneamente. Tais processos são estimados pelo modelo utilizando uma adaptação do método de Potência do Fluxo proposto por Bagnold. De início, a quantidade máxima que pode ser transportada pelo fluxo em determinado trecho é dada por:

$$conc_{sed, mx} = C_{sp} \times v_{pc}^{spexp} \quad (3.45)$$

No qual:

- $conc_{sed, mx}$ é a concentração máxima de sedimentos que pode ser transportada pela água (ton/m³ ou kg/L);
- v_{pc} é a velocidade de pico (m/s) e
- C_{sp} e $spexp$ são coeficientes de ajuste.

O coeficiente linear pode variar entre 0,0001 a 0,01 enquanto que o expoente pode assumir valores entre 1 a 2.

A concentração máxima de sedimentos é comparada com a concentração de sedimentos existente no início de cada intervalo de tempo. No caso da concentração no início do intervalo de tempo ser superior a máxima, tem-se o processo de deposição predominando e estimado por:

$$sed_{dep} = (conc_{sed, 0} - conc_{sed, mx}) v_{pc} \quad (3.46)$$

A quantidade de sedimentos depositada é dada pela variável sed_{dep} em toneladas, enquanto que a concentração no início do intervalo de tempo é dada por $conc_{sed, 0}$ na unidade de [kg/L] ou [ton/m³].

No caso da concentração atual ser inferior a máxima possível, a erosão é o processo que domina sendo estimada por:

$$sed_{ero} = (conc_{sed, mx} - conc_{sed, 0}) v_{pc} \times K_{ca} \times C_{ca} \quad (3.47)$$

Onde,

- sed_{ero} é a quantidade de sedimentos que é erodida (toneladas);
- K_{ca} é o fator de erodibilidade do canal (cm/hr⁻¹Pa⁻¹) e,
- C_{ca} é o fator de cobertura do canal.

O fator de erodibilidade do canal segue a mesma premissa do fator referente ao solo, sendo comumente inferior em uma ordem de magnitude deste último. Enquanto que o fator de cobertura do canal busca estimar a proteção do leito devido a existência de vegetação.

Uma vez que são calculadas a quantidade de sedimentos que deposita e erode, tem-se a estimativa final das partículas existentes no trecho, sed_{at} (ton), através de:

$$sed_{at} = sed_{sed,o} - sed_{dep} + sed_{ero} \quad (3.48)$$

Por fim, a quantidade de sedimento que sai do trecho do canal é estimada com uso da seguinte equação:

$$sed_{out} = sed_{at} \frac{V_{out}}{V_{ca}} \quad (3.49)$$

Sendo sed_{out} a concentração de sedimentos que sai do trecho (ton), V_{out} trata do volume que sai no intervalo de tempo (m^3) e V_{ca} diz respeito ao volume de água no trecho (m^3).

3.2.3 Reservatórios

Os dados mínimos requisitados pelo modelo para simular um reservatório são:

- RES_SUB: indicação a qual sub-bacia o reservatório é vinculado;
- IYRES: ano ao qual o reservatório tornou-se operacional;
- RES_ESA: área do espelho d'água quando o reservatório possui a cota do sangradouro de emergência [ha];
- RES_EVOL: volume de água necessário para encher o reservatório até o nível do sangradouro de emergência [$10^4 m^3$];
- RES_PSA: área do espelho d'água quando o reservatório possui a cota do sangradouro principal [ha];
- RES_PVOL: volume de água necessário para encher o reservatório até o nível do sangradouro de emergência [$10^4 m^3$] e
- RES_VOL: volume inicial para o período da simulação.

O modelo fornece alternativas para volume liberado pelo reservatório ao longo da simulação. Apenas uma delas utiliza os dados fornecidos de modo a estimar o volume

de saída, as demais lidam com dados fornecidos. Diante da dificuldade, foi selecionada a estimativa através do uso dos volumes para as diferentes cotas, que se dá pelas seguintes condições:

$$V_{V_{sai}} = V - V_{pr} \text{ se } V - V_{pr} < Q_{Krel} * 86400 \quad (3.50)$$

$$V_{V_{sai}} = q_{Krel} \times 86400 \text{ se } V - V_{pr} > Q_{Krel} * 86400 \quad (3.51)$$

E se o volume superar aquele da capacidade do sangradouro principal, tem-se:

$$V_{V_{sai}} = (V - V_{em}) + (V_{em} - V_{pr}) \text{ se } V_{em} - V_{pr} < Q_{Krel} * 86400 \quad (3.52)$$

$$V_{V_{sai}} = (V - V_{em}) + q_{Krel} \times 86400 \text{ se } V_{em} - V_{pr} > Q_{Krel} * 86400 \quad (3.53)$$

Sendo:

- $V_{V_{sai}}$: volume de água que sai do reservatório no dia;
- V : volume de água armazenada no reservatório;
- V_{pr} : volume de água no reservatório quando ao nível do sangradouro principal;
- V_{em} : volume de água quando ao nível do sangradouro de emergência;
- Q_{Krel} : trata-se de um coeficiente de vazão de saída para o intervalo de tempo diário. É uma taxa de vazão de saída do reservatório para o caso do volume em excesso ao sangradouro principal, ou de emergência, não extravase no espaço de tempo de um dia.

3.3 ArcSWAT

O modelo geo-espacial ArcSWAT é uma extensão para ArcGIS-ArcView (ESRI – *Environmental Systems Research Institute*) utilizado como ferramenta de pré e pós processamento de dados para a execução do modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Entre os dados de entrada, a interface é capaz de armazenar dados geoespaciais, numéricos e de texto (Olivera, 2006). Dados geoespaciais referem-se aos arquivos do Modelo Digital de Elevação (MDE), Uso e Ocupação do Solo e Tipo de

Solo. Enquanto que os dados numéricos e de texto caracterizam os dados espaciais, climáticos e hidrológicos. O MDE além de proporcionar o processo de delimitação da bacia hidrográfica, pela identificação da rede de drenagem através do "Algoritmo de Oito Direções", também permite a extração de todos os parâmetros topográficos necessários para a execução do modelo. O Algoritmo de Oito Direções (D-8) trata da identificação de uma célula central na qual haverá fluxo superficial para uma das oito células vizinhas, sendo o critério para o escoamento a maior declividade (Lacroix, 2002). Diante disto, a interface delimita para cada canal sua respectiva sub-bacia, uma vez que o modelo SWAT exige tal perspectiva para correta execução (Winchell, 2007).

Ainda, de vital importância no pré-processamento de dados está a configuração da chamada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) contida nas sub-bacias. A interface é capaz de fazer conversões dos dados geoespaciais de Uso e Tipo de Solo para o banco de dados, encontrando combinações únicas destes dois aspectos e obedecendo a intervalos de declividade definidos pelo usuário. É no âmbito da área de uma URH que o SWAT procede com suas simulações.

Por fim, a interface provê um gerador de dados climáticos (velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar) para fornecimento de algumas variáveis para suas simulações. Enquanto ferramenta de pós-processamento a interface é capaz de proceder com uma organização estrutural dos resultados promovendo visualização objetiva com diversos arquivos de saída.

CAPÍTULO 4 ÁREA DE ESTUDO E GERAÇÃO DE BANCO DE DADOS

A área de estudo, ao qual o modelo SWAT foi aplicado é descrita neste capítulo, bem como os dados geoespaciais que a dizem respeito. Tais dados são fundamentais para a definição das URH nos processos de simulação hidrossedimentológica.

3.2 Área de Estudo

4.1.1 Breve Histórico e Relevância

Através da realização de um convênio entre a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e pelo instituto francês de cooperação técnica ORSTOM – (*Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération*), implantou-se, no ano de 1982, a Bacia Experimental de Sumé (BES). Esta bacia está inserida na Bacia Representativa de Sumé, na sub-bacia de Umburana (Aragão, 2006). A implantação desta bacia marca o início de uma série de trabalhos no campo da hidrologia no semiárido por parte da Universidade Federal de Campina Grande.

No ano de 1985, um acordo firmado pela então UFPB (Campus II, Campina Grande) e a agência alemã GTZ proporcionou o estabelecimento da Bacia Escola da Universidade Federal de Campina Grande. Após vários anos de investigações a BES precisou ser desativada em 1999, e as pesquisas foram transferidas, neste mesmo ano, para a Bacia Experimental de São João do Cariri, com as instalações progressivas das unidades de experimentação.

Ambas as bacias situam-se em região hidrologicamente homogênea, com solo, relevo, vegetação e clima semelhantes, permitindo a continuidade dos trabalhos a partir

da extrapolação, obedecendo a devida escala, dos resultados anteriormente obtidos na Bacia Experimental de Sumé (Aragão, 2006).

A Bacia Experimental de São João do Cariri possui como curso principal o Riacho dos Namorados, sendo o seu exutório o Açude Namorados, que abastece a cidade de São João do Cariri.

Os trabalhos na BESJC iniciaram-se com a construção de duas parcelas de erosão com área de 100 m², logo em 1999. A partir de então, duas novas micro-bacias aninhadas foram construídas possuindo áreas de 0,16 e 1,63 hectares, no ano de 2000. Em 2001 duas novas micro-bacias aninhadas foram construídas possuindo áreas de 0,16 e 1,63 hectares. O ano de 2002 estabelece o desenvolvimento do projeto IBESA (Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido), com a instalação de três estações pluviométricas automáticas, uma estação climatológica de superfície automática, duas estações fluviométricas e fluviográficas, além da recuperação de duas estações pluviométricas e uma pluviográfica (Alcântara, 2008). Com isto, adquire-se uma melhor representatividade dos dados monitorados.

4.1.2 Localização

Próxima à sede do município de São João do Cariri está localizada a Bacia do Riacho dos Namorados, sua referência geográfica é 7°25' latitude sul, 36°30' longitude oeste, estando a cerca de 206 km da capital da Paraíba – João Pessoa – atingindo uma área de aproximadamente 13,5 km². Todo o município está inserido na zona fisiográfica do planalto da Borborema, sendo parte da mesorregião da Borborema e a microrregião do Cariri Oriental, local situado na diagonal seca existente neste planalto, onde existe linha de fluxo e refluxo das massas de ar que atuam na região Nordeste.

As figuras 4.1 e 4.2 expõem respectivamente a mesorregião da Borborema e a microrregião do Cariri Oriental, e a localização da Bacia do Riacho dos Namorados

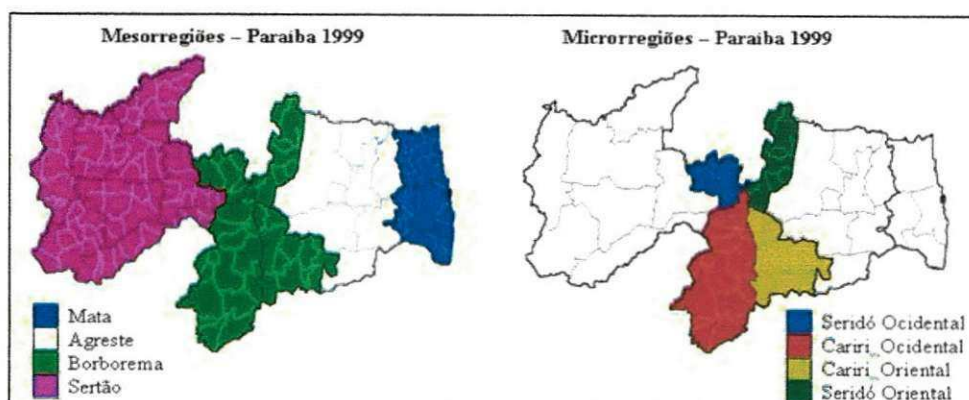


Figura 4.1 Localização das mesorregiões e microrregiões do Estado da Paraíba (Fonte: Chaves, 2004)

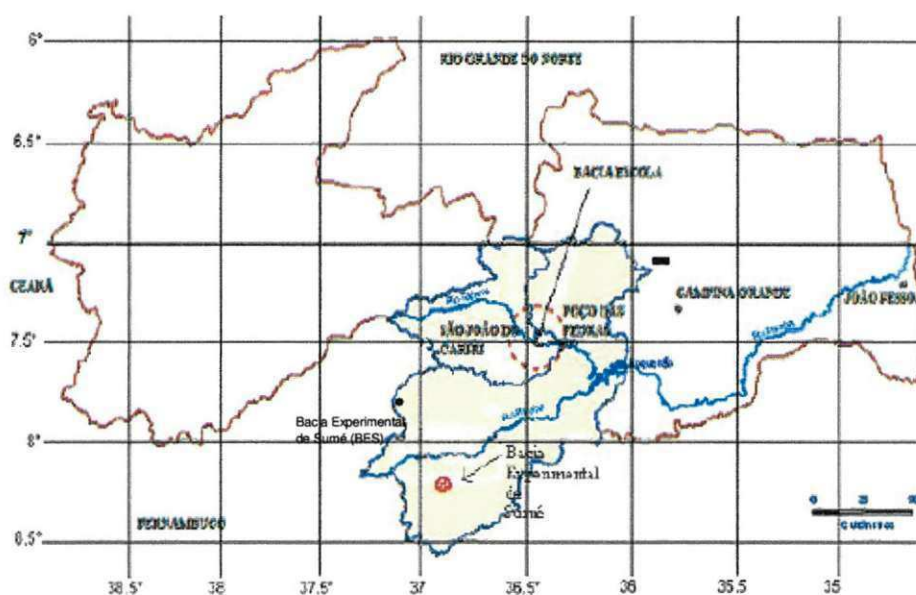


Figura 4.2 Região do Cariri Paraibano, Bacias dos Rios Taperoá e Paraíba e localização da BESJC no Estado da Paraíba (Fonte: Srinivasan, 2004).

A despeito da área da Bacia do Riacho dos Namorados, apenas 3,3 km², Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC) estão sob controle do convênio das universidades federais da Paraíba e de Campina Grande, sendo a maior parte da área de propriedade de diversos particulares (Chaves, 2002). A figura 4.3 mostra a área sob comando federal, incluindo diversos limites e indicações de algumas unidades experimentais lá existentes.

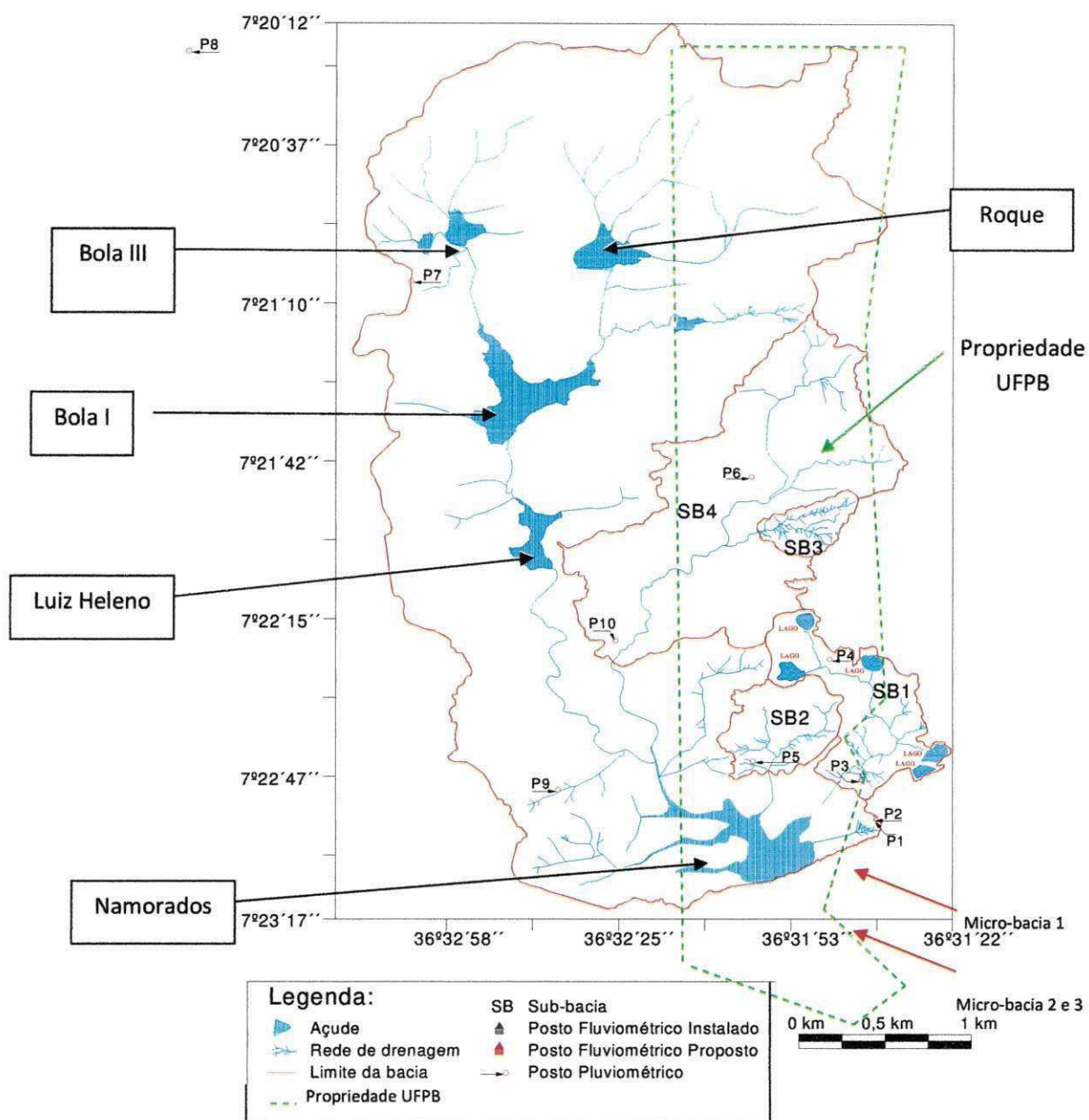


Figura 4.3 Limitação da BESJC (de verde) e suas unidades experimentais (Fonte: Aragão, 2006)

4.1.3. Características Físico-Climáticas da Bacia Riacho dos Namorados

Clima

BESJC possui características físico-climáticas semelhantes a outras áreas do Nordeste semiárido, sendo por este motivo considerada representativa da região (Aragão, 2006). As variáveis climáticas são registradas através de pluviômetros, pluviógrafos e de duas estações climatológicas, sendo uma convencional, instalada em 1983, e outra, automática, instalada em 2001.

A precipitação média anual da região da Bacia do Riacho dos Namorados fica em torno de 500 mm, demonstrando forte irregularidade anual, com concentração de chuvas no primeiro quadrimestre do ano (Srinivasan, 2004).

Tem-se na área de estudo a temperatura média anual de 25 °C e a umidade relativa média anual é de 70,6%, de forma que o mês de menor temperatura (junho) marca o período de maior umidade. A evaporação média no tanque classe A é de 5,5 mm/dia e a insolação solar média é em torno de 7,7 horas por dia (Srinivasan, 2004).

Relevo e Solos

A Bacia do Riacho dos Namorados apresenta altitude variando entre 450 a 560 metros acima do mar (Paes-Silva 2002; Chaves, 2002) e relevo predominantemente ondulado (Paiva, 2008).

O solo na área da bacia é raso e o subsolo é derivado do embasamento cristalino (Chaves, 2002). Dentre as manchas de solos encontradas na área da bacia poderão ser citados as seguintes: Luvissole Crômico Vértico - TC (Bruno Não-Cálcico Vértico), o Vertissolo Cromado Órtico - VC (Vertisol) e o Neossolo Lítico - RL (Solo Litólico), ocorrendo em 55,6, 22,4 e 7,9% da área, respectivamente. Ocupando áreas menores, ocorrem os Cambissolo Háplico - CX (Cambisol), Neossolo Flúvico - RU (Solo Aluvial), Planossolo Háplico - SX (Planosol Solódico) e Afloramentos de rocha associados a Neossolo Lítico (Figura 4.4).

CLASSES DE SOLOS

 CX – CAMBISSOLO HÁPLICO	 RU – NEOSSOLO FLÚVICO
 SX – PLANOSSOLO HÁPLICO	 RL – NEOSSOLO LITÓLICO
 AFLORAMENTO	 TC – LUVISSOLO CRÔMICO VÉRTICO
 VC – VERTISSOLO CROMADO ÓRTICO	 LAGOA
	 AÇUDE

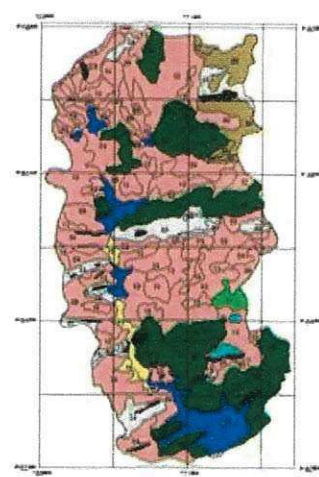


Figura 4.4 Classes de solo da Bacia do Riacho dos Namorados (Fonte: Chaves, 2002)

Os solos identificados na bacia hidrográfica são em grande parte os que predominam na microrregião. São os Bruno Não Cálxico Vértico fase pedregosa caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado, o Vertisol fase pedregosa caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado e Solos Litólicos Eutróficos com horizonte A fraco, textura arenosa caatinga hiperxerófila relevo suave ondulado e ondulado substrato gnaisse e granito (Ministério da Agricultura, 1972).

Segundo Chaves (2002), os Luvisolos Crômico Vértico - antigo Bruno Não Cálxico vértico - são solos rasos a moderadamente profundos com seqüência de horizontes do tipo A, B e C de textura argilosa ou média, bem drenados, desenvolvidos de rochas metamórficas. Eles apresentam minerais primários de fácil intemperização no perfil e fertilidade natural média a alta. Este tipo de solo ocupa grande parte da bacia, havendo áreas severamente erodidas, conforme maior declividade do terreno (Paes-Silva, 2002).

Os Vertissolos são solos argilosos a muito argiloso e menos desenvolvido que os Lusissolos, com uma toposeqüência de horizonte A-C-R. Quando secos, apresentam fendilhamento por possuírem argila expansiva e de atividade alta, o que lhes conferem uma boa fertilidade. São rasos a moderadamente profundos, podem ser pedregosos e normalmente ocorrem em relevo plano a suave ondulado. Sua ocupação predomina na parte baixa da bacia, circulando o açude Namorados e em posições de terço inferior e

relevo mais plano em áreas isoladas no interior da bacia hidrográfica (Paes-Silva, 2002).

Os Neossolos apresentam-se de muito rasos a rasos, com seqüência de horizonte do tipo A–R de textura arenosa ou média, moderadamente drenados, com horizonte A fraco ou moderado. Em geral, apresentam pedras na superfície e no interior do perfil. Geograficamente apresentam-se associados com afloramentos rochosos em relevo ondulado e forte ondulado. Na bacia hidrográfica ocorrem nas encostas mais íngremes e em posição de topo associado a afloramento de rochas (Paes-Silva, 2002).

Vegetação

Foram identificadas na Bacia do Riacho dos Namorados a vegetação do tipo caatinga, a algaroba e as áreas de cultivo (culturas anuais e campos de palma). O grupo da caatinga e algaroba foram representados em classes de acordo com seu porte (arbóreo, sub-arbóreo, arbustivo e sub-arbustivo) e em sub-classes quanto ao grau de cobertura (muito densa, densa, aberta, rala e muito rala) (Paes-Silva, 2002).

Conforme a tabela 4.1 (Paes-Silva, 2002), observa-se a predominância da caatinga, em suas mais diversas classes, em aproximadamente 75% da área. A espécie caatingueira foi a que se mostrou dominante dentro da caatinga em 43% dos locais com vegetação do grupo subarbustivo e em mais de 60% nos demais grupos (arbustivo, subarbóreo e arbóreo) (Paes-Silva, 2002).

O grau de cobertura entre 40 a 60%, sub-classe, aberta, foi apontada em cerca de 60% da área, enquanto que o grau de cobertura ralo – com cobertura entre 20 a 40% – foi encontrado em 36,5% da área da bacia.

Tabela 4.1 Área correspondente a cada classe de vegetal (Fonte: Paes-Silva, 2002)

Ocupação da terra			Área		
			(ha)	(%)	
Caatinga	Arbórea	(> 4,0 m)	29,3	2,1	2,81
	Sub-Arbórea	(3,0 a 4,0 m)	111,9	8,1	10,8
	Arbustiva	(1,5 a 3,0 m)	651,0	47,3	63,1
	Sub-Arbustiva	(< 1,5 m)	240,0	17,4	23,3
Sub-total			1032,2	74,9	100,0
Algaroba			212,0	15,4	-
Cultivo			45,9	3,3	-
Açudes e lagoas			87,6	6,4	-
Total			1377,7	100,0	-

O mapa representativo das diversas classes encontradas na Bacia do Riacho dos Namorados é observado na figura 4.5.

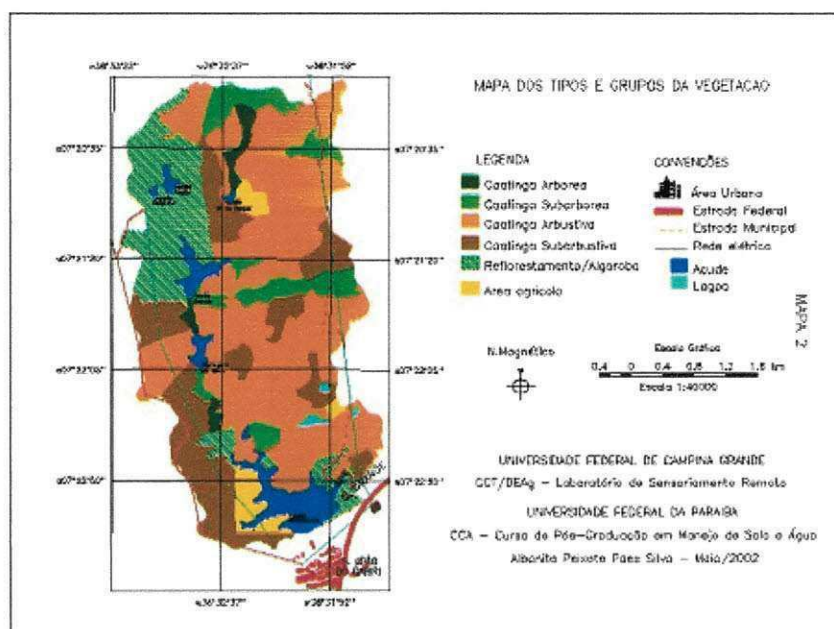


Figura 4.5 Classes de vegetação na Bacia do Riacho dos Namorados (Fonte: Paes-Silva, 2002)

A bacia encontra-se em estado de alerta uma vez que a degradação na vegetação nativa ocorre com ampliação da área de pastoreio e a retirada de madeira para queima.

4.1.4 Unidades Experimentais da BESJC

A BESJC possui atualmente duas parcelas de erosão (P1 e P2), três micro-bacias (MB1 a MB3) e quatro sub-bacias (SB1 a SB4). Neste trabalho, utilizamos os dados de escoamento superficial e produção de sedimentos de duas sub-bacias, a SB1 e SB2. Suas características principais serão expostas a seguir.

Sub-Bacia 1

Os trabalhos na Sub-Bacia 1 (SB1) foram iniciados em 1987, antes do inverno, com a instalação de linígrafos, réguas de máxima e régua linimétrica. Para o registro das cheias de tributários do riacho principal, o riacho dos Namorados, foi instalado um vertedor triangular de soleira espessa (figura 4.6) em uma seção do riacho.



Figura 4.6 Vertedor da Sub-Bacia 1

Por haver contribuição superficial a partir de três pequenas lagoas que se formam com as chuvas, esta bacia alcança uma área de drenagem de 59 hectares (área da SB1).

Sub-Bacia 2

O trabalho nesta sub-bacia se deu em conjunto com a Sub-Bacia 1, sendo instalado um vertedor composto de soleira delgada (triangular + retangular) (figura 4.7). Com área de 32 hectares, esta unidade experimental apresenta-se com sua cobertura vegetal em estado mais conservado.



Figura 4.7 Vertedor da Sub-Bacia 2

A figura 4.8 apresenta a delimitação das sub-bacias citadas com as curvas de nível.

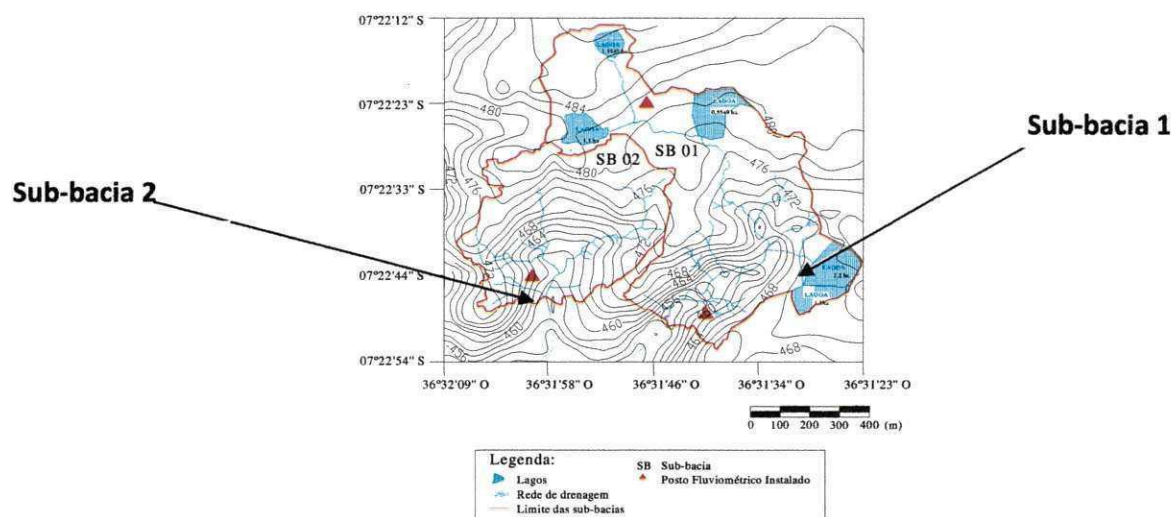


Figura 4.8 - Delimitação da SB1 e SB2 (Aragão, 2006)

4.1.5 Coleta de Dados

Nas sub-bacias, o escoamento é registrado através de régua linimétrica e automaticamente através de um sistema de infravermelho que verifica a altura da lâmina que passa na calha do vertedor. Contudo, é ainda necessário fazer a relação entre a altura medida pelo equipamento e a crista do vertedor para identificar a lâmina que passa sobre o mesmo.

Quanto aos sedimentos, o montante de sedimento que acumula na calha do vertedor é verificado através de um recipiente de 380 L. Para tanto, este recipiente é preenchido com a massa de sedimentos que está depositado a montante do vertedor e verifica-se o número de vezes que foi necessário encher o recipiente para que a calha fique vazia. Então o volume de sedimentos é calculado e em seguida estima-se, através da multiplicação pela densidade aparentemente seca, a massa total acumulada. Em seguida, é retirado o valor do aporte de sedimentos por unidade de área diretamente com uma regra de três simples.

Vale salientar que os sedimentos em suspensão que passam pelo vertedor não são contabilizados. Assim, parte da produção de sedimentos, aqueles mais finos, não são considerados no cálculo, sendo subestimados do valor real produzido.

4.1.6 Dados utilizados

Os dados hidrossedimentológicos foram coletados durante a execução de vários projetos de pesquisa, sendo os principais:

- IBESA - Implantação de Bacias Hidrográficas no Semi-Árido (Srinivasan, 2004);
- BEER - Bacias Experimentais e Representativas do Nordeste (Projeto FINEP/UFCG em andamento).

Através da coleta destes e outros dados na BESJC foi formado um banco de dados composto de informações referentes à lâmina escoada e produção de sedimentos em todas as unidades experimentais mencionadas. Esses dados são considerados dados observados em campo através de coleta e de amostragem.

O período escolhido é formado por eventos de chuva que ocorreram entre 2004 e 2006, com 61 eventos de chuva para a *sub-bacia 1* e 64 eventos de chuva para a *sub-bacia 2*.

4.2 Geração do Banco de Dados

A execução do modelo SWAT compreende na aquisição dos dados geoespaciais – modelo digital de elevação, mapa de uso e cobertura do solo e mapa de tipo de solo – e definição de seus parâmetros. Além do estabelecimento das variáveis climáticas para representar a bacia hidrográfica em estudo. Nesta etapa são apresentados os dados de entrada para as simulações neste trabalho.

4.2.1 Modelo Digital de Elevação

No presente trabalho são utilizados dois MDEs: um primeiro originado do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e um segundo a partir de dados topográficos levantados no campo.

Os dados de campo para confecção do MDE foram:

- Pontos cotados da SUDENE: pontos cotados obtidos da carta da SUDENE, para apoio na interpolação.
- Levantamento Convencional: A carta topográfica foi digitalizada através de mesa digitalizadora pelo programa Autocad (*Autodesk*). Esta carta possui curvas de nível de 5 metros, pontos cotados, divisor de águas e drenagem.
- Levantamento Automatizado: Produtos obtidos por levantamento planialtimétrico automatizado. Foram cotados pontos para caracterizar o

relevo e a declividade da Bacia do Riacho dos Namorados. E através destes pontos foram geradas curvas de nível de 10 metros.

Todas amostras de altitude (pontos cotados) foram reunidas em um único arquivo e em seguida interpoladas com o auxílio de uma ferramenta SIG (ArcGIS – ESRI). A resolução da grade regular gerada foi de 20 metros e a ferramenta utilizada foi a opção “*topo to raster*”. A ferramenta “*topo to raster*” utiliza o método de interpolação projetada especificamente para criação de modelos digitais de elevação “hidrologicamente consistentes” (que respeitam a hidrografia da superfície) (Childs, 2004). No presente trabalho, este MDE é denominado de “interpolado”.

4.2.2 Uso e Ocupação do Solo

O mapa de solo (pedológico) utilizado neste trabalho foi produzido por Chaves (2002), conforme a figura 4.5. Haja vista que foi levantado o uso e cobertura do solo diretamente de uma mapa de vegetação, buscou-se através deste mapa a parametrização de fatores sensíveis da vegetação quanto a simulação do modelo, além de uma adaptação das classes de vegetação.

Assim, seguindo os resultados de análise de sensibilidade do trabalho de Lenhart (2002), constata-se que o índice de área foliar (BLAI), altura da copa (CHTMX) e profundidade da raiz (SOL_ZMX) são parâmetros bastante influentes no escoamento superficial e no aporte de sedimentos. Com isto, buscou-se definir tais parâmetros para as espécies catingueira e algaroba. As raízes das espécies foram estipuladas para a profundidade da última camada do solo.

Neto (2009) indicou o índice de área foliar média da catingueira como sendo de $3,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$. A altura máxima que esta espécie pode chegar é de 6 m.

Por outro lado, o índice de área foliar para a algaroba foi encontrado no trabalho de Fleming (2003) com o valor de $1,04 \text{ m}^2/\text{m}^2$. A altura máxima atribuída para esta espécie foi de 12 m conforme observação no Comunicado Técnico da Embrapa (2009).

Foram realizadas algumas adaptações no mapa de cobertura do solo de modo a utilizar diretamente o banco de dados já existente na interface.

As classes arbórea, sub-arbórea e arbustiva que representam estágios da caatinga foram agrupadas formando uma única classe. Desta classe, fez-se a analogia direta para com a "*Range Brush*", cobertura vegetal existente no banco de dados da interface ArcSWAT presente na região do Texas, EUA, que muito se assemelha com nossa vegetação caatinga. A classe sub-arbustiva foi indicada analogamente com vegetação "*Range Grass*". A "*Prosopis juliflora*" (algaroba) teve sua analogia frente a uma outra espécie "*Prosopis glandulosa*" cuja denominação no banco de dados é "*Honey Mesquite*".

Desta maneira, os parâmetros citados são modificados diretamente no banco de dados da interface. A área agrícola para simulação na Sub-Bacia 1 e em toda Bacia do Riacho dos Namorados foi utilizado o cultivo de milho.

Nesse ponto deve ser dito que áreas encontradas como lagoa, no mapa de uso e ocupação do solo, foram inicialmente convertidas para "*Range Brush*" quando da execução do modelo para a Sub-Bacia 1. Isto foi realizado devido a testes preliminares em que se verificou que a conversão em área de "lagoa" no modelo resultava em uma discrepância substancial no balanço hídrico, de modo que a precipitação incidente se perde do sistema. Trata-se de um "*bug*" do modelo bastante debatido em seu grupo de discussão, conforme o endereço virtual:

http://groups.google.com/group/swatuser/browse_thread/thread/14a36ffb34c86b4e/f540ce12026de416?lnk=gst&q=water+balance&pli=1 .

A inserção dos dados na interface e o mapa de cobertura do solo são exibidas nas figuras 4.9 e 4.10, respectivamente.

4.2.3 Parâmetros e Tipo de Solo

O levantamento exploratório de solos apresentado por Chaves (2002) é a base de referência para as simulações. Contudo, diante da ausência de dados físicos do solo (verdade de campo), buscou-se aglutinar algumas manchas de solo de menor abrangência. Assim, a mancha de solo do Planossolo foi aglutinada com Luvisolo Crômico Vértico, enquanto que a área do Neossolo Flúvico foi agrupada junto ao Neossolo Lítico (Figura 4.11).

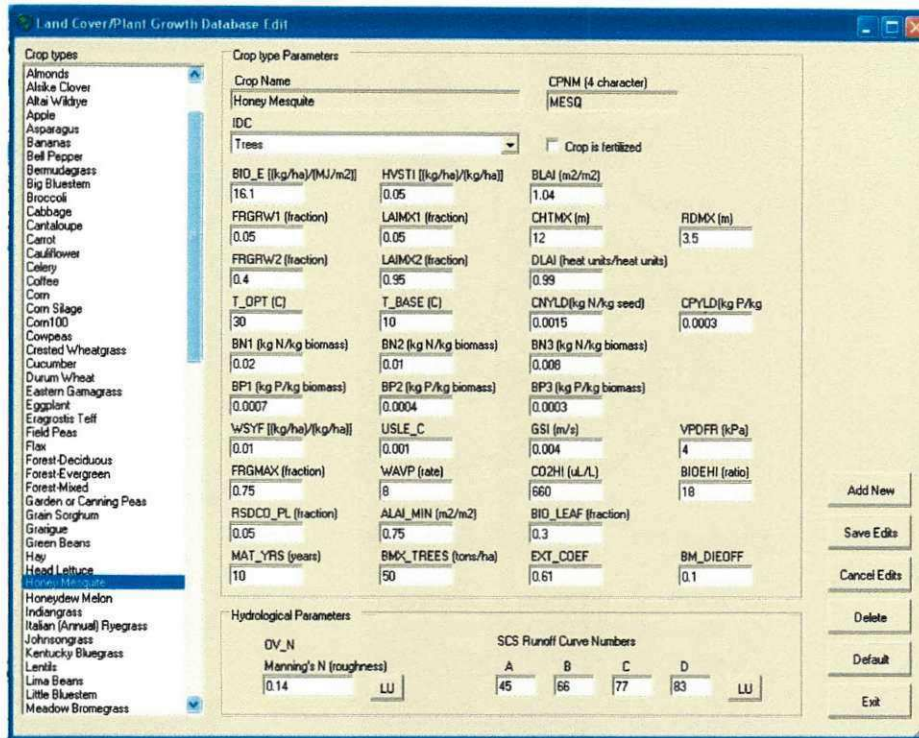


Figura 4.9 Janela de edição de dados da cobertura do solo pela interface ArcSWAT

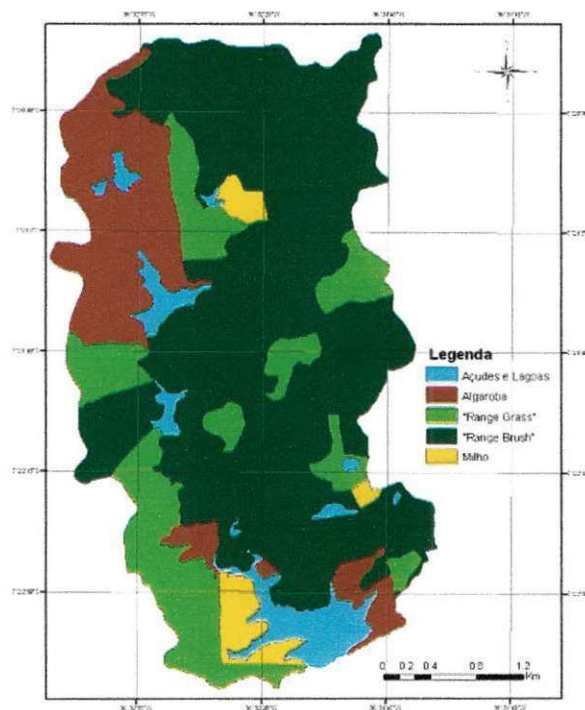


Figura 4.10 Reclassificação da cobertura do solo como dado de entrada para a simulação no modelo SWAT

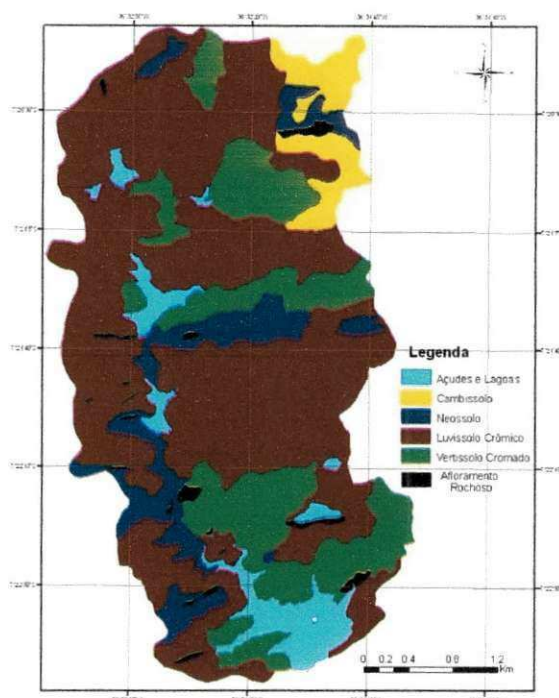


Figura 4.11 Reclassificação dos tipos de solo como dados de entrada para simulação no modelo SWAT

Os parâmetros do solo foram agrupados em um banco de dados presente na interface ArcSWAT. As informações necessárias para cada tipo de solo dizem respeito a características físico-hídricas, tais quais: grupo de saturação referente ao método da Curva-Número (HYDGRP), a profundidade de raiz (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentagem de argila, silte, areia e seixo.

A porosidade e a condutividade hidráulica foram estabelecidas a partir do trabalho de Santos (2008), com os valores respectivos de 0,398 e 4 mm/h, definidos a partir do documento de Rawls (1982), para todas as tipologias de solo. A profundidade da raiz foi estabelecida para a profundidade da última camada de cada solo, enquanto que a densidade aparente foi atribuído o valor médio de 1,65 g/cm³ - para todos os solos.

Para uma definição do grupo hidrológico associado à pedologia da área, sucedeu-se uma observação direta dos intervalos de transmissão de água considerando o valor de condutividade hidráulica de 3,65 mm/hr – primeiro valor considerado por Santos (2008). Com isto todos os solos foram postos no grupo hidrológico C.

Para estabelecimento da textura do solo, foram utilizados o trabalho de Campos (2006) e os dados dispostos no Levantamento Exploratório e Reconhecimento de Solos da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972). O primeiro trabalho apresenta uma reclassificação e localização dos perfis de solo caracterizados no segundo documento. Diante disto, foram selecionado os perfis de solo que mais se aproximavam aos perfis da localidade da área de estudo. Assim, foram verificados os seguintes perfis de solo correspondentes à nova classificação do solo de acordo com tabela 4.2.

Tabela 4.2 Relação dos solos existentes na Bacia do Riacho dos Namorados e localização

Nova Classificação	Velha Classificação	Perfil no Levantamento Exploratório	Localização
Luvissolo Crômico Vértico	Bruno Não-Cálcico Vértico	Perfil 31	São Mamede
		Perfil 32	Barra de Santa Rosa
Vertissolo Cromado Órtico	Vertisol	Perfil 41	Sumé
		Perfil 42	Boqueirão
Neossolo Lítico	Solo Litólico	Perfil 53	Soledade
Cambissolo Háplico	Cambisol	Perfil 37	Taperoá

Além dos perfis de solo acima citados, foram utilizados dados de textura coletados em campo (Aragão, 2006). O trabalho perante tais dados se deu com a média aritmética das frações de partículas do solo para cada uma das áreas.

Com as frações das partículas do solo, foram estabelecidos os valores da erodibilidade para os diferentes solos, segundo a equação proposta por Williams (1995), e a água disponível no solo, segundo o trabalho de Salter e Williams (1967 e 1969) citado por Baldisserra (2005). Para estimativa da água disponível no solo estabelece-se a classe textural, segundo classificação do USDA (1986) – figura 4.12 – e só então correlaciona-se com o trabalho de Salter e Williams (1967 e 1969) através da tabela 4.3.

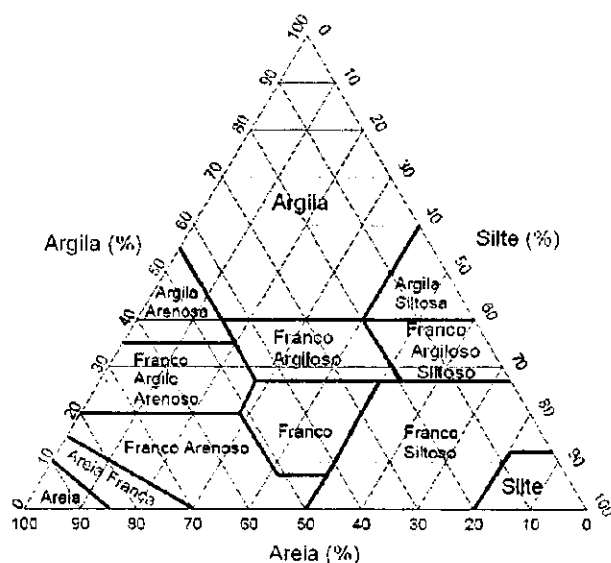


Figura 4.12 Classificação Textural do Solo (Fonte: Brady, 1989 apud Lopes, 2008)

Água disponível é entendida como a diferença da quantidade de água no solo quando estiver na capacidade de campo e a quantidade de água quando estiver no ponto de murcha.

Por fim, o albedo do solo foi estimado a partir do valor observado para uma mancha de solo através de um software de processamento digital de imagens (ERDAS). O valor de 0,17 foi estabelecido para todos os solos e é utilizado para realização do balanço energético na rotina interna do modelo SWAT.

Tabela 4.3 Classificação textural e capacidade de água disponível no solo (Fonte: Salter e Williams (1967 e 1969) apud Baldisserra, 2005)

Classe Textural	Capacidade de Água Disponível (mm/mm)
Areia	0,15
Areia Franca	0,158
Franco Arenoso	0,175
Franco	0,175
Franco Siltoso	0,192
Franco Argilo Arenoso	0,150
Franco Argiloso	0,183
Franco Argilo Siltoso	0,192
Argila Arenosa	0,142
Argila Siltosa	0,183
Argila	0,175

Resumo dos dados do Solo

Diante do exposto, enfatiza-se que apenas alguns parâmetros foram modificados para cada um dos perfis de solo trabalhados. Com isto, a tabela 4.4 contém apenas os parâmetros que foram diferenciados para cada textura de solo trabalhado nas respectivas camadas.

Estes dados são inseridos diretamente através da interface ArcSWAT, conforme a figura 4.19:

Soil Component Parameters		
SNAM	NLAYERS	HYDGRP
Verti42	3	C
SOL_ZMX (mm)	ANION_EXCL (fraction)	SOL_CRK (m3/m3)
700	0.398	0
TEXTURE		
STV-L-GR-FSL-GR-FSL		

Soil Layer Parameters		
Soil Layer: 1		
SOL_Z (mm)	SOL_BD (g/ cm3)	SOL_AW/C (mm/mm)
150	1.65	0.183
SOL_CBN (% wt.)	SOL_K (mm/hr)	CLAY (% wt.)
1.03	4	35
SILT (% wt.)	SAND (% wt.)	ROCK (% wt.)
21	44	0
SOL_ALB (fraction)	USLE_K	SOL_EC (dS/m)
0.17	0.13625	0

Figura 4.13 Janela de inserção dos dados de solo na interface ArcSWAT

Tabela 4.4 Resumo dos dados de solo para os diferentes tipos de solo

	Perfil 31	Perfil 32	Perfil 41	Perfil 42	Dados de Campo – Sub 1	Dados de Campo – Sub 2	Perfil 53	Perfil 37
Número de Camadas	3	3	4	3	1	1	2	4
Argila (1*)	14	11	28	35	9	19	8	16
Silte (1)	33	25	19	21	19,5	17	20	18
Areia (1)	53	64	53	44	71,5	64	72	66
Carbono Orgânico (1)	1,36	1,00	1,53	1,03	0,7117	0,7046	0,56	0,66
Profundidade da Camada (cm) (1)	4	7	4	15	50	50	20	15
Fator K (1)	0,15061	0,16245	0,12280	0,13625	0,1616	0,1524	0,16511	0,15729
Água Disponível no Solo (1)	0,175	0,175	0,150	0,183	0,175	0,175	0,175	0,175
Argila (2)	21	31	40	41	-	-	12	16
Silte (2)	26	21	14	20	-	-	22	20
Areia (2)	53	48	46	39	-	-	66	65
Carbono Orgânico (2)	0,63	0,58	0,65	0,66	-	-	0,31	0,39
Profundidade da Camada (cm) (2)	18	35	25	60	-	-	35	42
Fator K (2)	0,16345	0,14954	0,13013	0,13959	-	-	0,17058	0,16209
Água Disponível no Solo (2)	0,150	0,150	0,142	0,175	-	-	0,175	0,175
Argila (3)	40	32	39	25	-	-	-	16
Silte (3)	23	24	17	20	-	-	-	19
Areia (3)	37	44	44	55	-	-	-	63
Carbono Orgânico (3)	0,35	0,45	0,51	0,19	-	-	-	0,22
Profundidade da Camada (cm) (3)	50	55	65	70	-	-	-	100
Fator K (3)	0,14750	0,15358	0,13800	0,15609	-	-	-	0,16611
Água Disponível no Solo (3)	0,175	0,183	0,183	0,150	-	-	-	0,175
Argila (4)	-	-	31	-	-	-	-	14
Silte (4)	-	-	16	-	-	-	-	24
Areia (4)	-	-	53	-	-	-	-	62
Carbono Orgânico (4)	-	-	0,32	-	-	-	-	0,22
Profundidade da Camada (cm) (4)	-	-	90	-	-	-	-	155
Fator K (4)	-	-	0,14380	-	-	-	-	0,17194
Água Disponível no Solo (4)	-	-	0,150	-	-	-	-	0,175

*O número entre parêntese representa o nível da camada do solo.

4.2.4 Parâmetros Climáticos

Os dados climáticos requisitados pelo modelo SWAT visam três objetivos principais: a estimativa da evapotranspiração potencial, o preenchimento automático de falhas e elaboração de cenários futuros. Tais objetivos são alcançados através do gerador climático WXGEN, originalmente desenvolvido para o modelo EPIC (Sharpley, 1990)

A estação climática presente na própria bacia escola foi utilizada para fornecimento dos dados requisitados, além de fornecer os valores diários de precipitação e de evapotranspiração potencial. A localização, conforme requerido pelo modelo, é dada sob coordenadas UTM, conforme apresentado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 Localização da Estação Climática

XPR	772885
YPR	9183176
Elevação (m)	470

Os parâmetros requisitados pelo gerador climático são médias e desvios mensais históricos do local, com exceção dos dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial – que foram inseridos diretamente com os dados coletados. Tem-se os dados apresentados a seguir:

Temperatura do ponto de Orvalho

A temperatura do ponto de orvalho foi calculada seguindo médias mensais, utilizando dados diários de temperatura e umidade relativo do ar. Estes dados diários foram inseridos diretamente no programa “dew”, disponível do endereço eletrônico <http://www.ufz.de/index.php?en=15863>, desenvolvido por Liersch (2003a).

O cálculo para estimativa do ponto de orvalho inicia-se com a obtenção do valor da pressão de saturação de vapor, e_s :

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left[\frac{(17,27 \times t_{ar})}{(237,3 + t_{ar})}\right] \quad (4.1)$$

onde t_{ar} é o dado referente a temperatura diária.

Em seguida, tem-se o cálculo da pressão de vapor atual, e_a , que é a relação direta da umidade relativa do ar com a pressão de saturação de vapor:

$$e_a = (UR \times e_s) / 100 \quad (4.2)$$

Só então é estimada a temperatura do ponto de orvalho, $DEWPT$, ($^{\circ}C$) através:

$$DEWPT = \frac{[234,18 * \text{Log}(e_a - 184,2)]}{[8,204 - \text{Log}(e_a)]} \quad (4.3)$$

Estimativas de Dados de Precipitação

O modelo exige alguns dados referentes às condições de precipitação médias mensais: precipitação média, desvio padrão da precipitação, probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos, probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos, coeficiente de assimetria para a precipitação e número de dias que houve precipitação no mês.

Diante da gama e dificuldade para o estabelecimento de alguns destes dados, foi utilizado o programa "pcpstat", disponível no endereço <http://www.ufz.de/index.php?en=15863>, desenvolvido por Liersch (2003b), para estabelecimento destes valores.

A precipitação máxima em meia hora foi definida após encontrar os maiores valores de precipitação para cada mês do período de dados e, em seguida, foi utilizado os fatores para desagregação propostos por Oliveira *et al* (2000) por serem os mais próximos encontrados a área de estudo.

Dados de Precipitação e Evapotranspiração Potencial

Dados diários de precipitação e evapotranspiração, captados na estação climática presente na bacia, foram utilizados. Utilizou-se para as simulações referentes a sub-bacia 1 e 2 os dados de precipitação dos pluviômetros presentes em suas respectivas áreas.

Resumo dos Dados Climáticos

A tabela 4.6 exibe o resumo de todos os dados climáticos que caracterizam a área de estudo.

Tabela 4.6 Resumo dos Dados Climáticos

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	32,75	33,19	32,76	31,82	30,60	29,80	28,93	29,47	30,98	32,16	32,52	32,13
TMPMN	21,00	20,87	20,90	20,67	20,30	18,83	17,86	17,86	19,14	19,61	20,11	20,19
TMPSTDMX	3,37	3,67	3,33	2,97	3,39	3,27	3,18	3,43	3,41	3,34	3,50	4,59
TMPSTDMN	1,11	1,84	1,31	1,30	1,39	1,33	1,94	1,31	2,34	1,10	1,06	1,95
PCPMM	60,01	58,14	70,10	64,72	39,44	33,55	26,02	19,26	7,28	4,20	6,34	32,97
PCPSTD	9,20	8,49	7,91	9,15	4,97	3,85	2,68	2,08	1,52	1,84	2,96	6,77
PCPSKW	6,60	5,92	5,23	8,27	7,62	7,31	5,00	4,52	9,64	21,73	21,39	9,18
PR_W1	0,09	0,12	0,16	0,20	0,16	0,21	0,23	0,13	0,06	0,03	0,04	0,06
PR_W2	0,42	0,45	0,45	0,43	0,39	0,46	0,39	0,43	0,36	0,21	0,23	0,40
PCPD	4,47	5,21	7,32	7,95	6,95	8,89	8,84	6,11	2,47	1,00	1,58	2,63
RAINHHMX	30,47	25,51	26,57	42,16	21,01	18,71	7,72	5,53	1,56	2,30	0,53	7,30
SOLARAV	39,48	35,94	38,56	36,50	32,45	28,98	31,10	35,02	39,77	42,44	41,65	40,70
WNDVAV	2,27	1,96	1,77	1,69	1,71	1,59	1,77	2,05	2,51	2,77	2,81	2,43
DEWPT	20,07	20,08	20,22	20,03	20,00	16,74	18,33	18,03	18,42	18,74	19,40	19,37

Legenda: TMPMX: Temperatura máxima (°C); TMPMN: Temperatura mínima (°C); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima (°C); TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima (°C); PCPMM: Precipitação média mensal (mm); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação (mm); PR_W1: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%); PR_W2: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%); PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima; PCPD: Número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 hora (mm); SOLARAV: Radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹); WNDVAV: Velocidade do vento (m/s); e DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho (°C).

Os parâmetros climáticos são inseridos diretamente na interface ArcSWAT, conforme a Figura 4.14:

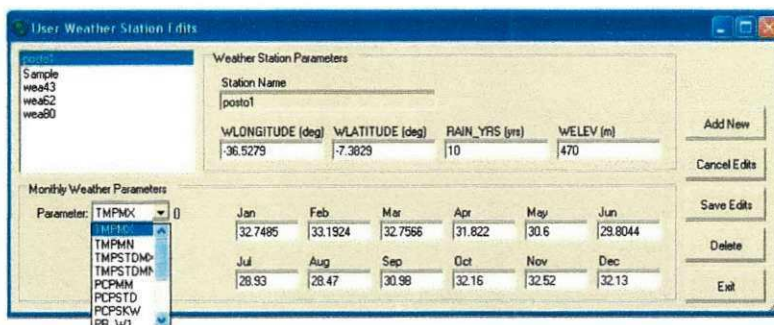


Figura 4.14 Inserção de parâmetros climáticos

4.2.5 Açudes

Para a simulação da Bacia do Riacho dos Namorados nas condições atuais, torna-se necessário incluir os açudes existentes na área. São cinco açudes principais: Namorados, Luiz Heleno, Bola I, Bola III e Roque.

Alguns dos dados necessários para simulação com reservatórios não foram conseguidos ou sequer existem, haja vista que as barragens de tais pequenos açudes são de terra possuindo apenas um único sangradouro. Com isto apenas as atribuições presentes foram incluídas e as outras adotadas.

A primeira delas diz respeito a RES_SUB, pois o modelo SWAT exige a vinculação do reservatório a uma única sub-bacia, ao passo que os reservatórios existentes apresentam a confluência de mais de uma sub-bacia. Com isto vinculou-se o reservatório ao trecho que possuísse maior área de drenagem, conforme a delimitação originada. Arbitariamente, colocou-se o ano de 1981 como sendo o ano em que todos eles tornaram-se operacionais e, foi assumido um volume inicial na simulação de 30% da capacidade máxima.

Foram igualadas ambas as medidas da área do espelho d'água e do volume do reservatório, de modo que se aproxima à realidade e a rotina de simulação seguirá sempre as equações (3.50) e (3.51).

Os dados de volume e área foram obtidos a partir de Alcântara (2008) e Amorim (2010), e são mostrados na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Dados de entrada dos reservatórios inseridos na Bacia do Riacho dos Namorados

Açude	RES_ESA (ha)	RES_EVOL (10 ⁴ m ³)	RES_PSA (ha)	RES_PVOL (10 ⁴ m ³)	RES_VOL (10 ⁴ m ³)
Luiz Heleno	5,36	7,2	5,36	7,2	2,16
Bola I	16,62	31,36	16,62	31,36	9,41
Bola III	4,9*	3,111	4,9*	3,111	0,933
Roque**	5,36	7,2	5,36	7,2	2,16

Os dados marcados com (*) foidevido a área ter sido retirado do arquivo geoespacial que reconhece a drenagem topográfica, enquanto que os dados marcados

com (**) tratam da atribuição dos dados relativos ao açude Roque serem copiados dos referentes ao açude Luiz Heleno.

4.2.6 Outros Parâmetros

Uma vez que o SWAT possui uma diversidade de parâmetros tratando das mais diversas variáveis, buscou-se estabelecer algumas modificações que direcionassem a uma maior verossimilhança com a área de estudo. Para tal, ajustou-se valores que regem a recarga do aquífero subterrâneo, o número de Manning e o fator de erodibilidade dos canais, além do coeficiente de atraso do escoamento superficial e a altura de interceptação da vegetação.

Haja vista que a área de estudo não possui aquífero subterrâneo, tampouco uma recarga de base, os parâmetros que tratam deste processo foram modificados visando respeitar tal situação. Toda água que percola através da última camada do solo adentra, inevitavelmente, a zona vadosa pelo modelo SWAT antes que seja possível de recarregar o aquífero – seja raso ou profundo. Assim, a medida tomada para lidar com a real situação da área de estudo foi direcionar toda a água que adentra a zona vadosa para ascender pela franja capilar, sendo consumida pelos vegetais e/ou estando disponível para evaporação do solo através do processo “REVAP” – criado pelo modelo para trabalhar com situações na qual a zona saturada é próxima a superfície ou há raízes profundas. Quatro parâmetros contidos no arquivo “gw”, que regem os processos referentes à água subterrânea, tiveram seus valores modificados para tal:

- ALPHA_BF: o fator alfa do fluxo de base lida diretamente com o número de dias para que o fluxo subterrâneo atinja o canal. Seu valor 0 anula a recarga de base.
- GW_REVAP: trata-se do coeficiente de “revap”, cujo valor varia entre 0,02 a 0,2. O menor valor denota uma restrição ao processo, ao passo que o maior promove uma ascensão de água conforme a evapotranspiração potencial.
- REVAPMN: este parâmetro lida com o valor limite a ser superado pela lâmina que percola para favorecer o processo de “revap”. Seu valor de 0 indica que toda a água que percola está passível do processo “revap”.
- RCHRG_DP: fração do que percola que abastecerá o aquífero subterrâneo profundo, variando entre 0 a 1.

Para os canais foi estabelecido o valor de 0,03 para o número de Manning conforme Santos (2008). O fator de erodibilidade dos canais teve seu valor relacionado à décima parte da média dos fatores de erodibilidade do solo para os dados coletados em campo.

Haja vista o tamanho da bacia em estudo, o coeficiente de atraso do escoamento superficial teve seu valor ao máximo, de modo que grande parte – senão a totalidade – do escoamento superficial gerado alcançará o canal da sub-bacia referente no mesmo dia.

À altura máxima de interceptação foi atribuído o valor de 0,5 mm conforme o trabalho de Medeiros (2009).

Tem-se na tabela 4.8 a relação dos parâmetros modificados e os respectivos valores, além de suas siglas e o arquivo referente para trabalho no modelo SWAT.

Tabela 4.8 Parâmetros modificados nos diversos componentes de simulação do SWAT

Sigla	Descrição	Arquivo	Valor
ALPHA_BF	Fator Alfa do Fluxo de Base	.gw	0
GW_REVAP	Coeficiente de "revap",	.gw	0,2
REVAPMN	Valor Limite para Prover "Revap"	.gw	0 mm
RCHRG_DP	Fração do que percola e abastecerá o aquífero profundo	.gw	0
CH_N(1)	Número de Manning do Canal Principal	.sub	0,03
CH_N(2)	Número de Manning dos Canais Tributários	.rte	0,03
CH_EROD	Fator de Erodibilidade do Canal	.rte	0,0157
SURLAG	Coeficiente de Atraso do Escoamento Superficial	.bsn	12
CANMX	Altura Máxima de Interceptação	.hru	0,5 mm

CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DO MODELO SWAT

Neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados, além das etapas de geração dos MDEs, e os resultados obtidos nas diversas etapas da modelagem hidrológica.

As diversas etapas da modelagem compreendem:

- 1- geração dos modelos digitais de elevação e delimitação das bacias com obtenção das características morfométricas,
- 2- a parametrização do modelo SWAT através da simulação nas Sub-Bacias 1 e 2,
- 3- Validação do modelo parametrizado,
- 4- Simulação hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados nas condições atuais do uso do solo com e sem açudes, e
- 5- Simulação da bacia para mais quatro cenários considerados.

5.1 Processo de Parametrização / Calibração e Validação

Para o processo de calibração, cinco diferentes combinações de texturas de solo foram consideradas com a aplicação de diferentes valores do coeficiente de evaporação de solo, buscando o melhor desempenho do modelo. Isto foi necessário, pois na área da Sub-Bacia 2 havia dois tipos de solo com duas distintas caracterizações no Levantamento Exploratório e Reconhecimento de Solo do Estado da Paraíba (Ministério da Agricultura, 1972), nas proximidades da bacia em estudo. Sendo assim, no processo de calibragem do modelo, considerou-se quatro possíveis combinações de textura de solo daquele documento e ainda uma quinta referente aos dados do solo

levantados em campo. Para estas combinações, a variação do coeficiente de evaporação do solo (ESCO) foi aplicada considerando dois diferentes modelos digitais de elevação.

Os perfis de solo identificados na área da Sub-Bacia 2 foram os 31 e 32 (na antiga classificação Bruno Não-Cálcico Vértico) referentes ao Luvissole Crômico Vértico, e os perfis 41 e 42 (na antiga classificação Vertisol) referentes ao Vertissolo Cromado Órtico. A figura 5.1 mostra a área das Sub-Bacias 1 e 2 com os diferentes tipos de solo.

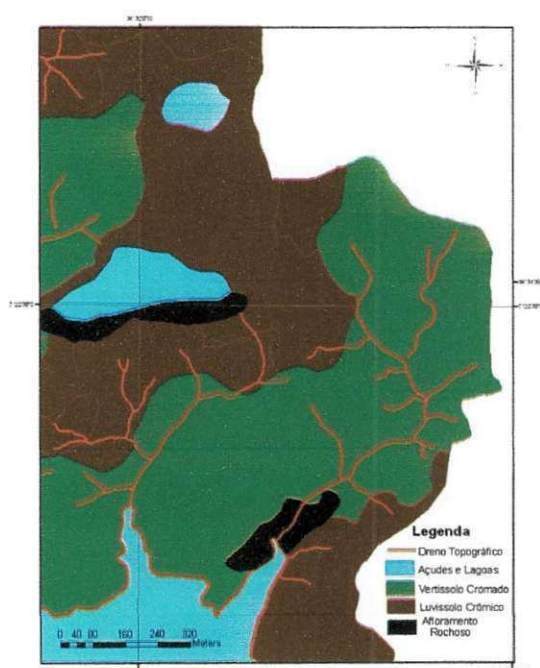


Figura 5.1 Mapa de solo na área das sub-bacias 1 e 2

A Sub-Bacia 2 foi alvo principal no processo de calibração por apresentar maior quantidade de dados observados e uma maior seqüência destes, além de estar totalmente inserida na propriedade da Universidade Federal da Paraíba, que assegura um maior grau de conservação.

A validação foi realizada na Sub-Bacia 1 e, neste caso, utilizou-se diretamente o tipo de solo, que resultou em um melhor desempenho do modelo durante a calibração na Sub-Bacia 2. Ainda, houve coleta de dados de campo quanto a textura do solo na

área da Sub-Bacia 1, de modo que tais dados seriam usados no caso dos dados de campo da Sub-Bacia 2 favoreçam aos melhores resultados. As duas alternativas de MDEs foram utilizadas em todas as etapas de parametrização do modelo.

Seguindo a premissa que os dados de campos ofereçam os melhores resultados, a aplicação na Bacia do Riacho dos Namorados terá as áreas de luvissole e vertissolo aglutinadas, de modo que a textura de solo média entre as Sub-Bacias 1 e 2 será empregada nessa área.

A cobertura do solo para ambas as sub-bacias está mostrada na figura 5.2:

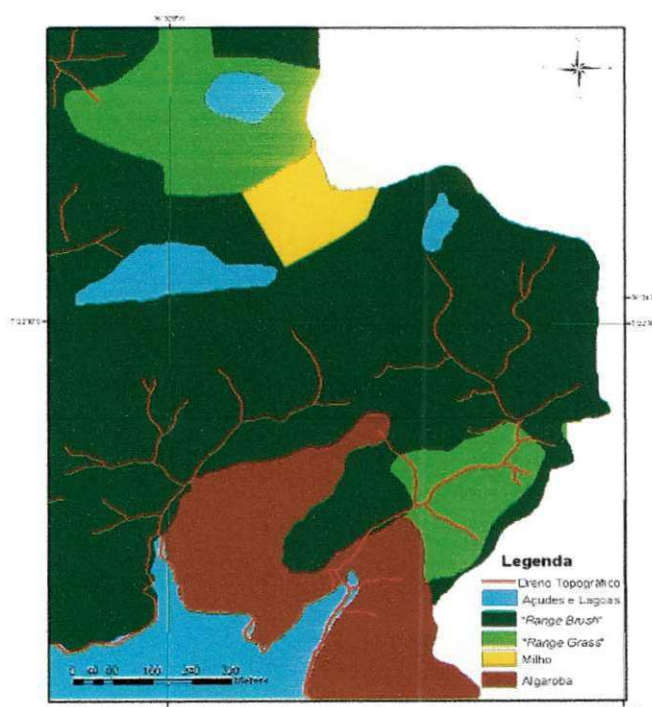


Figura 5.2 Mapa de cobertura do solo na área das sub-bacias 1 e 2

Para evitar inconsistências na parametrização, as áreas ocupadas pelas pequenas lagoas foram desconsideradas e suas áreas aglutinadas para as classes de ocupação e de solo que as cercundavam, foram desconsideradas para evitar a consequência do “bug” em não fechar o balanço hídrico.

A verificação da produção de sedimentos nas sub-bacias se dá pela medida da massa destes que ficam retidas logo atrás dos vertedouros, e então esta massa é dividida pela área da sub-bacia provendo uma estimativa da produção por unidade da

área. Trata-se de uma estimativa bastante grosseira, porém próxima à realidade. A razão principal para esta constatação é que apenas a carga de sedimentos que chega ao exutório é utilizada como estimativa para a produção em toda a bacia, enquanto os processos de erosão e deposição que ocorrem em toda a superfície da bacia não foram monitorados.

Por outro lado, o modelo SWAT oferece estimativas do aporte de sedimentos por sub-bacia delimitada, além da média para a bacia inteira, e a massa de sedimentos que entra e sai por canal. Com isto foram devidamente separados os resultados do aporte de sedimentos médio referente a toda Sub-Bacia bem como a massa de sedimentos que entra e sai do exutório da bacia para a combinação de solo que ofereceu os melhores resultados na geração de escoamento superficial. É através do cruzamento dos dados observados com estes resultados do modelo que será analisado o desempenho do modelo SWAT, em termos da produção de sedimentos, na bacia simulada.

5.2 Cenários para a Bacia Riacho dos Namorados

Na aplicação do modelo para a Bacia Riacho dos Namorados, foi pretendido identificar, através de resultados de simulação, as características representativas do solo entre as cinco alternativas utilizadas no processo de calibração. Assim, com os resultados iniciais, os dados do solo obtidos nas sub-bacias, uma média dos valores das texturas, foi utilizada para representar o Luvissole Crômico e o Vertissolo Cromado presentes em toda bacia.

Os cenários escolhidos para simulação no presente trabalho foram:

- Cenário 1: o quadro atual da bacia trabalhado sobre a perspectiva da cobertura do solo da figura 4.10;
- Cenário 2: a exclusão dos açudes existentes no cenário 1, sendo eles incorporados a cobertura adjacente;

- Cenário 3: toda a área coberta por “*Range Brush*”, simulando uma situação sem a influência do homem;
- Cenário 4: toda área coberta por algaroba, simulando uma situação de reflorestamento com esta espécie;
- Cenário 5: toda área coberta pelo cultivo de milho, e
- Cenário 6: solo exposto, analisando uma situação de extrema degradação.

A simulação do cenário de solo exposto ocorreu sobre o cenário 5, através da opção direta existente na interface para um quadro sem cobertura no solo (figura 5.3).

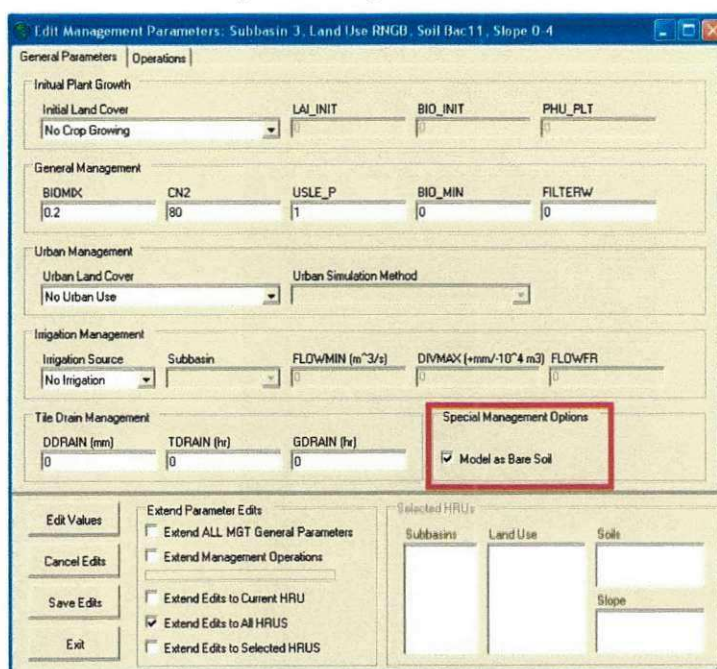


Figura 5.3 Definição da simulação com solo exposto diretamente no modelo

Para uma melhor verificação da resposta do modelo, os cenários foram simulados para três períodos distintos. O primeiro período escolhido foi todo o intervalo do banco de dados disponível, entre os anos de 1988 a 2006. Os outros dois períodos foram os anos de 1994 e 2004. Ambos apresentam precipitação anual em torno da média, contudo o ano de 1994 é bem distribuído ao longo do ano enquanto no ano de 2004 ocorre uma forte concentração da precipitação nos três primeiros meses. Com isso, foi possível analisar os efeitos para um longo período e os resultados para o período de um ano bem específico.

Ainda, os cenários 1 e 2 foram executados para ambos os MDEs, visando uma análise comparativo entre eles, pois uma confiabilidade da extrapolação do uso de imagens de satélites é necessária para futuros trabalhos. Os demais cenários foram executados utilizando apenas o MDE ASTER, haja vista que se busca apenas uma análise comparativa dos efeitos da cobertura do solo.

5.3 Período de Aquecimento do Modelo

Nos trabalhos preliminares, realizou-se um teste no qual o modelo SWAT foi submetido a um mesmo ano de eventos de precipitação, repetidos sete vezes. Assim foi verificado que o modelo comporta-se de forma bastante discrepante no primeiro ano de simulação, para geração do escoamento superficial e produção de sedimentos, o segundo ano apresenta resultados intermediários enquanto que os demais anos possuem seus resultados oscilando em um intervalo bem definido. A razão para tais resultados permanece ainda não totalmente conhecida, podendo ser consequência do processo de crescimento dos vegetais e/ou variação da umidade na zona radicular. Desta forma, ficou evidenciado a necessidade do uso de um período de aquecimento, conforme a repetição citada.

Alguns trabalhos na literatura adotaram a duplicação dos três primeiros anos de simulação visando o aquecimento (Peterson, 1998; White, 2005; Olivera, 2006; Cibir, 2010), sendo este o viés adotado para todas as simulações executadas neste trabalho – também pela obtenção dos resultados preliminares. Enquanto que Neisth (2004) sugere o uso de um ano para aquecimento e provimento de estabilidade para as condições iniciais do modelo.

5.4 Delimitação das sub-bacias e determinação das URH

O processo de delimitação de bacia hidrográfica através da interface ArcSWAT está sujeito a algumas opções por parte do usuário. Na primeira, denominado por "Máscara", em que é possível restringir a área máxima ao qual a ferramenta buscará uma bacia. A segunda diz respeito a imposição da rede de drenagem, indicando linhas preferenciais para formação da rede de drenagem. Esta opção é denominada como "burn in". Só então é estabelecida a área de drenagem mínima de contribuição para formação de um canal – de modo que menores valores implicam em maior quantidade de sub-bacias. Por fim, indica-se o exutório da bacia – de modo que a interface ainda lida com restrições topográficas quando da localização de tal ponto.

Depois se procede com a inserção e conversão dos mapas de uso e tipo de solo, bem como a definição de intervalos de declividade, até cinco, para a devida formação das Unidades de Respostas Hidrológicas. E em seguida, é possível trabalhar com níveis mínimos de sensibilidade na formação das URH para execução do modelo, de modo que a interface permite limites para o estabelecimento dessas URH. Considerando um exemplo: o usuário pode limitar em 15% a área para cada tipo do solo, e assim tipos de solo que possuem área inferior a 15% serão eliminados e haverá uma redistribuição da área. A indicação de zero por cento permite que todos os tipos de ocupação e tipo de solo, bem como intervalos de declive, sejam considerados na criação das URH, favorecendo, assim, uma maior precisão.

O interessante trabalho de Jha (2004) mostra a sensibilidade do modelo SWAT perante a subdivisão da bacia em sub-bacias. O autor constatou que o modelo apresenta variações nas respostas de escoamento superficial e aporte de sedimentos para diferentes números de sub-bacias. Ainda, para um determinado número de sub-bacias, as respostas do modelo podem oscilar dentro de um determinado intervalo. Este número de sub-bacias depende da bacia em estudo. Mas, de um modo geral, o autor expõe que uma maior quantidade de sub-bacias definidas proporciona uma maior estabilidade e eficiência na simulação. Para tal, Jha (2004) aponta que para formação

das sub-bacias seja atribuído um valor entre 2 a 6% da área da bacia delimitada pelo modelo.

A delimitação de bacia para todas as simulações deste trabalho foi feito utilizando as opções de máscara e "burn in" – no qual foi imposta a rede de drenagem reconhecida topograficamente pelo grupo de pesquisa de Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – bem como o máximo de discretização das URH. Para a Sub-Bacia 1 foi atribuída a área mínima de contribuição para formação dos canais em 0,35 hectares, enquanto da Sub-Bacia 2 em 0,3 hectares. Testes preliminares, utilizando o MDE interpolado, foram realizados na sub-bacia 2 buscando atingir o maior número de URH durante a seleção dos intervalos de declive. Tais intervalos foram utilizados para ambas as Sub-Bacias e ambos os MDEs. Fez-se uso dos cinco intervalos de declividades como: 0 a 4%, 4 a 6%, 6 a 8%, 8 a 10% e superior a 10%.

Com isto, foi possível verificar os resultados das delimitações efetuadas, incluindo tabelas com parâmetros morfométricos, a divisão em sub-bacias, cobertura e tipo de solo, altitudes e intervalos de declividade.

5.4.1 Delimitação das Sub-Bacias 1 e 2

A delimitação da bacia é função direta do MDE utilizado, com a execução do Algoritmo de Oito Direções. Os vários parâmetros morfométricos também são obtidos a partir do MDE durante o processo de delimitação. Dentre os vários parâmetros morfométricos, serão exibidos aqueles correspondentes ao resultado da delimitação e a fração de área inserida em cada classe de declividade. A fração de área para cada cobertura do solo também é exibida sob a forma de tabela. As dimensões da rede de drenagem também é produto direto do processo de delimitação da bacia e serão apresentados os valores referentes a Sub-Bacia 2. A tabela 5.1 inicia a apresentação desses parâmetros.

Apesar de uma ligeira diferença de área delimitada para os dois MDEs, pode-se notar uma boa aproximação entre eles. Incluindo na definição do número de sub-unidades. Contudo, ao se examinar a área verificada topograficamente foi percebido

que a delimitação da Sub-Bacia 2 apresenta uma área aproximadamente 50% inferior, e portanto bastante discrepante, o que precisa ser observada no campo.

O número de URH é influenciado diretamente pelos intervalos de classes de declividade inseridas pelo usuário. Para os intervalos de classe utilizados neste trabalho, a área da bacia inserida em cada um deles está apresentada a tabela 5.2.

Tabela 5.1 Características morfométricas das Sub-Bacias 2 e 1

Parâmetros Morfométricos	Sub Bacia 2		Sub Bacia 1	
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER
Área (ha)	162,400	161,448	413,200	420,918
Perímetro (m)	2240	2170	4400	3968
Nº de sub-bacias	21	22	41	40
Altitude Menor (m)	459	455	454	455
Altitude Maior (m)	481	481	489	488
Elevação Média (m)	471	464	475	470

Tabela 5.2 Porcentagem da área Sub-Bacias dentro dos intervalos de classes de declividade em %

Intervalos de Declividade	Área da Sub Bacia 2		Área da Sub Bacia 1	
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER
0 a 4%	14,8 %	29,1 %	36,1 %	28,1 %
4 a 6%	18,5 %	25,6 %	22,5 %	17,9 %
6 a 8%	24,9 %	23,2 %	17,6 %	17,3 %
8 a 10%	18,7 %	11,9 %	6,9 %	18,6 %
10% a ∞	23,1 %	10,2 %	16,9 %	18,1 %

A tabela 5.2 mostra a discrepância de URH encontradas pela interface nos dois MDEs para a Sub-Bacia 2. O objetivo das classes de intervalos utilizadas era uma melhor divisão representativa da área a partir do MDE gerado pela interpolação "topo to raster". Porém, o MDE ASTER não respondeu com uma divisão semelhante da área, concentrando quase 80% da área nos intervalos de declividade até 8%. Por outro lado, a diferença de URH para os dois MDEs encontrada na Sub-Bacia 1 é bem menor, a despeito das áreas inseridas nos intervalos de declividade inferior a 6% para o MDE

interpolado. A isto se explica o fato do MDE originado dos dados interpolados para a Sub-Bacia 1 prover uma maior e melhor distribuição das altitudes.

A tabela 5.3 indica a porcentagem da cobertura do solo para cada uma das sub-bacias delimitadas.

Tabela 5.3 Porcentagem das áreas da cobertura do solo para cada sub-bacia

Uso do Solo	Sub Bacia 2		Sub Bacia 1	
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER
Range Brush	98,03 %	96,43 %	73,01 %	72,08 %
Range Grass	-	-	15,73 %	16,25 %
Milho	-	-	8,83 %	8,47 %
Algaroba	1,97 %	3,57 %	2,43 %	3,2 %

Dimensões da Rede de Drenagem

É através do MDE que a interface ArcSWAT procede com a aquisição dos mais diversos parâmetros morfométricos durante o processo de delimitação da bacia. Entre eles estão as dimensões da rede de drenagem, que é base de cálculo para importantes variáveis – tal qual a velocidade do fluxo na calha fluvial.

Para efeito de análise, serão expostos as dimensões obtidas pelo MDE interpolado e o ASTER para a Sub-Bacia 2, e as características das demais unidades simuladas estão apresentados no Anexo 1.

Tabela 5.4 Parâmetros Morfométricos dos Canais pelos dois MDEs

Sub-Bacia	Interpolado				ASTER			
	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)
1	58,284	0,081	0,021	0,020	77,500	0,052	0,015	0,039
2	30,000	0,057	0,016	0,022	65,761	0,052	0,015	0,030
3	48,284	0,114	0,026	0,056	46,500	0,058	0,017	0,022
4	30,000	0,057	0,016	0,052	90,341	0,064	0,018	0,044
5	158,284	0,087	0,022	0,048	46,500	0,052	0,015	0,043
6	90,000	0,065	0,018	0,038	74,841	0,120	0,027	0,053
7	174,853	0,100	0,024	0,048	87,681	0,064	0,018	0,001
8	106,569	0,081	0,021	0,027	108,500	0,064	0,018	0,055
9	80,000	0,155	0,032	0,035	264,602	0,147	0,031	0,053
10	164,853	0,167	0,033	0,035	93,000	0,113	0,026	0,054
11	20,000	0,047	0,014	0,085	74,841	0,180	0,035	0,040
12	28,284	0,031	0,011	0,008	108,500	0,075	0,019	0,037
13	78,284	0,055	0,016	0,034	74,841	0,157	0,032	0,013
14	28,284	0,023	0,009	0,078	46,500	0,046	0,014	0,022
15	30,000	0,050	0,015	0,054	43,841	0,039	0,013	0,046
16	78,284	0,081	0,021	0,055	246,442	0,124	0,027	0,016
17	48,284	0,122	0,027	0,081	65,761	0,052	0,015	0,046
18	60,000	0,166	0,033	0,064	62,000	0,154	0,031	0,065
19	88,284	0,235	0,042	0,038	74,841	0,193	0,037	0,053
20	189,706	0,294	0,048	0,018	62,000	0,273	0,046	0,016
21	68,284	0,433	0,063	0,003	162,522	0,281	0,047	0,006
22	-	-	-	-	74,841	0,432	0,063	0,013

Processo de Delimitação

Com o levantamento destes dados iniciais, foram geradas as imagens abrangendo a delimitação das bacias, a divisão de altitudes, os intervalos de declividade, a cobertura do solo e, por fim, do tipo de solo para ambos os MDEs trabalhados. Algumas destas delimitações são mostradas nas figuras que se sucedem, conforme apresentado nas figuras 5.4 a 5.7 estando as demais no Anexo 2.

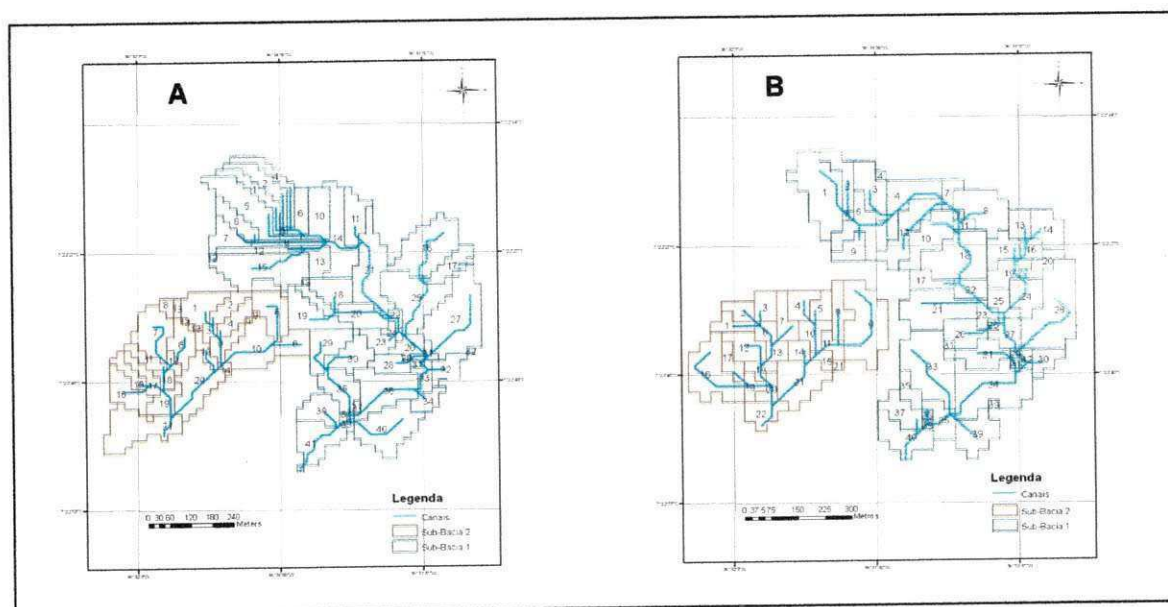


Figura 5.4 Mapa da delimitação automática a partir do MDE interpolado de 20 m (A) e do MDE ASTER (B) das sub-bacias 1 e 2

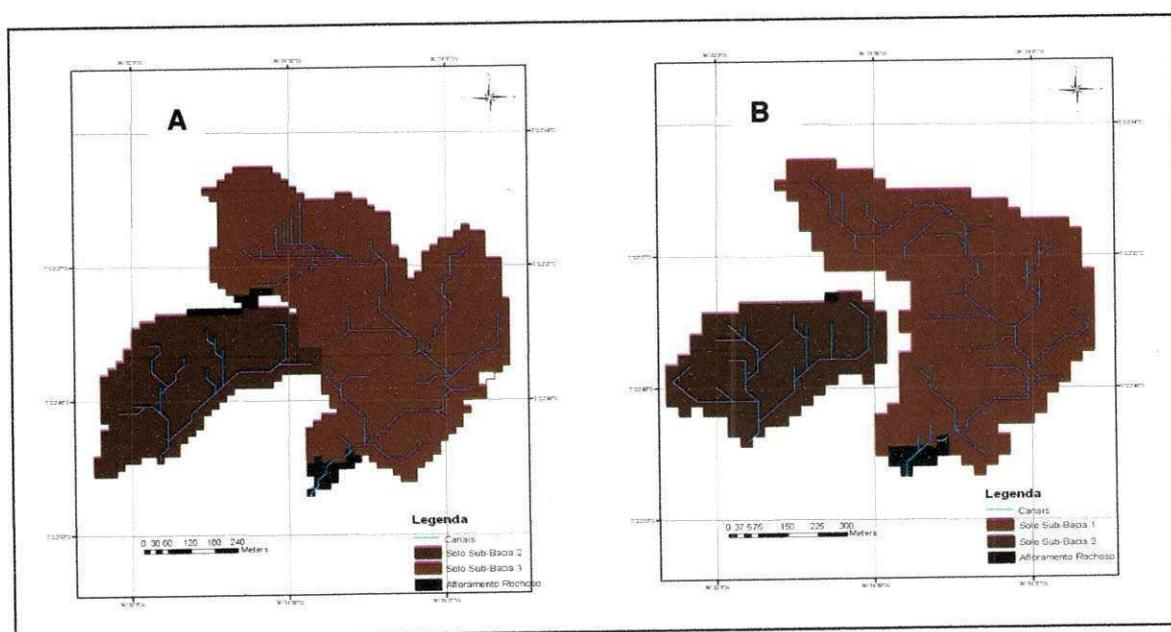


Figura 5.5 Mapa da identificação dos solos nas sub-bacias delimitadas pelo interpolado de 20 m (A) e pelo MDE ASTER (B)

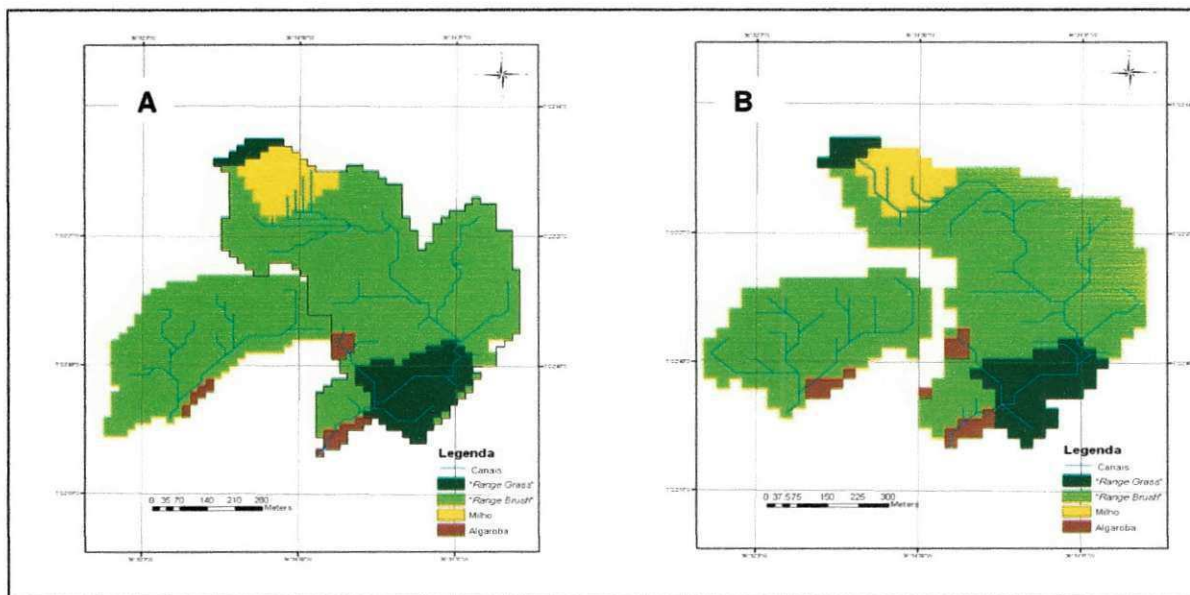


Figura 5.6 Mapa da identificação da cobertura do solo pela delimitação a partir do MDE interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

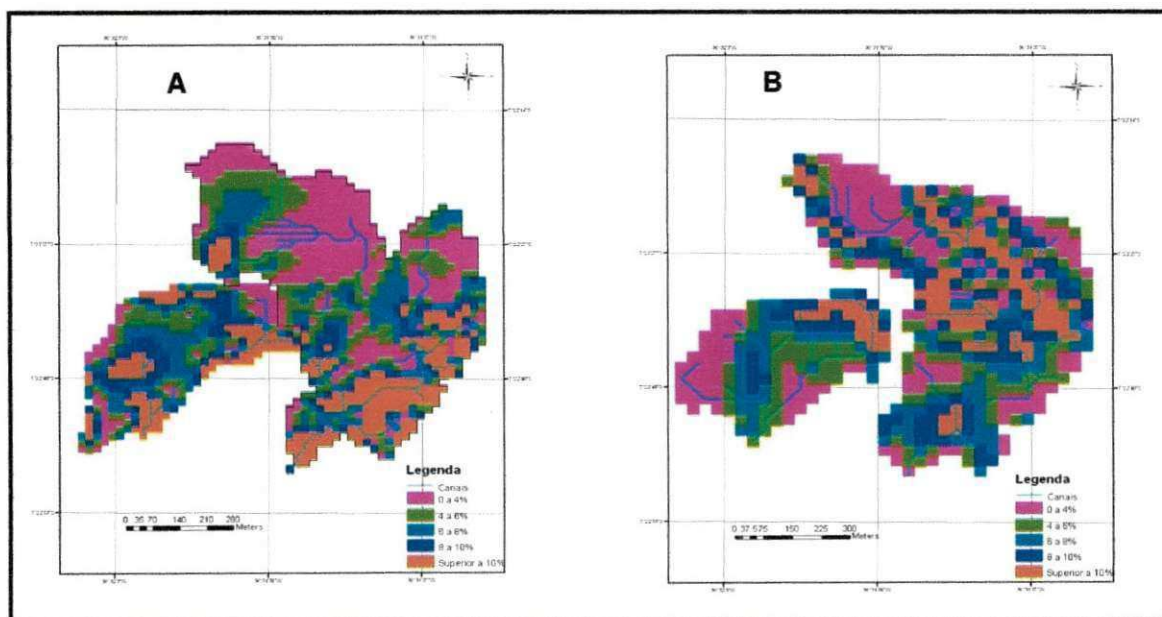


Figura 5.7 Mapa da distribuição da ocorrência das declividades para MDE interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

A Figura 5.7 evidencia a forma como o MDE ASTER encontrou os intervalos de declividade em algumas áreas da Sub-Bacia 2, o que explica a razão do seu reduzido

número de URH. O produto MDE interpolado apresenta um maior destaque para as áreas com declividade superior a 10%

Os dados do solo que geraram melhores resultados foram efetivamente aqueles extraídos no campo. A figura 5.8 indica a delimitação da ocorrência dos tipos de solo na Sub-Bacia 2.

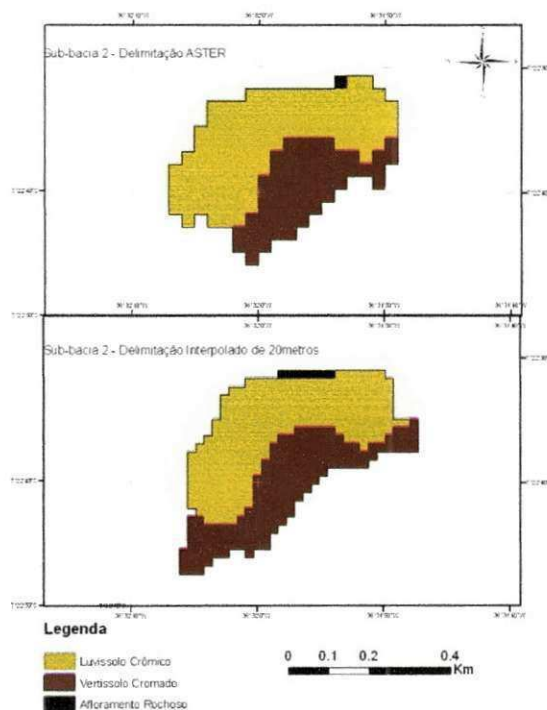


Figura 5.8 Mapa da distribuição dos dois tipos de solo na Sub-Bacia 2

5.4.2 Delimitação da Bacia Riacho dos Namorados

A área mínima de drenagem para formação de um canal para a Bacia do Riacho dos Namorados foi de 10 hectares. E no que diz respeito ao intervalo de classes de declividades fez-se uma ligeira modificação de tal maneira que ficaram: 0 a 4%, 4 a 6%, 6 a 8%, 8 a 12% e superior a 12%.

A tabela 5.5 mostra alguns parâmetros morfométricos para as delimitações efetuadas, enquanto que a tabela 5.6 mostra a porcentagem de área inserida em cada intervalo de declividade.

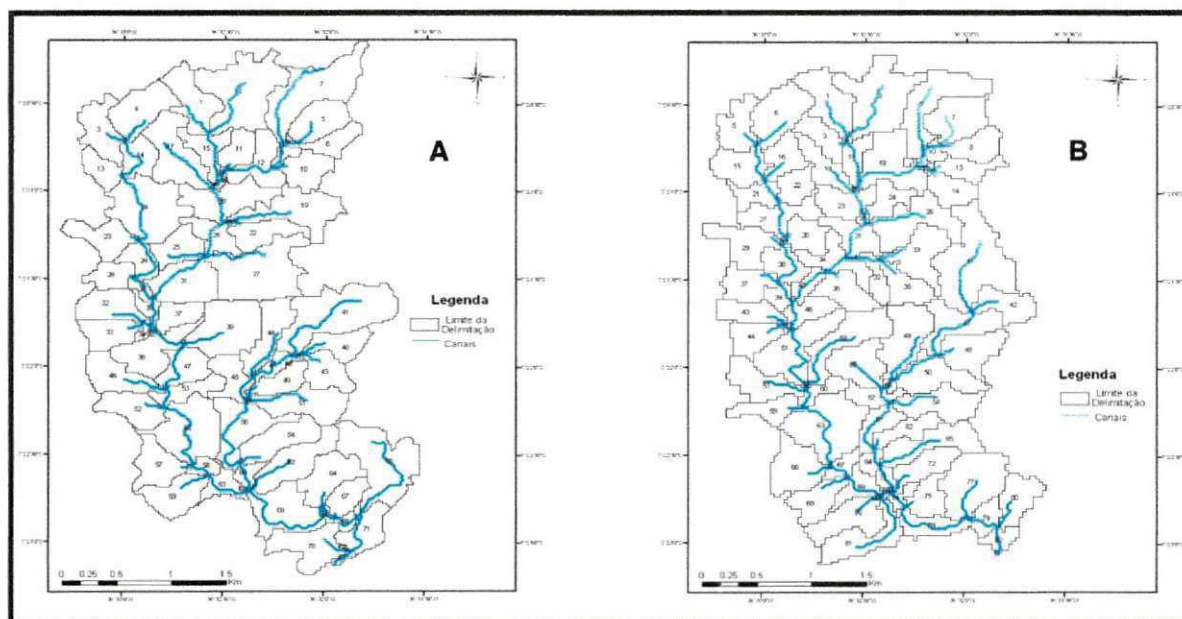


Figura 5.9 Mapa do resultado da delimitação da Bacia do Riacho dos Namorados utilizando o interpolado (A) e o MDE ASTER (B)

Ambas as delimitações, observadas na figura 5.9, deixam claro que a existência do açude dos Namorados promoveu uma má aquisição de pontos, prejudicando o processo de delimitação da bacia. Diante disto, seria necessário um exaustivo trabalho de correção “pixel a pixel” para corrigir as falhas. Isto não foi realizado por não ser diretamente o objetivo do trabalho, e ainda tal delimitação não afetaria significativamente os resultados pretendidos.

A figura 5.10 exibe a distribuição espacial de declividades, de modo que uma análise visual mostra uma distribuição mais uniforme para o interpolado. Isto parece retratar melhor a realidade da bacia.

Por fim, vale salientar que para a Sub-Bacia 2 não foi possível considerar duas classes diferentes de solo, luvissole e vertissolo, devido aos resultados insatisfatórios gerados. Assim o mapa de tipo de solo foi ajustado, utilizando a ferramenta SIG, conforme a figura 5.11.

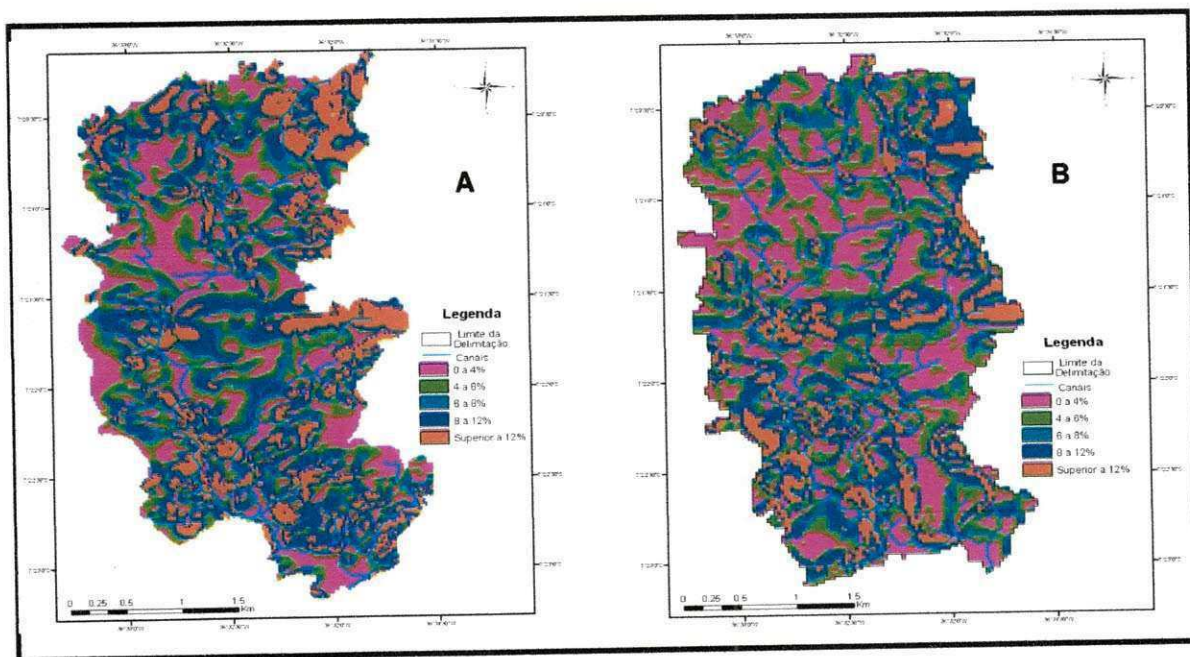


Figura 5.10 Mapa da distribuição das classes de declividade utilizando o interpolado (A) e o MDE ASTER (B)

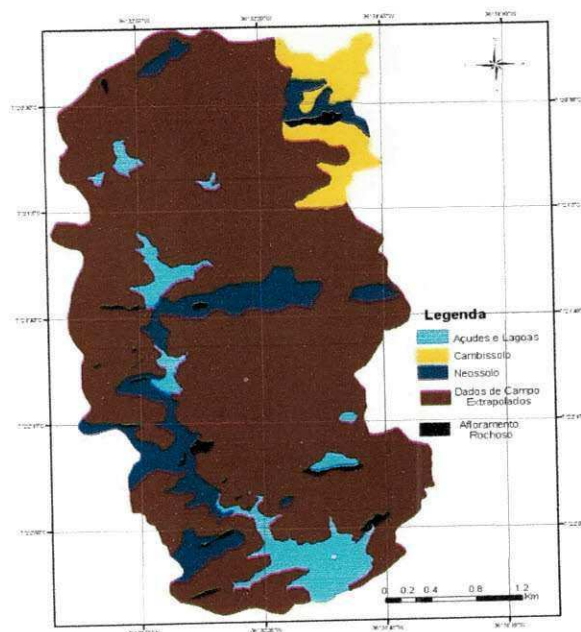


Figura 5.11 Mapa dos tipos de solo após o resultados das simulações na Sub-Bacia 2

Cenário 1

A consideração dos açudes existentes na Bacia do Riacho dos Namorados gerou os mapas de cobertura e tipo de solo apresentados nas figuras 5.12 a 5.13.

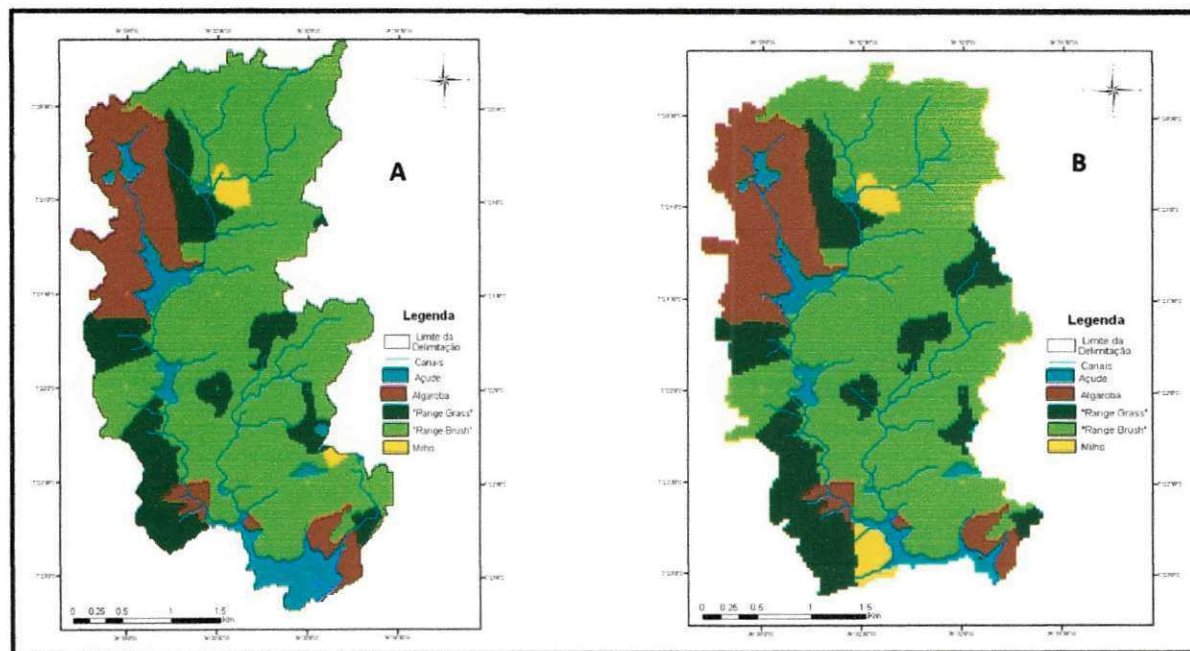


Figura 5.12 Mapa da cobertura do solo para o cenário 1 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

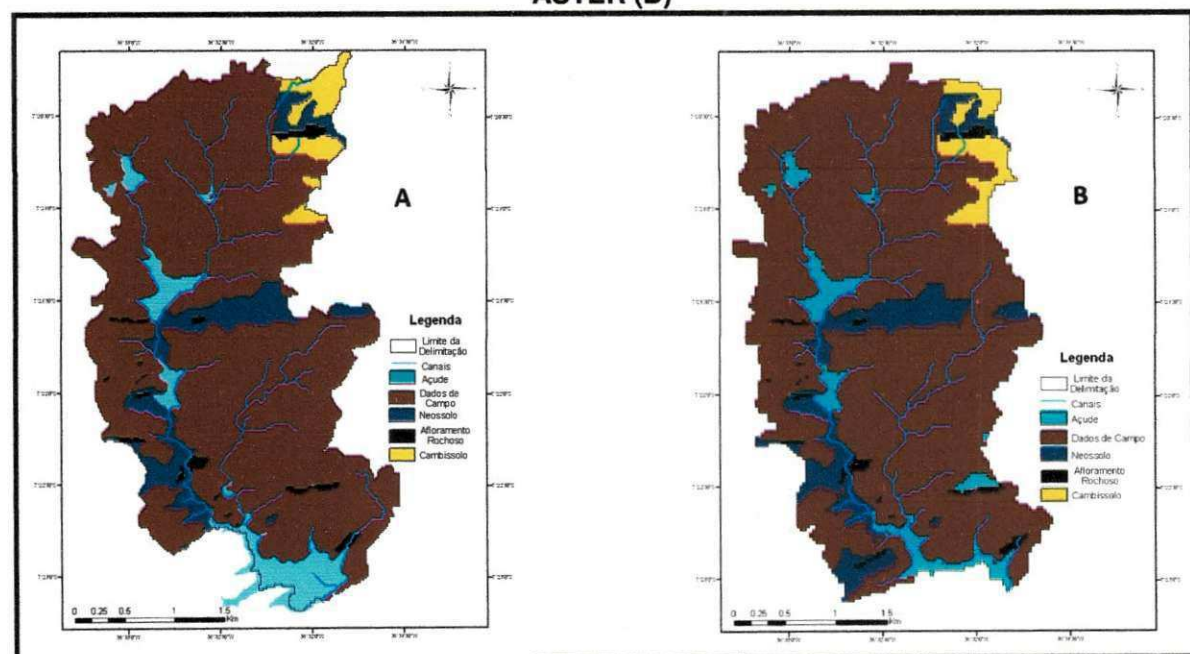


Figura 5.13 Mapa da cobertura do solo para o cenário 1 através do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

Conforme as exigências do modelo os açudes foram vinculados a uma única sub-bacia e, portanto, a associação destes açudes com as sub-bacias estão apresentadas na tabela 5.7. Como critério para tal estabelecimento, cada açude foi vinculado a sub-bacia que possuísse a maior área de drenagem.

Tabela 5.7 Sub-bacias aos quais os açudes foram vinculados

Açudes	Número da sub-bacia	
	Interpolado	ASTER
Bola III	14	15
Roque	18	20
Bola I	31	40
Luiz Heleno	47	51

Cenário 2

À região dos açudes foi incorporada a área que o circundava. Exceção foi feita ao açude Namorados, que devido a sua grande abrangência atingia várias coberturas do solo. Assim, o açude Namorados teve sua área convertida para "range grass". Os mapas de cobertura do solo e do tipo de solo para os dois MDEs estão apresentados nas figuras 5.14 e 5.15.

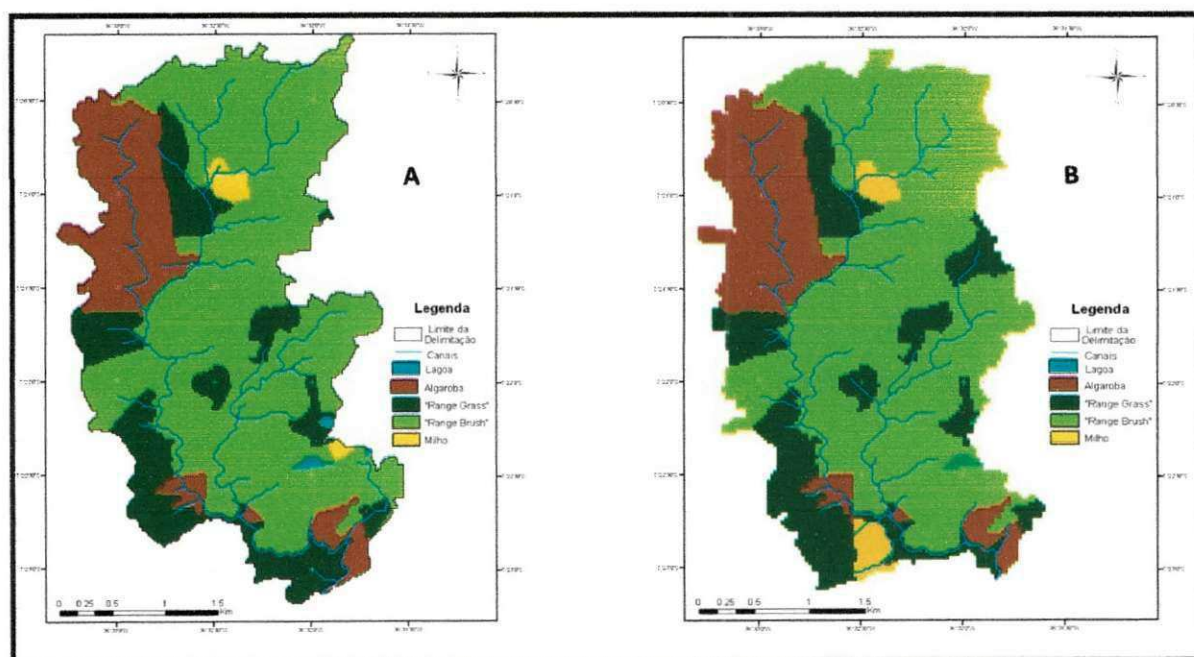


Figura 5.14 Mapa da cobertura do solo para o cenário 2 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

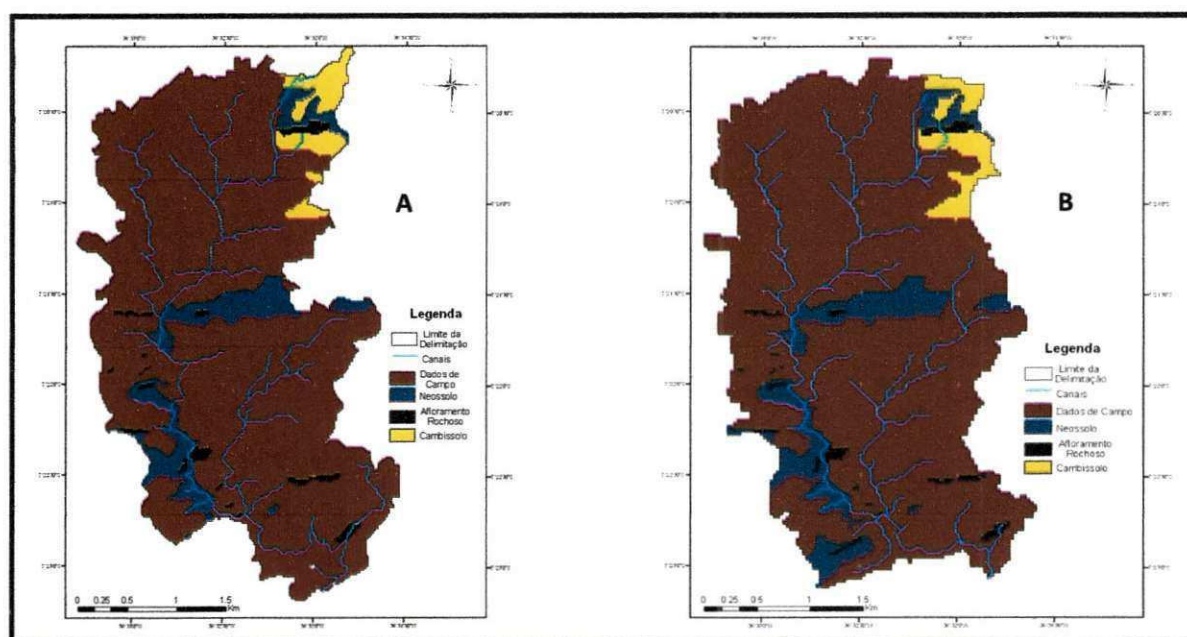


Figura 5.15 Mapa do tipo de solo para o cenário 2 do interpolado (A) e do MDE ASTER (B)

5.5 Parametrização na Sub-Bacia 2

Com todas as condições da unidade de simulação definidas nas etapas anteriores, os parâmetros hidrossedimentológicos foram estabelecidos pelo modelo SWAT. Fornecendo os dados da chuva e da evapotranspiração potencial para o período da simulação, os processos de escoamento superficial e erosão do solo puderam ser simulados.

As simulações iniciais mostraram uma superestimação do escoamento superficial gerado. Com isto, buscou-se modificar um parâmetro que tivesse alta sensibilidade para o escoamento superficial. Kannan (2007) estudou o comportamento de cinco parâmetros em respeito a resposta do modelo SWAT. Entre eles, foi estudado o parâmetro SOL_AWC, que trata da capacidade de água disponível no solo, cujo aumento atenua o escoamento superficial. Este parâmetro foi indicado por White (2005) como de grande influência nos resultados do fluxo superficial, apresentando grande sensibilidade neste

processo hidrológico. O aumento do valor de SOL_AWC proporciona que uma maior lâmina de água infiltre no solo, promovendo redução no escoamento superficial. Por se tratar de um parâmetro calibrável do modelo, seu valor foi alterado de forma manual para 0,4 adotado nas três primeiras camadas do solo (no caso do perfil de solo 41, que possui a quarta camada de solo, o valor de SOL_AWC foi inalterado, com valor de 0,150) visando melhor compatibilizar a lâmina escoada simulada.

Uma vez que o fluxo superficial foi reduzido, procedeu-se com a variação de valor do coeficiente de evaporação do solo para as cinco combinações de tipo de solo, de modo a obter resultados mais coerentes com os dados para lâmina observada. Sendo assim, foram efetuadas cinquenta e duas (52) simulações visando selecionar a textura do solo e o valor da variável ESCO que fornecesse o melhor desempenho do modelo.

5.5.1 Escoamento na Sub-bacia 2

O conjunto de simulações proveu diversos resultados. Estes foram agrupados com os valores dos coeficientes de desempenho do modelo:

Tabela 5.8 Desempenho do modelo SWAT para as diversas combinações de textura do solo sob variação do parâmetro ESCO

Perfis do Solo	MDE	ESCO = 0,6		ESCO = 0,65		ESCO = 0,7		ESCO = 0,8		ESCO = 0,95	
		NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²
31-41	Interpolado de 20m	0,050	0,933	-0,039	0,034	-0,161	0,936	-0,593	0,942	-2,826	0,948
	ASTER	0,120	0,922	0,131	0,924	-0,041	0,927	-0,408	0,933	-2,523	0,942
31-42	Interpolado de 20m	0,146	0,930	0,087	0,931	0,013	0,933	-0,239	0,938	-2,031	0,946
	ASTER	0,147	0,919	0,093	0,922	0,011	0,924	-0,307	0,930	-2,235	0,942
32-41	Interpolado de 20m	0,151	0,926	0,096	0,928	0,012	0,931	-0,309	0,936	-2,245	0,944
	ASTER	0,148	0,922	0,095	0,923	0,028	0,926	-0,201	0,931	-1,778	0,945
32-42	Interpolado de 20m	0,174	0,926	0,128	0,927	0,069	0,93	-0,136	0,935	-1,737	0,945
	ASTER	0,174	0,919	0,131	0,92	0,077	0,923	-0,114	0,928	-1,695	0,942

Tabela 5.9 Desempenho do modelo SWAT para a textura do solo adquirida em campo sob variação do parâmetro ESCO

Dados de Campo										
MDE	ESCO = 0,95		ESCO = 0,9		ESCO = 0,85		ESCO = 0,8		ESCO = 0,75	
	NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²	NASH	R ²
Interpolado de 20m	0,286	0,916	0,296	0,921	0,302	0,920	0,307	0,918	0,311	0,909
ASTER	0,310	0,923	0,318	0,927	0,326	0,926	0,332	0,924	0,337	0,916

A análise do coeficiente de Nash destes resultados, expostos nas tabelas 19 e 20, mostram que quanto menor o coeficiente de evaporação do solo mais se aprimora o desempenho do modelo, pois favorece um melhor ajuste dos fluxos simulados. Tal ajuste se dá pela redução do escoamento superficial produzido, uma vez que o solo encontra-se mais rapidamente em estado com menor umidade – menores valores do coeficiente de evaporação do solo favorecem a maior retirada de demanda evaporativa de suas camadas – promovendo maior infiltração para camadas inferiores.

Os altos valores encontrados para o R² podem ser atribuídos à grande quantidade de eventos que não produziram escoamento, fato este muito bem representado pelo modelo SWAT para a combinação de alguns perfis de solo. Por outro lado, o coeficiente de Nash mostra comportamento inverso ao coeficiente R², com a redução da variável ESCO. A isto se aponta o aumento do erro relativo dos dados simulados perante os observados.

Foi verificado que nas simulações utilizando os dados de solo do Levantamento Topográfico houve como resultado uma super-estimativa do escoamento simulado. Isto pode ser pela dificuldade de ocorrer infiltração devido à relativa baixa quantidade de areia presente, havendo ainda grande quantidade de argila na primeira camada – bem como nas camadas inferiores.

As figuras 5.16 e 5.17 mostram os resultados das simulações para a combinação dos perfis de solo 31-41 para os dois valores extremos do parâmetro ESCO (0,95 e 0,6) com o MDE interpolado.

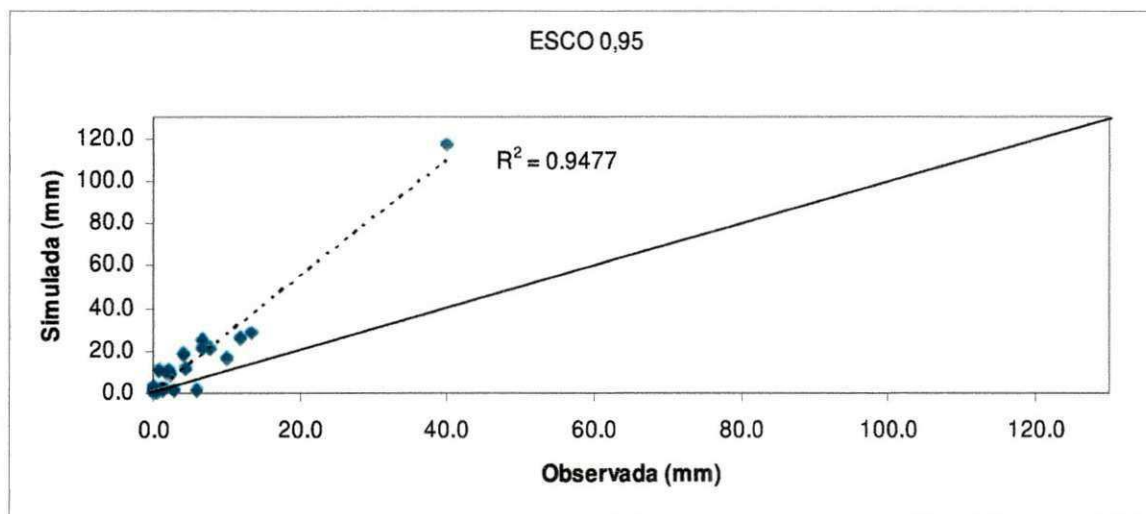


Figura 5.16 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os perfis de solo 31-41 para a Sub-Bacia 2

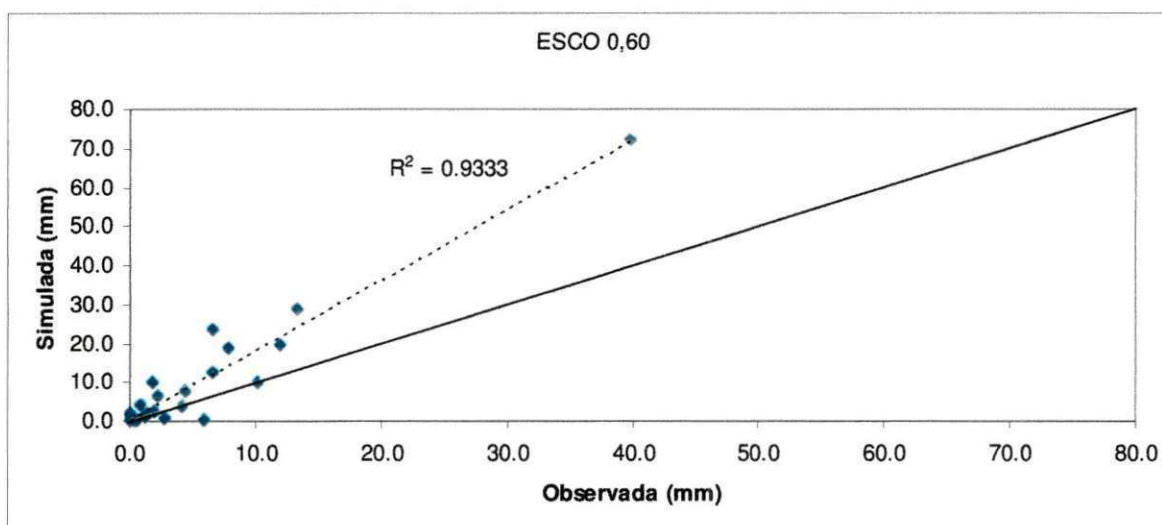


Figura 5.17 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os perfis de solo 31-41 para a Sub-Bacia 2

A utilização de dados de solo coletados em campo proveu melhores resultados, na avaliação pelo coeficiente de Nash, devido ter resultados das lâminas escoadas próximas às observadas. O uso desta textura proveu os processos de infiltração e escoamento superficial dentro de um intervalo coerente. É possível que a quantidade de areia tenha favorecido a infiltração. E ainda, o modelo SWAT não permite que a

demanda evaporativa de uma camada seja suprida por uma inferior. Assim, é provável que a utilização de apenas uma camada do solo para os dados de campo tenham favorecido para uma maior retirada de água pela evaporação do solo.

Os coeficientes também apontam uma proximidade dos resultados para as simulações entre os diferentes MDE. A este fato, nota-se que o volume do escoamento superficial total possui baixa relação com a topografia do terreno, resultado observado no trabalho de Srinivasan (2003), realizado em parcelas. Trata-se de um resultado importante nesta segunda etapa de resultados dos trabalhos, haja vista que o uso de MDEs originados por sensoriamento remoto facilita a aplicação do modelo para áreas sem dados levantados em campo.

As figuras 5.18 e 5.21 mostram, para ambos MDEs, os resultados para os dados de solo de campo com a variação de ESCO no valor default e de 0,75.

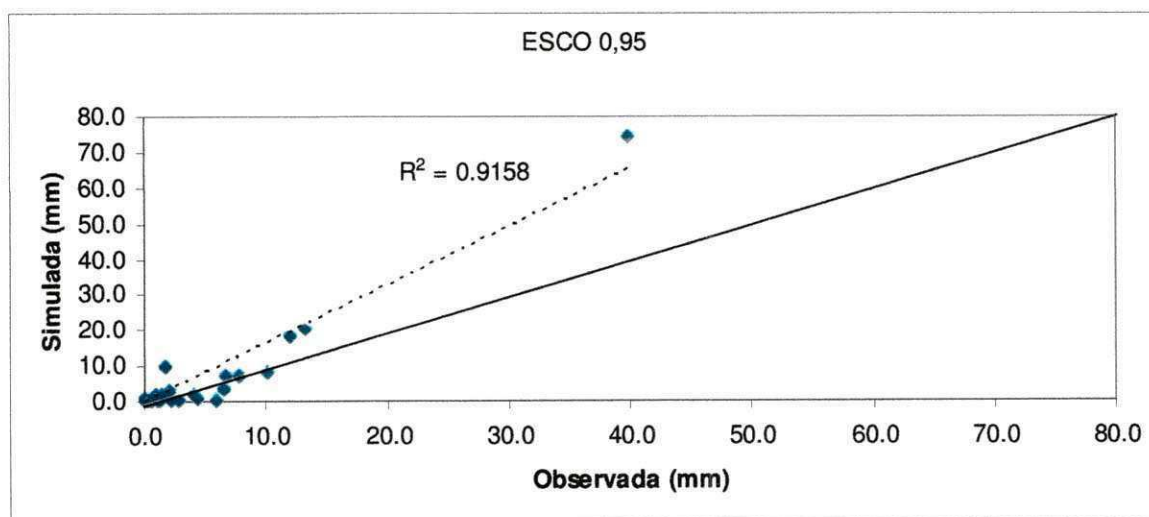


Figura 5.18 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2

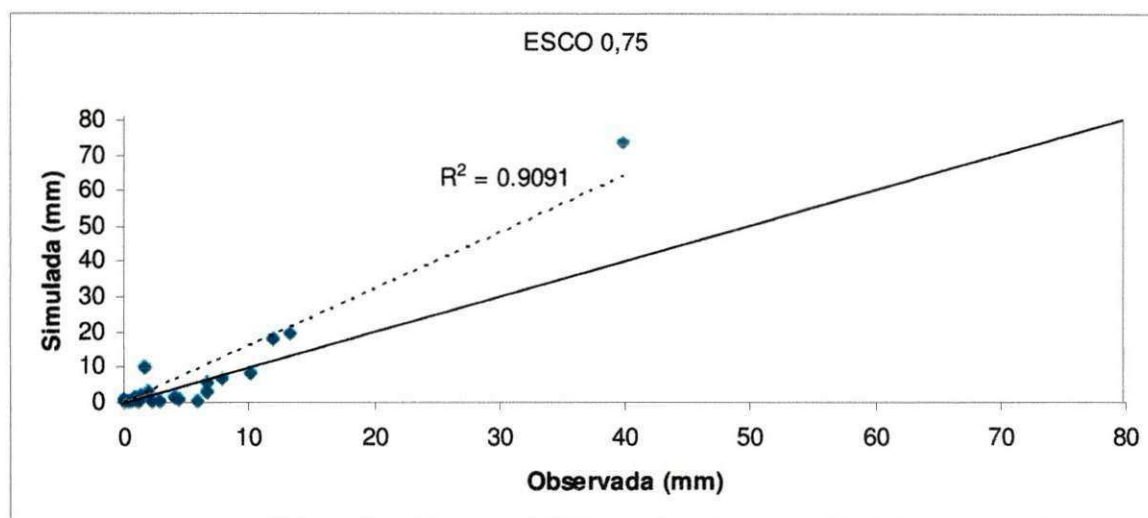


Figura 5.19 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2

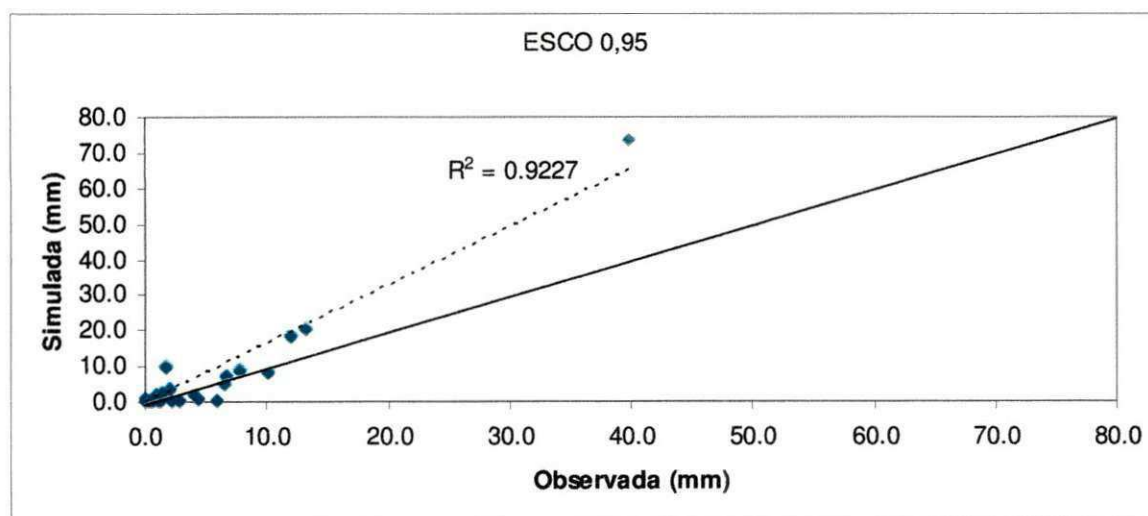


Figura 5.20 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2

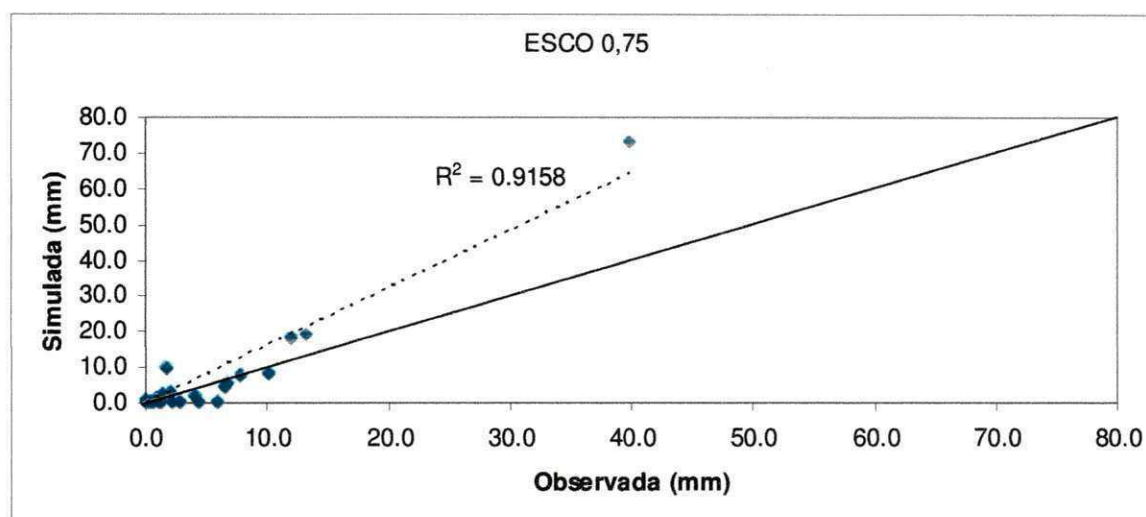


Figura 5.21 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, utilizando os dados de textura de campo, para a Sub-Bacia 2

Nas figuras 5.18 a 5.21 um ponto singular pode ser notado. Trata-se de um evento de precipitação com 164 mm para esta bacia, ocorrido no dia 07/06/2006. Este evento gerou uma lâmina observada de apenas 40 mm, o que leva a suposição que foi um evento de intensidade média ou baixa, uma vez houve eventos de precipitação nos dias anteriores que proporcionaria o estado do solo ainda úmido. Ou seja, é possível que este evento tenha se estendido durante todo o dia de modo que a lâmina escoada observada não foi muito elevada – diferentemente da lâmina simulada. A estimativa através do método SCS-CN resultou um valor de lâmina próximo do dobro, uma vez que este método não considera a intensidade da precipitação.

Este evento singular proporciona uma distorção no desempenho do modelo, sob a perspectiva de ambos os coeficientes de avaliação. Com isto, buscou-se uma nova análise sem incluir eventos sem geração de lâmina (seja observada e simulada) e uma segunda análise também com a exclusão do evento singular do dia 07/06/2006, conforme a tabela 5.10.

Tabela 5.10 Exibição da avaliação do modelo, para a Sub-Bacia 2, perante exclusão de determinados eventos

Modelo Digital de Elevação	Valor de ESCO	NASH		R ²	
		Excluído eventos zerados	Exclusão de eventos zerados* e aquele destoante	Excluído eventos zerados	Exclusão de eventos zerados* e aquele destoante
Interpolado	0,95	0,175	0,436	0,928	0,706
	0,75	0,205	0,435	0,923	0,686
ASTER	0,95	0,195	0,491	0,933	0,725
	0,75	0,288	0,447	0,929	0,705

*Sem geração de lâmina escoada e simulada.

As figuras 5.22 a 5.25 apresentam comparação entre as lâminas observadas e simuladas sem a presença dos eventos que não promoveram escoamento superficial e o simulado.

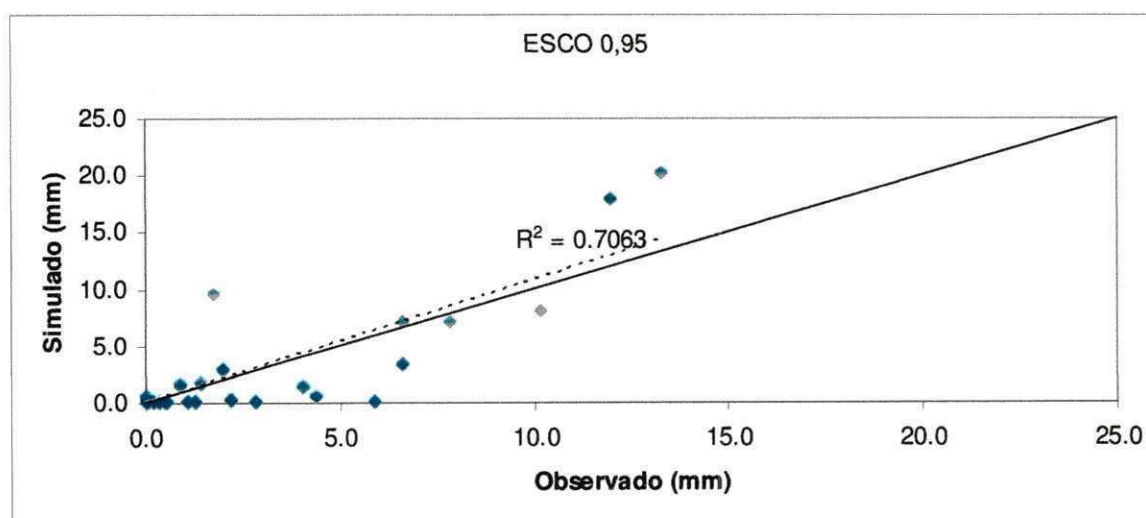


Figura 5.22 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos

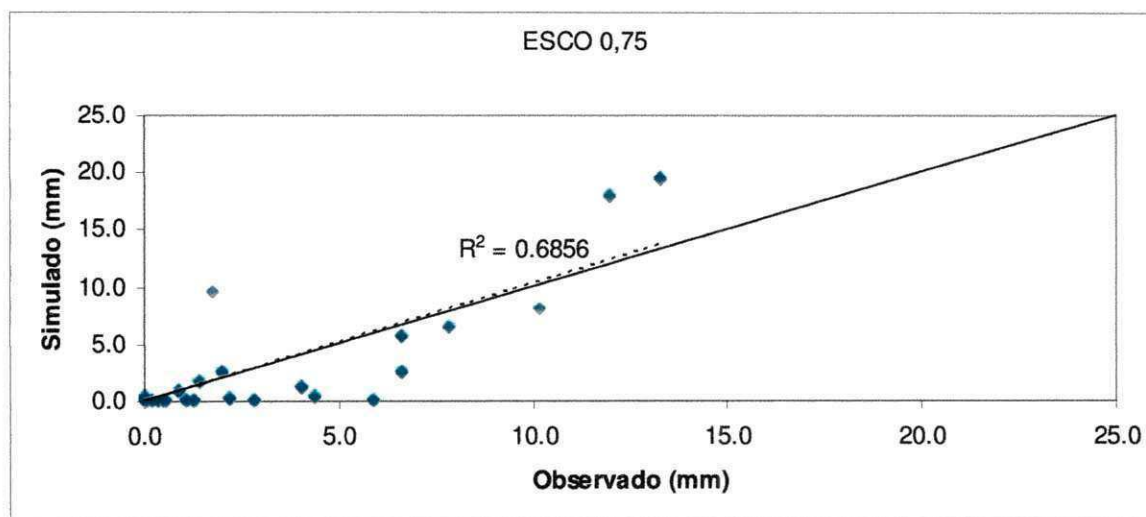


Figura 5.23 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos

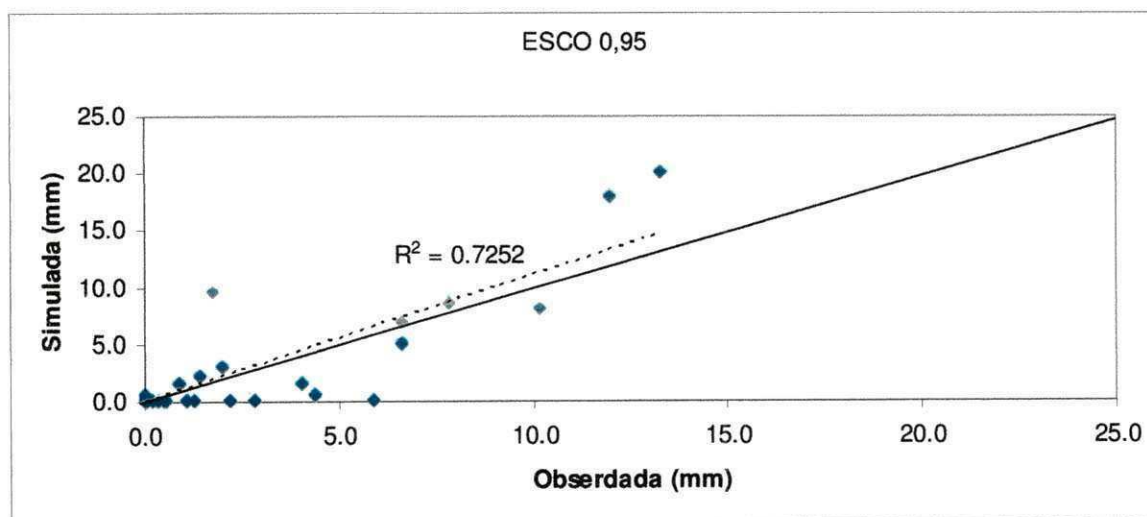


Figura 5.24 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos

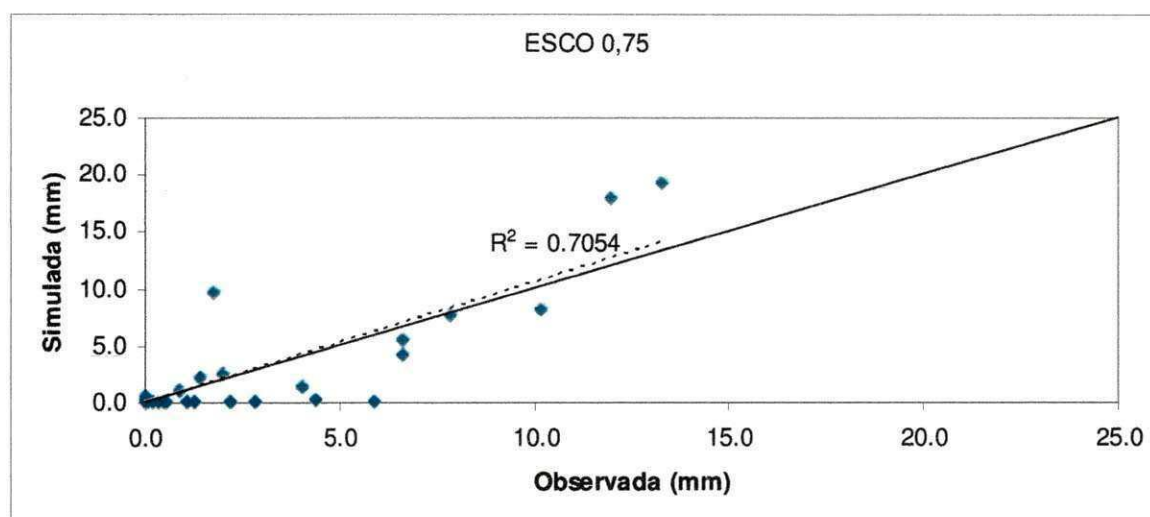


Figura 5.25 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 2, com exclusão de determinados eventos

A tabela 5.11 mostra o total da lâmina (mm) observado e simulada para os eventos analisados, considerando ainda o total excluindo o evento singular do dia 07/06/2006.

Tabela 5.11 Relação da lâmina total dos eventos observados e aqueles simulados

	Observado (mm)		Simulado (mm)				Simulado sem eventos destoantes (mm)			
	Com eventos destoantes	Sem eventos destoantes	Interpolado		ASTER		Interpolado		ASTER	
Valor de ESCO	-	-	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75
Total	125,5	85,7	157,2	151,1	160,2	153,4	91,11	77,2	89,64	80,3

5.5.2 A Produção de Sedimentos

Diante dos resultados da lâmina simulada, efetuou-se a análise dos sedimentos para os dados de campo do solo com o valor de ESCO "default", por fornecer melhores resultados. Foram ao todos 23 eventos com dados observados e simulados que são

expostos nas tabelas 5.12 e 5.13, sem que uma análise através de coeficientes de desempenho tenha sido realizada para a produção de sedimentos.

Tabela 5.12 Escoamento superficial e a produção de sedimentos observados e simulados para a Sub-Bacia 2 utilizando o MDE interpolado, com valor de ESCO de 0,95, e coeficientes de desempenho de Nash de 0,436 e R² de 0,714 para a lâmina

Evento	Prec. (mm)	Escoamento		Observado		Simulado			
		Obs.	Sim.	Sedimento Bruto OBSser (kg)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Carga de sedimentos no canal da bacia do exutório (kg)		Porcentagem que Deposita no trecho (%)
							Entra	Sai	
1/25/2004	51,1	6,612	6,64	747,86	23,2	110	360,3	1,58	99,562
1/28/2004	13,5	1,421	2,39	167,92	5,21	130	312,2	0,62	99,802
1/30/2004	15,2	1,091	0,11	236,77	7,35	0	0	0	0
1/31/2004	13,2	0	1,07	0	0	20	94,95	0,08	99,916
2/4/2004	49,3	13,26	20,15	658,65	20,43	1300	2460	18,1	99,265
2/6/2004	25,2	1,729	9,54	110,86	3,44	1290	2438	6,69	99,726
2/27/2004	17,3	0,504	0	172,64	5,36	0	0	0	0
2/28/2004	5,8	0,551	0	25,56	0,79	0	0	0	0
7/15/2004	45,7	4,049	1,83	26,74	0,83	20	40,67	0,51	98,747
3/29/2005	28,5	0,869	1,72	171,76	5,33	140	315,2	0,45	99,858
4/25/2005	19,6	5,896	0	436,85	13,55	0	0	0	0
4/26/2005	28,2	1,975	3,05	536,07	16,63	290	569,6	1,37	99,76
4/28/2005	41,2	7,811	8,83	567,97	17,62	320	715,4	4,57	99,362
5/4/2005	30,2	2,206	0,15	856,3	26,57	0	0	0	0
6/2/2005	17,3	0	0,53	0	0	10	34,16	0,07	99,796
6/14/2005	42,7	6,638	7,09	1277,94	39,65	260	490,5	4,6	99,063
6/18/2005	11,4	1,256	0,02	220,87	6,85	0	0	0	0
12/5/2005	84	11,952	17,89	2148,55	66,66	280	544	15,68	97,118
12/6/2005	14	2,803	0,23	212,99	6,61	0	0	0	0
12/7/2005	7,1	0,029	0	71	2,2	0	0	0	0
2/16/2006	69,1	10,15	8,18	785,83	24,38	1200	2252	5,66	99,749
5/13/2006	13,2	0,343	0	390,48	12,11	0	0	0	0
6/21/2006	31,8	4,359	0,9	1094,29	33,95	0	8,25	0,12	98,546
Total		85,505	90,32	10917,9	-	-	10635,23	60,1	99,435

Tabela 5.13 Escoamento superficial e a produção de sedimentos observados e simulados para a Sub-Bacia 2 utilizando o MDE ASTER, com valor de ESCO de 0,95, e coeficientes de desempenho de Nash de 0,491 e R² de 0,732 para a lâmina

		Observado				Simulado			
Evento	Prec. (mm)	Escoamento		Sedimento Bruto OBSser (kg)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Carga de sedimentos no canal da bacia do exutório (kg)		Porcentagem que Deposita no trecho (%)
		Obs.	Sim.				Entra	Sai	
1/25/2004	51,1	6,612	6,4	747,86	23,2	140	131,9	3,99	96.975
1/28/2004	13,5	1,421	2,39	167,92	5,21	120	96,05	1,234	98.715
1/30/2004	15,2	1,091	0,08	236,77	7,35	0	0	0	0
1/31/2004	13,2	0	1,06	0	0	30	22,5	0,189	99.16
2/4/2004	49,3	13,26	20,05	658,65	20,43	1070	746,4	29,15	96.095
2/6/2004	25,2	1,729	9,54	110,86	3,44	1050	712,9	10,74	98.494
2/27/2004	17,3	0,504	0	172,64	5,36	0	0	0	0
2/28/2004	5,8	0,551	0	25,56	0,79	0	0	0	0
7/15/2004	45,7	4,049	1,64	26,74	0,83	20	12,71	0,749	94.108
3/29/2005	28,5	0,869	1,62	171,76	5,33	140	94,69	0,822	99.131
4/25/2005	19,6	5,896	0	436,85	13,55	0	0	0	0
4/26/2005	28,2	1,975	2,96	536,07	16,63	250	168,8	1,982	98.826
4/28/2005	41,2	7,811	8,69	567,97	17,62	320	224,6	9,83	95.624
5/4/2005	30,2	2,206	0,06	856,3	26,57	0	0	0	0
6/2/2005	17,3	0	0,49	0	0	10	9,593	0,3	96.873
6/14/2005	42,7	6,638	6,93	1277,94	39,65	210	141,8	7,063	95.02
6/18/2005	11,4	1,256	0,01	220,87	6,85	0	0	0	0
12/5/2005	84	11,952	17,89	2148,55	66,66	230	175,2	24,81	85.84
12/6/2005	14	2,803	0,21	212,99	6,61	0	0	0	0
12/7/2005	7,1	0,029	0	71	2,2	0	0	0	0
2/16/2006	69,1	10,15	8,18	785,83	24,38	970	657	8,748	98.669
5/13/2006	13,2	0,343	0	390,48	12,11	0	0	0	0
6/21/2006	31,8	4,359	0,77	1094,29	33,95	0	8,12	4,03	50.37
Total		85,505	88,97	10917,9	-	-	3202,278	103,653	96,764

5.6 Validação na Sub-Bacia 1

Para fins da validação do modelo parametrizado na Sub-Bacia 2, os eventos com registro de escoamento e produção de sedimentos na Sub-Bacia 1 foram simulados, para dois valores de ESCO (0,95 e 0,75) e os dois MDEs.

Os resultados da simulação da lâmina escoada e da produção de sedimentos para a Sub-Bacia 1 são apresentados a seguir.

5.6.1 Lâmina Escoada

As figuras 5.26 e 5.27 apresentam a comparação entre as lâminas escoadas observadas e simuladas pelo SWAT para os dois MDEs .

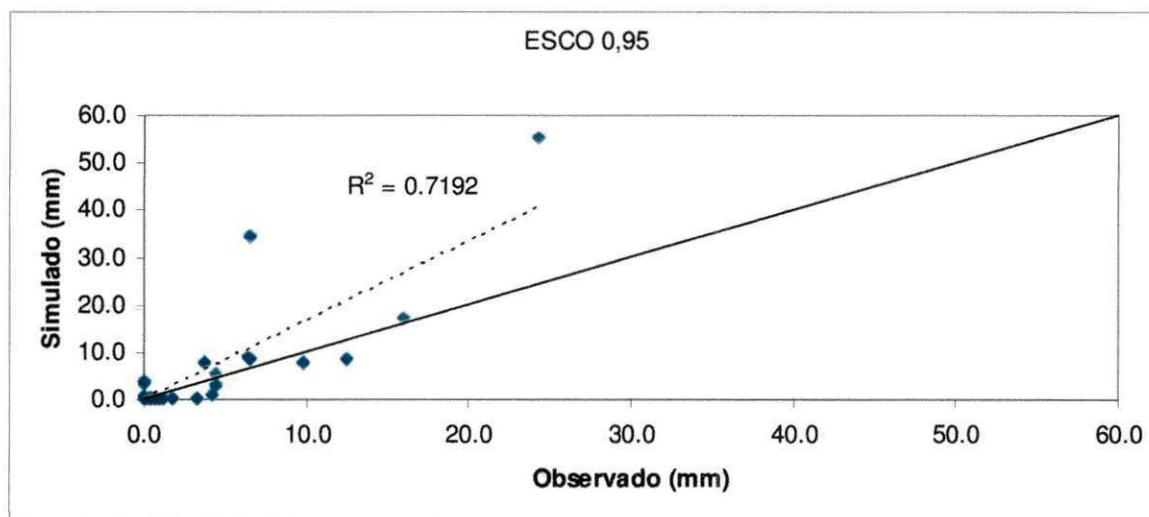


Figura 5.26 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE interpolado, para a Sub-Bacia 1

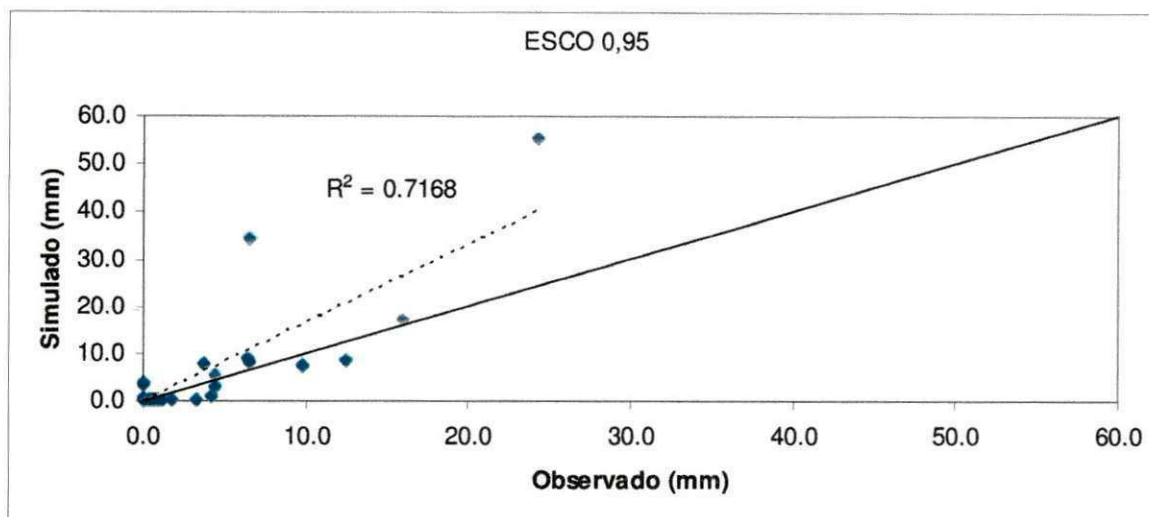


Figura 5.27 Comparação gráfica entre a lâmina observada e simulada para o MDE ASTER, para a Sub-Bacia 1

A tabela 5.14 apresenta o desempenho do modelo para a simulação na Sub-Bacia 1 em termos do coeficiente de eficácia de Nash-Sutcliffe e o coeficiente de determinação, R^2 :

Tabela 5.14 Desempenho do modelo para os MDEs sob diferentes valores de ESCO

MDE	Valor de ESCO	NASH	R^2
Interpolado	0,95	-0,665	0,720
	0,75	-0,444	0,724
ASTER	0,95	-0,650	0,717
	0,75	-0,436	0,712

Os gráficos mostram que a grande maioria dos eventos simulados foram muito bem, em volta da linha de 1:1. Contudo, esta observação não se apresenta nos coeficientes de desempenho. Mais uma vez, a existência de dois eventos singulares parece provocar grande efeito negativo na avaliação da eficiência do modelo SWAT, neste caso. Os dois eventos: no dia 04/02/2004 quando uma precipitação de 61 mm gerou uma lâmina escoada de apenas 6,5mm e um segundo no dia 07/06/2006 em que um evento de 133 mm fez escoar uma lâmina de 24,2 mm. A resposta do modelo para tais eventos foi de respectivamente, 34 e 55,3 mm, então restringindo a avaliação a dados, excluindo os dois eventos singulares e eventos do escoamento nulo, foram obtidos os resultados expostos na tabela 5.15:

Tabela 5.15 Coeficientes do desempenho do modelo, Nash e R², para a Sub-Bacia 1, com exclusão de eventos nulos e singulares

Modelo Digital de Elevação	Valor de ESCO	NASH		R ²	
		Excluído eventos zerados	Exclusão de eventos zerados * e destoante	Excluído eventos zerados	Exclusão de eventos zerados * e destoante
Interpolado	0,95	-0,930	0,785	0,699	0,800
	0,75	-0,749	0,773	0,687	0,788
ASTER	0,95	-0,921	0,780	0,697	0,796
	0,75	-0,672	0,779	0,691	0,792

*Sem geração de lâmina escoada e simulada.

O total escoado para a Sub-Bacia 1, observado e estimado nas quatro diferentes simulações estão mostrados na tabela 5.16:

Tabela 5.16 Relação da lâmina total dos eventos observados e aqueles simulados

-	Observado (mm)		Simulado (mm)				Simulado sem eventos destoantes (mm)			
	Com eventos destoantes	Sem eventos destoantes	Interpolado de 20metros		ASTER		Interpolado de 20metros		ASTER	
Valor de ESCO	-	-	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,75
Total	109,5	78,7	164,2	153,6	164,9	155,5	74,7	69,2	73,2	68,1

5.6.2 A Produção de Sedimentos

A análise da produção de sedimentos foi feita da mesma forma que na Sub-Bacia 2. As tabelas 5.17 e 5.18 mostram os resultados para as simulações utilizando o interpolado e o MDE ASTER.

Tabela 5.17 Escoamento superficial e a produção de sedimentos observados e simulados para a Sub-Bacia 1 utilizando o MDE interpolado, com valor de ESCO de 0,95, Nash de 0,785 e R² de 0,800.

				Observado		Simulado			
Evento	Prec. (mm)	Escoamento		Sedimento Bruto OBSser (kg)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Carga de sedimentos no canal da bacia do exutório (kg)		Porcentagem que Deposita no trecho
		Obs.	Sim.				Entra	Sai	
1/25/2004	61,6	12,515	8,28	1287,63	21,82	630	1126	249,3	77,860
1/26/2004	4,5	0	0	0	0	0	0,85	0,14	83,529
1/27/2004	4	0	0,49	0	0	0	0,33	0,11	66,667
1/30/2004	11,5	0,749	0	390,63	6,62	0	0,01	0,01	0
1/31/2004	12,1	1,138	0,04	35,77	0,61	30	21,63	4,74	78,086
2/27/2004	17	1,746	0	207,74	3,52	0	0	0	0
2/28/2004	6,4	0,697	0	35,77	0,61	0	0	0	0
7/15/2004	45,7	4,471	2,77	35,77	0,61	50	83,47	53,27	36,181
2/17/2005	9,1	0,105	0,02	68,22	1,16	0	0	0	0,000
3/19/2005	61,6	4,385	5,2	1716,83	29,1	380	613,1	120,5	80,346
3/25/2005	22,6	0,426	0,03	178,84	3,03	0	0	0	0
3/29/2005	36	3,684	7,53	307,6	5,21	910	1677	245	85,391
4/28/2005	38,4	6,551	8,09	1001,49	16,97	730	1361	241,8	82,234
6/2/2005	19	0	3,23	0	0	80	131,4	73,16	44,323
6/14/2005	52,8	6,468	8,8	2289,11	38,8	200	336,1	285,3	15,115
6/18/2005	10,5	1,204	0,07	519,23	8,8	0	0,03	0,03	0
12/5/2005	84	16,03	16,89	3764,41	63,8	450	701,6	330,6	52,879
12/7/2005	7,1	0	0,15	0	0	0	0,45	0,45	0
2/16/2006	61,5	9,77	7,28	1365,26	23,14	820	1400	233,7	83,307
4/24/2006	10,1	0,398	0	330,04	5,59	0	0	0	0
4/27/2006	12,1	3,304	0	236,06	4	0	0	0	0
5/13/2006	15,3	0,894	0	720,97	12,22	0	0	0	0
6/21/2006	32,8	4,221	1,26	1559,37	26,43	10	1,75	1,75	0
Total		78,756	70,13	16050,74	-	-	7454,714	1839,874	75,319

Tabela 5.18 Escoamento superficial e a produção de sedimentos observados e simulados para a Sub-Bacia 1 utilizando o MDE ASTER, com valor de ESCO de 0,95, Nash de 0,780 e R² de 0,796.

Evento	Prec. (mm)	Escoamento		Observado		Simulado			
		Obs.	Sim.	Sedimento Bruto OBSser (kg)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Produção de Sedimentos (kg/ha)	Carga de sedimentos no canal da bacia do exutório (kg)		Porcentagem que Deposita no trecho
							Entra	Sai	
1/25/2004	61,6	12,515	8,22	1287,63	21,82	650	1290	101,3	92,147
1/27/2004	4	0	0,49	0	0	0	0,01	0,01	0
1/30/2004	11,5	0,749	0	390,63	6,62	0	0	0	0
1/31/2004	12,1	1,138	0,04	35,77	0,61	30	49,76	3,56	92,846
2/27/2004	17	1,746	0	207,74	3,52	0	0	0	0
2/28/2004	6,4	0,697	0	35,77	0,61	0	0	0	0
7/15/2004	45,7	4,471	2,73	35,77	0,61	50	123,6	45,28	63,366
2/17/2005	9,1	0,105	0,02	68,22	1,16	0	0	0	0
3/19/2005	61,6	4,385	5,19	1716,83	29,1	380	799,3	100,8	87,389
3/25/2005	22,6	0,426	0,03	178,84	3,03	0	0	0	0
3/29/2005	36	3,684	7,5	307,6	5,21	970	1903	84,92	95,538
4/28/2005	38,4	6,551	8,09	1001,49	16,97	770	1539	99,14	93,558
6/2/2005	19	0	3,21	0	0	90	0,02	0,02	0
6/14/2005	52,8	6,468	8,74	2289,11	38,8	180	416,8	114,7	72,481
6/18/2005	10,5	1,204	0,06	519,23	8,8	0	0,03	0,03	0
12/5/2005	84	16,03	16,91	3764,41	63,8	400	906,1	272,3	69,948
12/7/2005	7,1	0	0,14	0	0	0	0,02	0,02	0
2/16/2006	61,5	9,77	7,28	1365,26	23,14	830	1607	80,16	95,012
4/24/2006	10,1	0,398	0	330,04	5,59	0	0	0	0
4/27/2006	12,1	3,304	0	236,06	4	0	0	0	0
5/13/2006	15,3	0,894	0	720,97	12,22	0	0	0	0
6/21/2006	32,8	4,221	1,23	1559,37	26,43	0	3,28	3,28	0
Total		78,756	69,88	16050,74	-	-	8637,915	905,519	89,517

5.7 Resumos e Visualização Espacial dos Resultados

O modelo SWAT permite visualizar e extrair médias mensais e anuais dos processos calculados em cada URH. As médias mensais da simulação são expostas nas tabelas 5.19 a 5.22. A carga de sedimentos que efetivamente alcança o exutório da bacia não é indicada diretamente, necessitando a averiguação dos arquivo de saída referente aos canais de cada sub-bacia para a devida extração desse valor – extraído dos resultados da sub-unidade do exutório. A produção de sedimentos foi inserida no resumo anual das simulações, mostrados nas tabelas 5.23 e 5.24.

A visualização espacial dos resultados trata de uma grande vantagem do uso de um modelo distribuído em conjunto com um SIG. Foram confeccionados mapas de geração de escoamento superficial, aporte de sedimentos e tendência ao assoreamento, conforme mostrado nas figuras 5.28 a 5.34.

Resumos

As tabelas 5.19 a 5.24 apresentam os resumos mensais e anuais das simulações com os MDEs para ambas as sub-bacias.

Tabela 5.19 Resumo das médias mensais para a simulação da Sub-Bacia 2 com o MDE interpolado.

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	92,87	19,41	0,29	17,91	10,15	1,79	167,5
2	90,07	13,6	0,48	13,66	19,44	1,32	144,28
3	78,77	3,29	0,52	3,15	26,88	0,2	151,7
4	63,37	3,97	0,46	3,76	27,16	0,2	136,4
5	43,83	0,05	0,49	0,53	29,18	0	112,83
6	125,77	27,61	0,54	27,95	32,3	0,98	62,9
7	35,07	0,64	0,5	0,97	17,67	0,01	99,57
8	19,07	0,01	0,38	0,39	12,48	0	111,13
9	2,37	0	0,28	0,28	2,59	0	159,8
10	0,77	0	0,21	0,21	0,77	0	197,53
11	1,33	0	0,16	0,16	1,25	0	195,87
12	37,87	6,04	0,24	6,2	4,73	0,09	167,43

Tabela 5.20 Resumo das médias mensais para a simulação da Sub-Bacia 2 com o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	92,87	19,25	0,18	18,51	10,17	1,49	167,5
2	90,07	13,55	0,28	13,54	19,36	1,08	144,28
3	78,77	3,19	0,31	3,3	26,81	0,19	151,7
4	63,37	3,89	0,28	4,16	27,13	0,19	136,4
5	43,83	0,02	0,3	0,32	29,13	0	112,83
6	125,77	27,31	0,33	27,54	32,36	0,79	62,9
7	35,07	0,56	0,31	0,82	17,6	0,01	99,57
8	19,07	0	0,25	0,25	12,48	0	111,13
9	2,37	0	0,19	0,19	2,57	0	159,8
10	0,77	0	0,16	0,16	0,77	0	197,53
11	1,33	0	0,12	0,12	1,26	0	195,87
12	37,87	6,03	0,16	6,13	4,71	0,08	167,43

Tabela 5.21 Resumo das médias mensais para a simulação da Sub-Bacia 1 com o MDE interpolado

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	98,13	20,78	0,46	20,63	9,81	1,78	167,5
2	104,33	18,85	0,73	19,3	19,97	2,15	144,28
3	85,67	6,14	0,67	6,32	25,57	0,51	151,7
4	64,77	5,59	0,54	6,1	27,92	0,61	136,4
5	51,2	1,19	0,53	1,71	26,85	0,08	112,83
6	126,37	22,66	0,75	23,14	33	0,78	62,9
7	37,13	0,96	0,5	1,41	17,2	0,02	99,57
8	20,67	0,03	0,36	0,37	13,13	0	111,13
9	2,6	0	0,23	0,23	2,87	0	159,8

Tabela 5.22 Resumo das médias mensais para a simulação da Sub-Bacia 1 com o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
1	98,13	20,73	0,23	20,63	9,82	1,84	167,5
2	104,33	18,83	0,41	19,01	19,95	2,16	144,28
3	85,67	6,13	0,43	6,28	25,56	0,52	151,7
4	64,77	5,59	0,39	5,96	27,94	0,65	136,4
5	51,2	1,18	0,41	1,59	26,9	0,08	112,83
6	126,37	22,59	0,46	22,83	33,09	0,76	62,9
7	37,13	0,94	0,42	1,36	17,22	0,02	99,57
8	20,67	0,03	0,33	0,34	13,16	0	111,13
9	2,6	0	0,25	0,25	2,86	0	159,8
10	1,07	0	0,19	0,19	1,06	0	197,53
11	1,63	0	0,15	0,15	1,34	0	195,87
12	33,9	5,62	0,2	5,78	4,03	0,13	167,43

Tabela 5.23 Resumo das médias anuais dos resultados para a Sub-Bacia 2 e 1 para o MDE interpolado

Média Anual	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 1
Precipitação (mm)	589,1	625,1
Escoamento Superficial (mm)	74,29	81,38
Fluxo Lateral (mm)	4,53	5,35
Total de Água que alcança o canal (mm)	74,86	84,91
REVAP (mm)	329,34	335,67
Evapotranspiração (mm)	182,2	182,3
Evapotranspiração Potencial (mm)	1703,6	1703,6
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	4,556	6,017
Produção de Sedimentos (ton)	0,068	2,336

Tabela 5.24 Resumo das médias anuais dos resultados para a Sub-Bacia 2 e 1 para o MDE ASTER

Média Anual	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 1
Precipitação (mm)	589,1	625,1
Escoamento Superficial (mm)	73,48	81,21
Fluxo Lateral (mm)	2,86	3,58
Total de Água que alcança o canal (mm)	74,72	83,94
REVAP (mm)	330,28	337,09
Evapotranspiração (mm)	183,9	182,5
Evapotranspiração Potencial (mm)	1703,6	1703,6
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	3,798	6,112
Produção de Sedimentos (ton)	0,1056	1,6

As figuras com as visualizações dos resultados são apresentadas entre as figuras 5.28 e 5.34 para os meses, entre 2004 e 2006, que proveram valores significativos dos processos hidrossedimentológicos, utilizando o MDE interpolado:

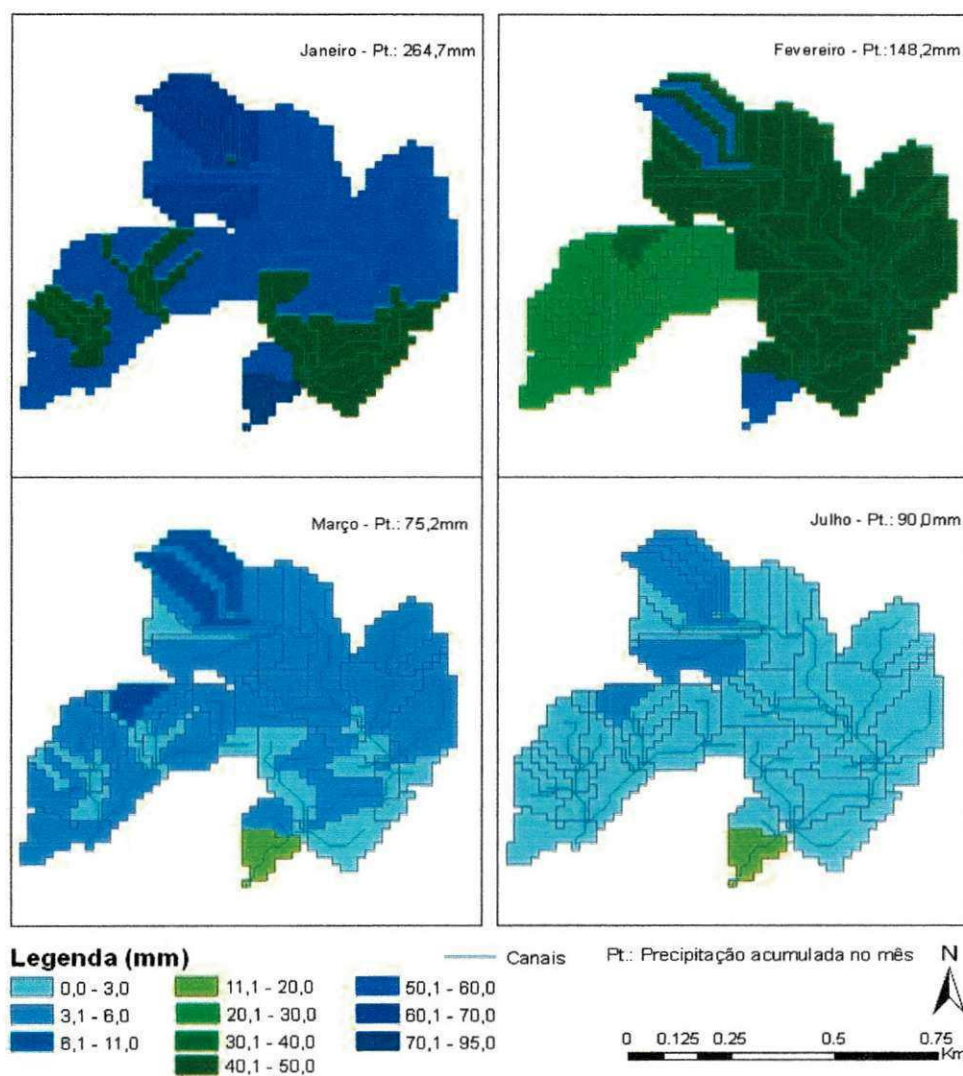


Figura 5.28 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2004 pelo MDE interpolado

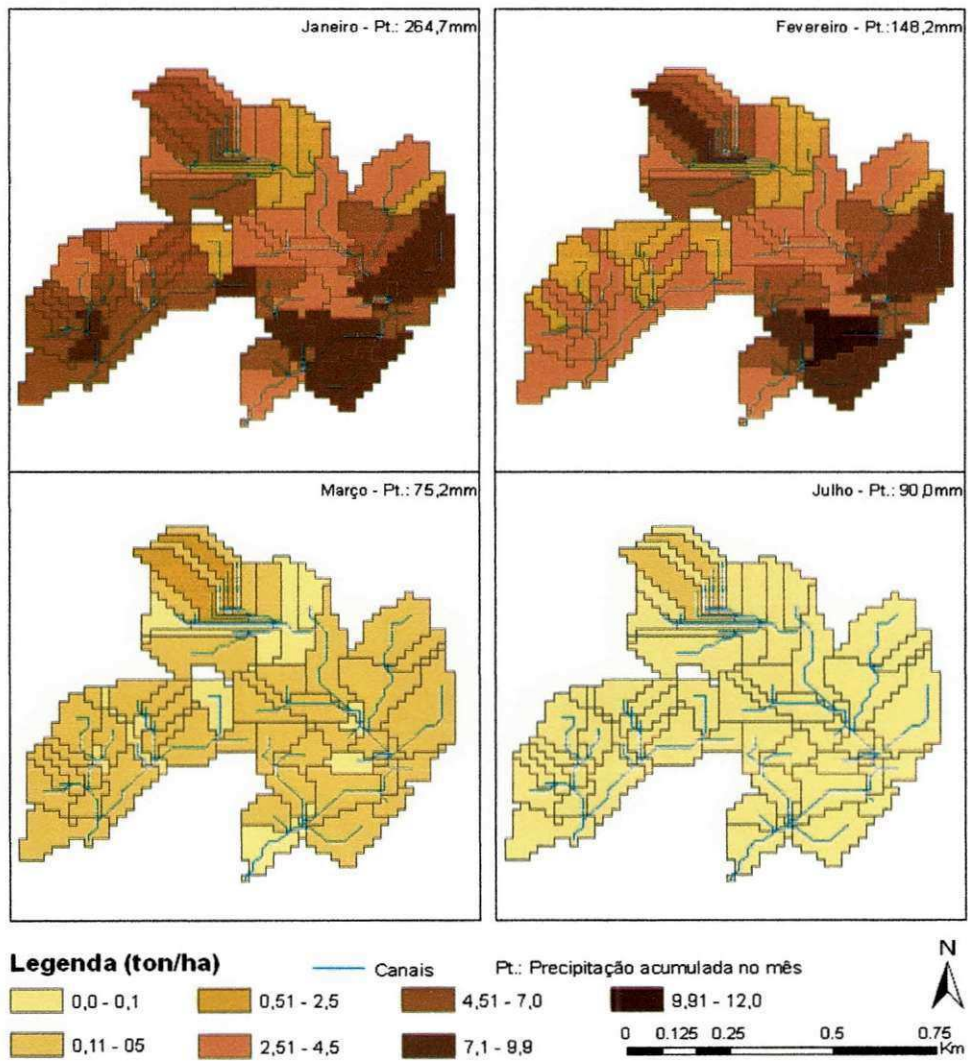


Figura 5.29 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2004 pelo MDE interpolado

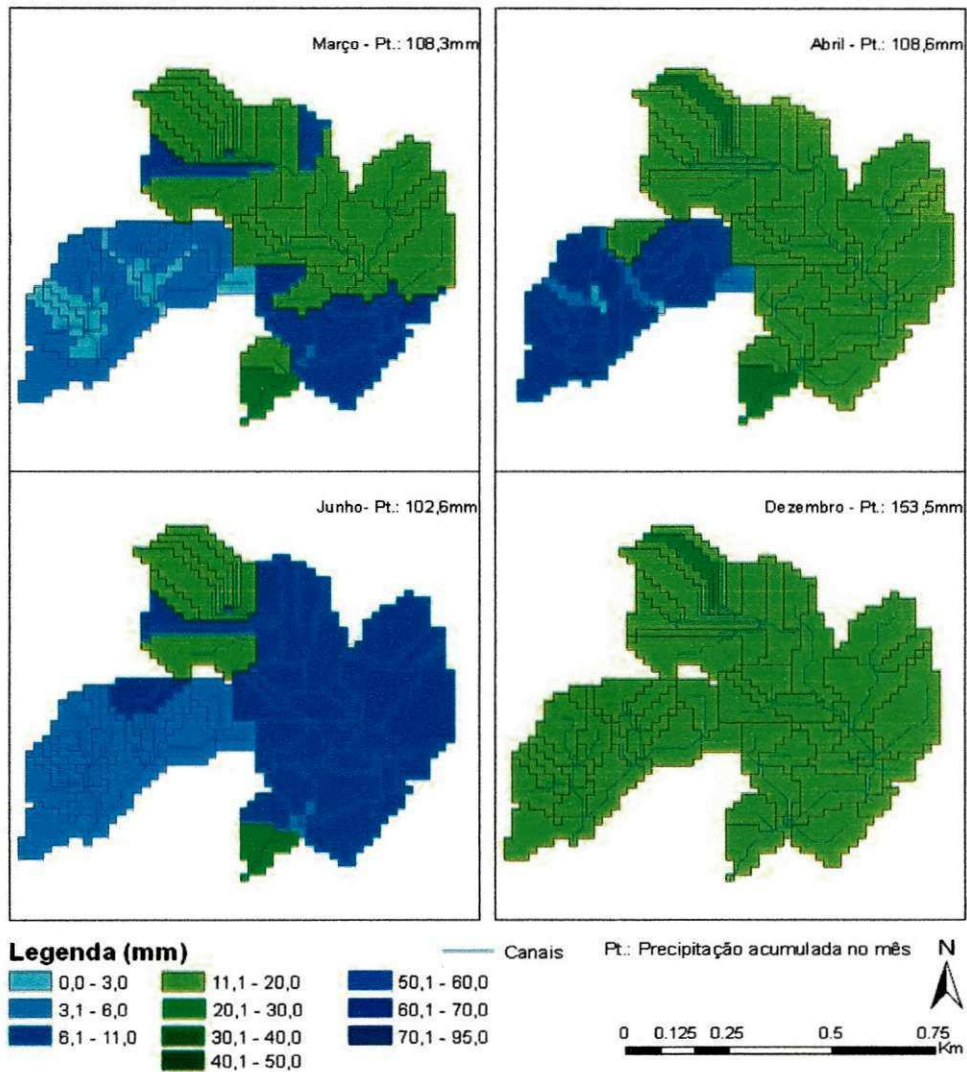


Figura 5.30 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2005 pelo MDE interpolado

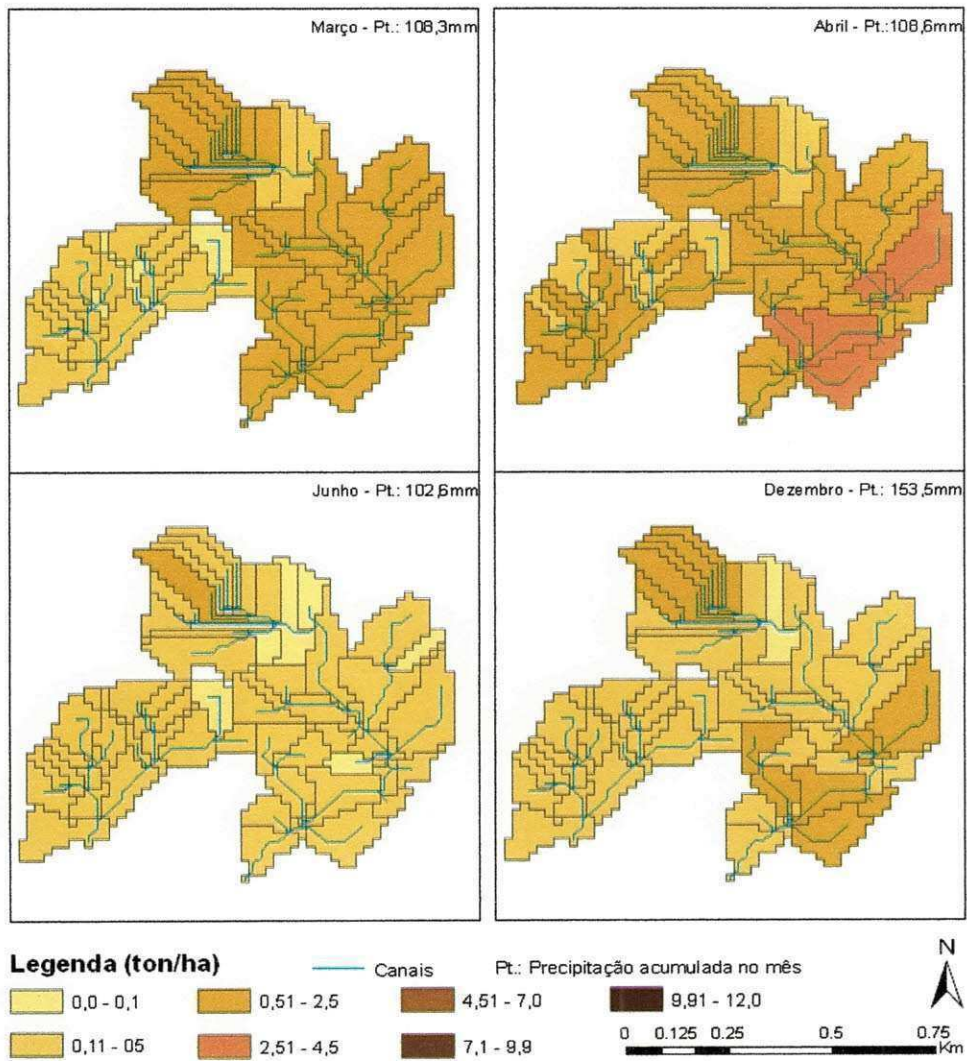


Figura 5.31 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2005 pelo MDE interpolado

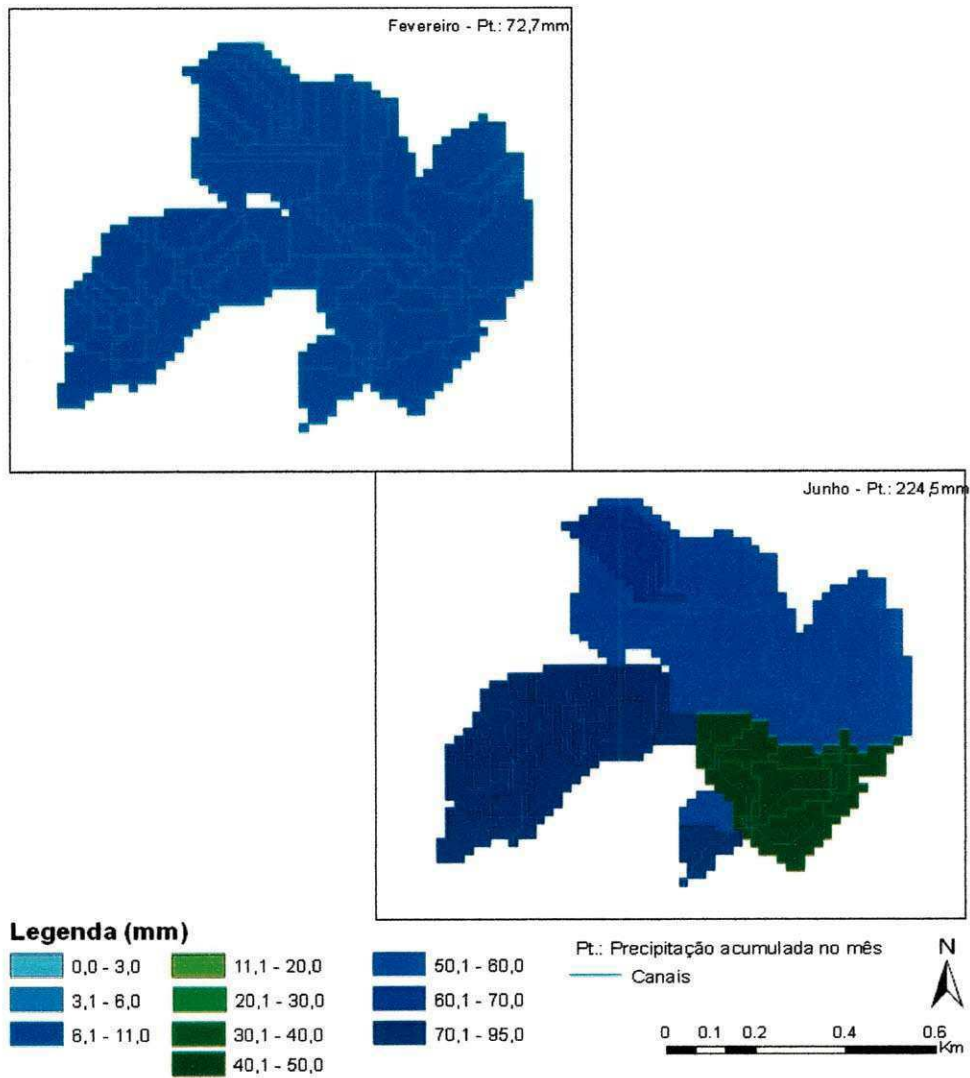


Figura 5.32 Mapa da geração de Escoamento Superficial para o ano de 2006 pelo MDE interpolado

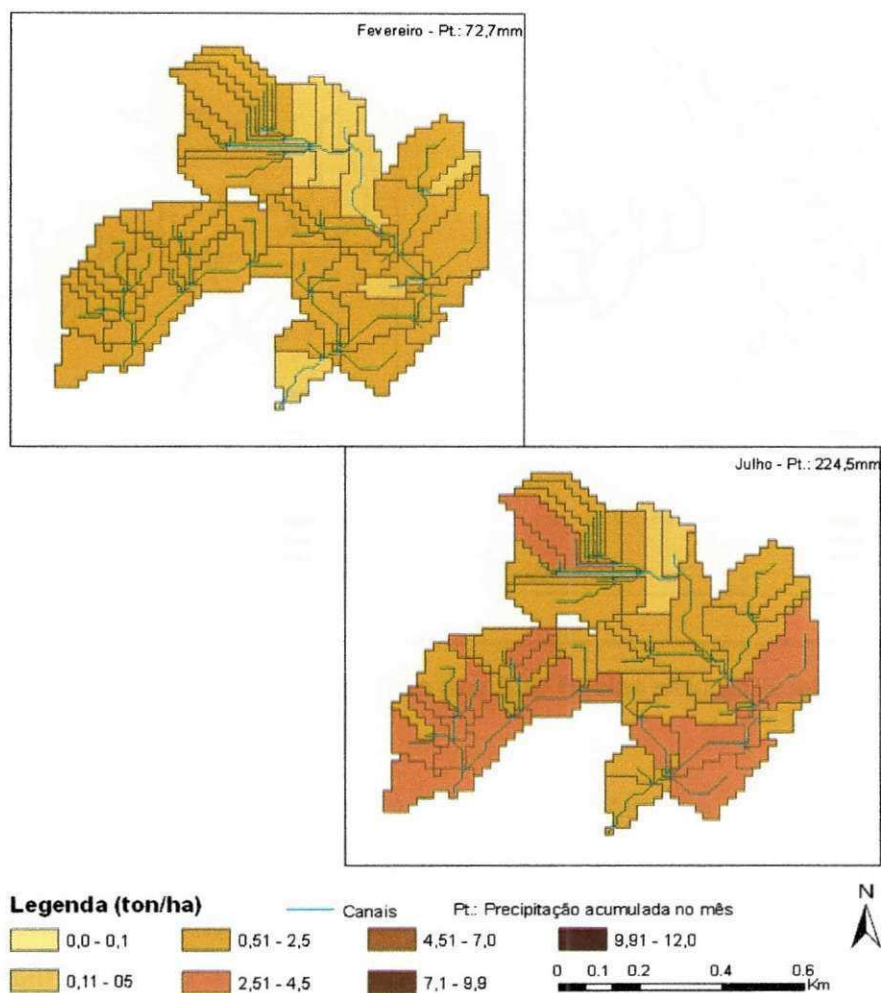


Figura 5.33 Mapa do aporte de Sedimentos para o ano de 2006 pelo MDE interpolado

Por fim, através da manipulação do arquivo que trata do fluxo nos canais, é possível a confecção de mapas que tratem dos resultados deste. Assim, foram criados mapas que tratam da fração de sedimentos que deposita por trecho de canal, conforme a figura 5.34, para o MDE interpolado e o ASTER.

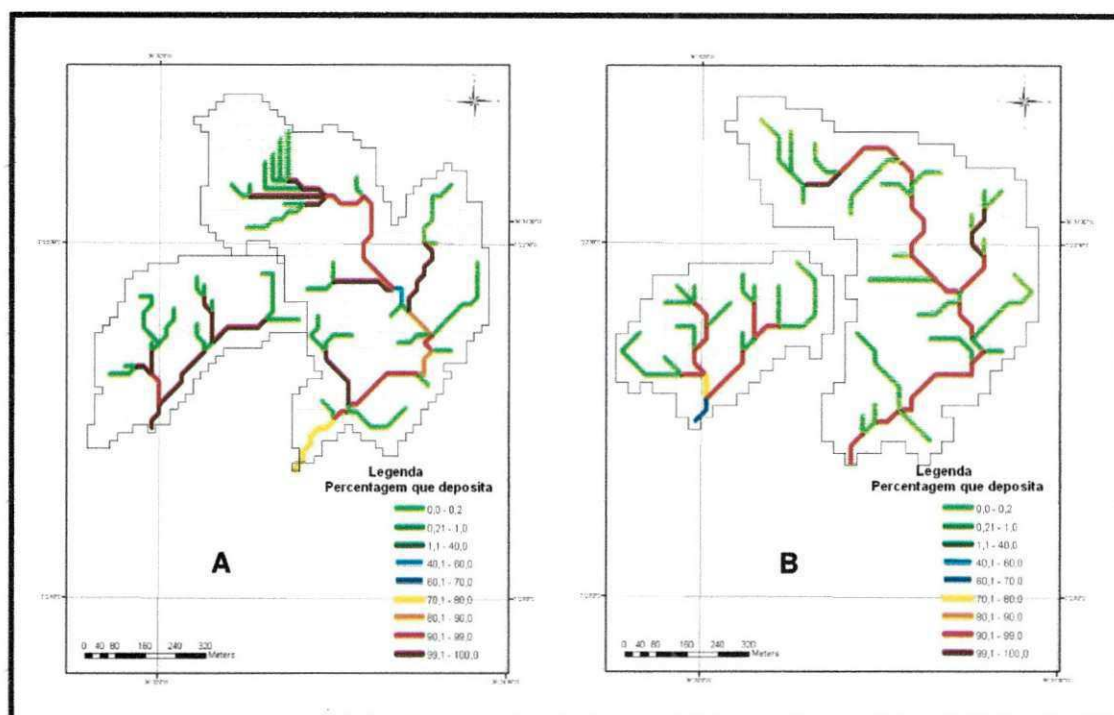


Figura 5.34 Mapa do assoreamento das Sub-Bacias pelo MDE interpolado

5.8 Cenário 1 – Condição Atual com a Presença de Açudes

Conforme enumerado anteriormente, o Cenário 1 consistiu na situação atual real da bacia com a presença dos açudes e o uso de solo reconhecido. As simulações iniciais foram feitas com os mesmos valores dos parâmetros das Sub-bacias.

Nas primeiras simulações foi percebido que os resultados para o escoamento superficial não ficaram próximo a realidade, com o uso direto dos parâmetros das sub-bacias, originando em valores muito alto do escoamento superficial. O mesmo pode ser dito com o aporte de sedimentos produzido, que apresentava um valor alto. Assim, o ajuste para estabelecer valores mais próximos do real foi através da mudança do valor do parâmetro CN, uma vez que apresenta-se sensível para a geração de escoamento superficial e também aporte de sedimentos (Lenhart, 2002). As sub-bacias foram inicialmente simuladas com o valor de CN em 80, e os outros valores utilizados para tentar obter melhores resultados foram os de 77 e 72. O valor de 77 foi encontrado no

trabalho de Neistch (2004), e corresponde a uma cobertura pobre de arbustos e gramas – arbustos sendo ao elemento principal.

O valor de 77 para o CN proveu resultados mais satisfatórios e realistas. Por este motivo as médias mensais e anuais apresentadas na forma de tabela tratam da exposição da simulação com esse valor de CN para os três períodos e ambos os MDEs. As tabelas 5.25 a 5.30 apresentam os resumos destes resultados.

Tabela 5.25 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006 pelo MDE interpolado para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	8,74	0,53	9,23	22,9	2,08	167,52
2	59,66	5,75	0,66	6,38	25,7	1,59	148,6
3	70,1	3,9	0,74	4,61	36,52	0,91	151,27
4	64,72	7,03	0,77	7,77	32,39	1,54	133,07
5	39,44	1,35	0,62	1,97	30,41	0,17	113,62
6	43,32	2,71	0,55	3,25	27,85	0,18	89,18
7	26,02	0,11	0,4	0,5	28,9	0	98,96
8	19,26	0,01	0,3	0,3	24,88	0	119,09
9	7,28	0	0,18	0,18	16,37	0	139,61
10	4,2	0,02	0,13	0,14	13,06	0	174,02
11	6,34	0,26	0,12	0,37	12,74	0	171,6
12	32,97	3,69	0,31	3,97	18,73	0,47	167,32

Tabela 5.26 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006 pelo MDE ASTER, para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	8,57	0,34	8,89	21,36	1,71	166,56
2	59,66	5,7	0,4	6,07	24,75	1,29	147,5
3	70,1	3,78	0,45	4,2	35,26	0,69	149,93
4	64,72	6,8	0,46	7,24	30,91	1,17	131,55
5	39,44	1,25	0,37	1,61	29,02	0,13	111,6
6	43,32	2,64	0,34	2,97	26,65	0,15	86,92
7	26,02	0,08	0,25	0,33	27,21	0	96,71
8	19,26	0,01	0,2	0,2	22,52	0	117,33
9	7,28	0	0,13	0,13	13,47	0	138,27
10	4,2	0,02	0,1	0,11	10,16	0	173,26
11	6,34	0,28	0,09	0,37	10,09	0	170,79
12	32,97	3,71	0,21	3,89	16,66	0,38	166,36

Tabela 5.27 Resumo das médias mensais para o ano de 1994 pelo MDE interpolado, para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	14,47	0,85	15,3	34,78	3,46	204,67
2	29,1	0	0,45	0,45	30,04	0	178,05
3	70,7	0	0,62	0,62	60,15	0	157,21
4	20,3	0	0,37	0,37	33,92	0	145,78
5	112,2	2,87	1,04	3,81	42,09	0,22	88,19
6	74,4	0,13	0,87	0,96	38,82	0	62
7	21,7	0	0,45	0,45	35,88	0	99,1
8	6,2	0	0,24	0,24	18,01	0	118,72
9	16,1	0	0,22	0,22	24,38	0	133,88
10	0	0	0,11	0,11	9,79	0	172,66
11	0	0	0,07	0,07	10,32	0	187,14
12	26,2	0	0,2	0,2	24,17	0	170,23

Tabela 5.28 Resumo das médias mensais para o ano de 1994 pelo MDE ASTER, para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	14	0,55	14,54	35,08	2,8	204,44
2	29,1	0	0,23	0,23	29,06	0	177,74
3	70,7	0	0,38	0,38	60,06	0	156,32
4	20,3	0	0,22	0,22	30,8	0	144,34
5	112,2	2,74	0,66	3,31	42,83	0,18	86,27
6	74,4	0,13	0,51	0,59	39,98	0	59,93
7	21,7	0	0,25	0,25	34,85	0	97,09
8	6,2	0	0,15	0,15	15,01	0	116,88
9	16,1	0	0,15	0,15	21,83	0	132,65
10	0	0	0,09	0,09	7,12	0	172,05
11	0	0	0,06	0,06	7,37	0	186,51
12	26,2	0	0,15	0,15	22,55	0	169,57

Tabela 5.29 Resumo das médias mensais para o ano de 2004 pelo MDE interpolado, para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	271,7	51,83	1,81	53,31	30,07	10,83	112,57
2	163,5	36,77	2,06	38,66	43,31	10,56	126,48
3	71	3,35	1,35	4,68	43,22	0,69	165,73
4	14,7	0	0,6	0,6	24,99	0	161,36
5	0	0	0,35	0,35	11,49	0	116,91
6	0	0	0,21	0,21	11,01	0	77,05
7	0	0	0,15	0,15	11,42	0	105,67
8	0	0	0,1	0,1	10,69	0	136,33
9	0	0	0,07	0,07	10,16	0	170,99
10	0	0	0,06	0,06	9,55	0	187,03
11	0	0	0,05	0,05	10,23	0	202,07
12	0	0	0,04	0,04	10,25	0	196,8

Tabela 5.30 Resumo das médias mensais para o ano de 2004 pelo MDE ASTER, para o cenário 1

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
1	271,7	51,22	1,2	52,07	30,18	8,1	111,22
2	163,5	37,47	1,14	38,41	46,57	8,88	125,75
3	71	3,17	0,74	3,9	42,64	0,54	164,51
4	14,7	0	0,35	0,35	22,04	0	160,6
5	0	0	0,23	0,23	8,32	0	114,42
6	0	0	0,16	0,16	7,84	0	73,79
7	0	0	0,12	0,12	8,15	0	102,84
8	0	0	0,09	0,09	7,66	0	134,52
9	0	0	0,07	0,07	7,27	0	170,11
10	0	0	0,06	0,06	6,78	0	186,72
11	0	0	0,05	0,05	7,2	0	201,75
12	0	0	0,04	0,04	7,2	0	196,35

Os resultados de médias anuais correspondentes estão agrupados na tabela 5.31.

Tabela 5.31 Resumos das médias anuais, simuladas para o cenário 1

Média Anual	Interpolado			ASTER		
	88-06	1994	2004	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	33,43	17,48	91,95	32,69	16,86	91,85
Fluxo Lateral (mm)	5,29	5,48	6,85	3,33	3,39	4,24
Total de Água que alcança o canal (mm)	38,53	22,79	98,28	35,86	20,12	95,55
REVAP (mm)	186,7	178,51	279,76	186,26	174,53	282,3
Evapotranspiração (mm)	289,8	361,3	226,4	267,4	345,6	201,8
Evapotranspiração Potencial (mm)	1670,1	1711,5	1759,0	1653,0	1697,7	1742,6
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	6,897	3,680	22,082	5,482	2,978	17,528
Produção de Sedimentos (ton)	15,68	4,68	41,04	32,86	10,2	98,76

Para compreender os efeitos dos reservatórios, precisa-se analisar os resultados referentes as rotinas no reservatórios, que são obtidas ou nas médias anuais ou em um

arquivo específico da simulação. Inicialmente apresentam-se os resultados das médias anuais na tabela 5.32.

Tabela 5.32 Desempenho anual médio da entrada e saída de água e sedimentos dos açudes

Média Anual	Interpolado			ASTER		
	88-06	1994	2004	88-06	1994	2004
Evaporação (mm)	19,333	15,047	24,807	17,81	13,348	24,098
Entrada de Água (mm)	34,703	12,828	100,336	27,586	10,075	83,696
Entrada de Sedimentos (ton/ha)	0,022	0,006	0,069	0,018	0,005	0,059
Saída de Água (mm)	23,190	0,0	80,879	16,74	0,0	62,384
Saída de Sedimentos (ton/ha)	0,001	0,0	0,005	0,001	0,0	0,002

A tabela 5.32 aponta uma maior entrada e saída de água para os açudes no caso do MDE interpolado. Isto é consequência direta da quantidade de água que alcança o canal neste MDE, conforme é possível observar na tabela 5.31.

A manipulação do arquivo de saída referente aos reservatórios permite fazer um acompanhamento da vazão que entra e sai, a carga de sedimentos que entra e sai, e o volume retido e o volume evaporado em cada reservatório ao fim do intervalo de tempo simulado. Assim, foi realizado o acompanhamento do volume total evaporado e volume do final do reservatório em cada mês para os açudes Roque e Bola I para os anos de 1994 e 2004. A tabela 5.33 mostra o volume inicial e final para cada reservatório e a tabela 5.34 expõe a situação crítica pelo qual os açudes passaram no início de 1999 devido à ausência de precipitações significativas nos anos de 1997 e 1998. Todos os resultados destas tabela foram da simulação pelo MDE interpolado.

Os resultados mostram o grande volume que se perde mensalmente nos açudes pela evaporação, que se dá na taxa potencial. O ano de 2004 chama atenção pela perda de volume em 45% para o Roque e em 40% para o Bola I apenas por evaporação. Trata-se de uma perda considerável para a região. Por outro lado, o ano de 1994, em que chuvas distribuídas ao longo de todo o ano, suas perdas foram bastante atenuadas devido a entrada do fluxo de água ao longo dos meses.

Tabela 5.33 Volumes armazenados e evaporados para os açudes Roque e Bola I estimados pelo MDE interpolado

Mês	1994				2004			
	Prec. (mm)		Roque	Bola I	Prec. (mm)		Roque	Bola I
1	117,3	Evaporação (m³)	3368	8652	271,70	Evaporação (m³)	2109	6956
		Volume (m³)	47830	133600		Volume (m³)	70000	314000
2	29,1	Evaporação (m³)	3925	7875	163,5	Evaporação (m³)	4198	13150
		Volume (m³)	46730	127800		Volume (m³)	70000	312400
3	70,7	Evaporação (m³)	3634	7231	71,0	Evaporação (m³)	5529	17360
		Volume (m³)	47850	125900		Volume (m³)	69300	304900
4	20,3	Evaporação (m³)	3476	6811	14,7	Evaporação (m³)	5212	15940
		Volume (m³)	46360	120600		Volume (m³)	67350	291400
5	112,2	Evaporação (m³)	2409	4599	0	Evaporação (m³)	3920	12610
		Volume (m³)	57550	130600		Volume (m³)	64660	278900
6	74,4	Evaporação (m³)	2014	3645	0	Evaporação (m³)	2701	9244
		Volume (m³)	62870	133500		Volume (m³)	62580	269700
7	21,7	Evaporação (m³)	3165	5297	0	Evaporação (m³)	3369	11060
		Volume (m³)	62640	130000		Volume (m³)	59460	258600
8	6,2	Evaporação (m³)	3640	5936	0	Evaporação (m³)	3912	12420
		Volume (m³)	60050	124500		Volume (m³)	55580	246200
9	16,1	Evaporação (m³)	3859	6153	0	Evaporação (m³)	4438	13930
		Volume (m³)	57440	119500		Volume (m³)	51140	232300
10	0	Evaporação (m³)	4589	7230	0	Evaporação (m³)	4424	14020
		Volume (m³)	52930	112300		Volume (m³)	46720	218300
11	0	Evaporação (m³)	4599	7382	0	Evaporação (m³)	4390	14280
		Volume (m³)	48330	104900		Volume (m³)	42330	204000
12	26,2	Evaporação (m³)	3908	6385	0	Evaporação (m³)	3925	13170
		Volume (m³)	45820	100100		Volume (m³)	38400	190800

No contexto de todo o período simulado, houve um ganho no volume para todos os açudes. A isto se atribui os anos de grande volume precipitado que aconteceram a partir de 2000. A tabela 5.34 apresenta os volumes inicial e final dos açudes para todo o período simulado, enquanto que a tabela 5.35 ilustra a recuperação dos açudes nos anos 1999 e 2000.

Tabela 5.34 Volume dos açudes entre o período de 1988 a 2006

Açudes	Volume Inicial	Volume Final
Bola III	10770	19640
Roque	46770	67620
Bola I	231400	275600
Luiz Heleno	44990	66030

Tabela 5.35 Volume dos açudes entre o período de 1999 a 2000

Açudes	Volume Inicial	Volume Final
Bola III	51,77	14290
Roque	12480	58850
Bola I	30980	177000
Luiz Heleno	6618	54580

5.9 Cenário 2 – Condição Atual Sem a Presença dos Açudes

As simulação da Bacia do Riacho dos Namorados sem a presença dos açudes visa justamente analisar a influência destes sobre geração de escoamento superficial e produção de sedimentos. Em uma próxima etapa serão investigadas a propagação do fluxo de água e de sedimentos. As tabelas 5.36 a 5.41 mostram os resultados obtidos para todo o período e os anos específicos de 1994 e 2004.

Tabela 5.36 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006 pelo MDE interpolado para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	9,32	0,43	9,71	14,46	2,17	164,5
2	59,66	6,12	0,56	6,65	18,01	1,66	145,14
3	70,1	4,15	0,63	4,75	28,82	0,95	147,02
4	64,72	7,48	0,66	8,12	24,88	1,61	128,26
5	39,44	1,45	0,56	2	22,65	0,17	107,24
6	43,32	2,88	0,49	3,36	20,57	0,19	82,03
7	26,02	0,12	0,37	0,48	21,22	0	91,86
8	19,26	0,01	0,28	0,28	17,02	0	113,54
9	7,28	0	0,18	0,18	7,91	0	135,38
10	4,2	0,02	0,13	0,14	4,08	0	171,62
11	6,34	0,28	0,11	0,38	3,76	0	169,04
12	32,97	3,93	0,26	4,15	10	0,49	164,28

Tabela 5.37 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006 pelo MDE ASTER para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	9,42	0,24	9,64	14,44	1,77	164,44
2	59,66	6,23	0,3	6,5	18,04	1,36	145,07
3	70,1	4,24	0,34	4,56	29,05	0,78	146,94
4	64,72	7,63	0,36	7,96	25,08	1,28	128,16
5	39,44	1,47	0,31	1,78	22,72	0,14	107,11
6	43,32	2,93	0,29	3,2	20,52	0,16	81,89
7	26,02	0,12	0,23	0,34	21,22	0	91,72
8	19,26	0,01	0,18	0,19	17,07	0	113,42
9	7,28	0	0,12	0,12	7,94	0	135,29
10	4,2	0,02	0,1	0,11	4,03	0	171,57
11	6,34	0,28	0,08	0,36	3,63	0	168,99
12	32,97	3,98	0,16	4,12	9,93	0,4	164,22

Tabela 5.38 Resumo das médias mensais para o ano de 1994 pelo MDE interpolado para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	15,46	0,63	16,07	26,99	3,62	203,95
2	29,1	0	0,42	0,42	23,05	0	177,07
3	70,7	0	0,52	0,52	54,91	0	154,4
4	20,3	0	0,34	0,34	26,06	0	141,23
5	112,2	3,08	0,84	3,81	36,58	0,23	82,14
6	74,4	0,14	0,76	0,85	34	0	55,47
7	21,7	0	0,44	0,44	29,17	0	92,76
8	6,2	0	0,25	0,25	9,43	0	112,92
9	16,1	0	0,2	0,2	17,03	0	129,98
10	0	0	0,12	0,12	0,99	0	170,74
11	0	0	0,08	0,08	0,84	0	185,14
12	26,2	0	0,17	0,17	16,42	0	168,15

Tabela 5.39 Resumo das médias mensais para o ano de 1994 pelo MDE ASTER para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	15,6	0,34	15,92	27,11	3,02	203,94
2	29,1	0	0,2	0,2	23	0	177,05
3	70,7	0	0,29	0,29	55,1	0	154,35
4	20,3	0	0,19	0,19	26,38	0	141,14
5	112,2	3,13	0,46	3,48	36,71	0,19	82,01
6	74,4	0,16	0,4	0,51	33,98	0	55,34
7	21,7	0	0,25	0,25	29,24	0	92,63
8	6,2	0	0,16	0,16	9,57	0	112,8
9	16,1	0	0,14	0,14	17,04	0	129,9
10	0	0	0,09	0,09	0,97	0	170,7
11	0	0	0,07	0,07	0,7	0	185,1
12	26,2	0	0,11	0,11	16,28	0	168,11

Tabela 5.40 Resumo das médias mensais para o ano de 2004 pelo MDE interpolado para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	271,7	55,22	1,34	56,2	23,85	11,31	108,31
2	163,5	39,21	1,78	40,81	38,62	11,03	124,17
3	71	3,51	1,23	4,72	35,46	0,72	161,88
4	14,7	0	0,61	0,61	17,32	0	158,97
5	0	0	0,36	0,36	1,26	0	109,06
6	0	0	0,22	0,22	0,91	0	66,74
7	0	0	0,15	0,15	0,98	0	96,74
8	0	0	0,11	0,11	1	0	130,61
9	0	0	0,08	0,08	0,87	0	168,2
10	0	0	0,06	0,06	0,75	0	186,07
11	0	0	0,05	0,05	0,75	0	201,07
12	0	0	0,04	0,04	0,73	0	195,4

Tabela 5.41 Resumo das médias mensais para o ano de 2004 MDE ASTER para o cenário 2

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	271,7	56,02	0,74	56,41	23,75	9,42	108,22
2	163,5	39,63	0,87	40,31	38,94	8,89	124,12
3	71	3,74	0,61	4,34	35,94	0,61	161,8
4	14,7	0	0,35	0,35	17,47	0	158,92
5	0	0	0,24	0,24	1,1	0	108,91
6	0	0	0,17	0,17	0,72	0	66,53
7	0	0	0,13	0,13	0,79	0	96,56
8	0	0	0,1	0,1	0,86	0	130,5
9	0	0	0,07	0,07	0,73	0	168,14
10	0	0	0,06	0,06	0,63	0	186,05
11	0	0	0,05	0,05	0,58	0	201,05
12	0	0	0,04	0,04	0,56	0	195,37

Os resultados a nível anual são exibidos na tabela 5.42.

Tabela 5.42 Resultados das médias anuais simuladas para o cenário 2

Média Anual	Interpolado			ASTER		
	88-06	1994	2004	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	35,6	18,68	97,94	36,18	18,88	99,38
Fluxo Lateral (mm)	4,64	4,75	6,04	2,7	2,71	3,44
Total de Água que alcança o canal (mm)	40,03	23,25	103,42	38,7	21,42	102,49
REVAP (mm)	200,56	191,65	300,38	199,4	191,09	300,38
Evapotranspiração (mm)	192,9	274,7	122,5	193,2	275,3	122,1
Evapotranspiração Potencial (mm)	1616,2	1667,8	1707,2	1615,1	1667,0	1706,2
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	7,211	3,853	23,062	5,864	3,216	18,921
Produção de Sedimentos (ton)	22,03	9,0	56,4	50,52	29,76	120,6

5.10 A Influência dos Açudes sobre o Escoamento e o Transporte de Sedimentos

Os açudes são reservatórios e como tal impedem o fluxo natural de água, e por consequência dos sedimentos. Sendo assim, investigou-se se o modelo SWAT seria sensível o bastante para estimar o efeito de açudes sobre o escoamento gerado e os sedimentos produzidos em uma pequena bacia, como na Bacia do Riacho dos Namorados. Para tal, recorreu-se aos arquivos de saída que tratam do fluxo ao longo do curso do Rio até seu exutório, e foi verificando os resultados de entrada e saída de água e sedimentos, bem como de geração de escoamento superficial e produção de sedimentos, das sub-bacias que drenam diretamente para o curso principal. Ou seja, fez-se o percurso da sub-bacia a montante do açude Roque até o exutório, exibindo a numeração de cada sub-bacia, sua área e o aporte de sedimentos simulados, bem como o volume e carga de sedimentos que entra e sai para cada trecho de rio contido nas sub-bacias, para ambos os MDE, com e sem açude, para os anos de 1994 e 2004, conforme as tabelas 5.43 a 5.46.

Tabela 5.43 Fluxo de água e sedimentos para Janeiro de 1994 pela simulação utilizando o MDE interpolado com a presença de açudes

Sub-Bacia	Área (ha)	Esc. Sup. (mm)	Valor Médio Diário		Aporte de Sedimentos (ton/ha)	Total Acumulado	
			Vazão que entra (m³/s)	Vazão que sai (m³/s)		Sed, que entra (ton)	Sed, que sai (ton)
16 (montante de 18)	0,92	28,144	0,007399	0,007392	4,303	30,68	1,003
18 (Roque)	0,8	20,634	0,01209	0,01208	3,398	4,372	1,63
Roque	-	-	0,01208	0	-	1,63	0
20 (jusante de Roque)	24,52	18,692	0,003428	0,003411	3,286	157,3	0,1062
26 (jusante de 20)	12,36	15,713	0,006658	0,006632	3,45	43,12	0,3414
31 (jusante de 26)	24,2	14,308	0,01123	0,01118	2,294	208,5	2,254
Bola I	-	-	0,01118	0	-	2,254	0
35 (jusante de Bola I)	4,6	14,797	0,005496	0,005474	3,49	17,56	1,323
36 (jusante de 35)	0,68	15,443	0,007563	0,007558	2,963	3,522	0,7678
38 (jusante de 36)	21,92	14,965	0,009529	0,009496	2,488	115	0,9848
47 (jusante de 38)	14,84	15,286	0,01239	0,01233	2,18	153	2,393
Luiz Heleno	-	-	0,01233	0	-	2,393	0
53 (jusante de LH)	11	15,363	0,001692	0,001687	3,664	83,25	0,1965
55 (jusante de 53)	32,92	14,381	0,004786	0,004709	4,219	186,9	0,4759
58 (jusante de 55)	4,4	14,73	0,005943	0,005925	2,578	73,33	1,408
63 (jusante de 58)	8,64	14,891	0,00751	0,007476	2,19	99,12	1,171
61 (jusante de 63)	0,44	13,992	2,32E-05	0,00002314	0,583	0,2564	0,2564
69 (jusante de 61)	26,04	15,581	0,0223	0,02215	3,736	187,5	5,179
66 (jusante de 69)	1,28	16,931	0,02363	0,02361	1,257	83,88	9,731
68 (jusante de 66)	2,96	17,209	0,02445	0,02441	0,575	42,33	7,434
71 (jusante de 68)	15,16	16,001	0,02825	0,02819	1,952	159,9	9,524
72 (jusante de 71)	1,64	21,378	0,0284	0,02837	0	9,524	4,292
Média		16,128	0,012	0,010	2,461	77,840	2,356

Tabela 5.44 Fluxo de água e sedimentos para Janeiro de 1994 pela simulação utilizando o MDE interpolado sem a presença de açudes

Sub-Bacia	Área (ha)	Esc. Sup. (mm)	Valor Médio Diário		Aporte de Sedimentos (ton/ha)	Total Acumulado	
			Vazão que entra (m³/s)	Vazão que sai (m³/s)		Sed. que entra (ton)	Sed. que sai (ton)
16 (montante de 18)	0,92	27,604	0,007397	0,00739	4,453	30,82	1,825
18 (jusante de 16)	0,8	20,083	0,01207	0,01207	3,99	4,844	1,627
20 (jusante de Roque)	24,52	18,692	0,01547	0,01544	3,286	161,2	0,8771
26 (jusante de 20)	12,36	15,737	0,01869	0,01866	3,464	44,07	1,362
31 (jusante de 26))	24,2	14,824	0,0232	0,02315	2,711	223,4	2,94
35 (jusante de Bola I)	4,6	14,828	0,03163	0,0316	3,523	22,06	15,43
36 (jusante de 35)	0,68	15,443	0,03369	0,03368	2,963	17,63	2,977
38 (jusante de 36)	21,92	15,16	0,03555	0,03552	2,942	127,2	3,187
47 (jusante de 38)	14,84	15,604	0,03825	0,03819	2,882	165,8	6,072
53 (jusante de LH)	11	15,363	0,03988	0,03986	3,664	89,33	16,31
55 (jusante de 53)	32,92	14,381	0,04296	0,04286	4,219	203	5,328
58 (jusante de 55)	4,4	14,73	0,04409	0,04408	2,578	78,19	26,19
63 (jusante de 58)	8,64	15,053	0,04563	0,04558	2,755	128,8	6,798
61 (jusante de 63)	0,44	14,31	2,37E-05	0,00002363	0,626	0,2756	0,2756
69 (jusante de 61)	26,04	15,656	0,06021	0,06008	4,903	228,7	20,13
66 (jusante de 69)	1,28	15,743	0,06147	0,06145	3,425	103,9	37,1
68 (jusante de 66)	2,96	16,092	0,06225	0,06221	1,937	73,73	26,73
71 (jusante de 68)	15,16	15,791	0,06587	0,06581	2,721	194,2	30,28
72 (jusante de 71)	1,64	15,731	0,06718	0,06715	0,613	81,88	7,69
Média		15,735	0,039	0,039	2,956	108,234	11,739

Tabela 5.45 Fluxo de água e sedimentos para Janeiro de 2004 pela simulação utilizando o MDE interpolado com a presença de açudes

Sub-Bacia	Área (ha)	Esc. Sup. (mm)	Valor Médio Diário		Aporte de Sedimentos (ton/ha)	Total Acumulado	
			Vazão que entra (m³/s)	Vazão que sai (m³/s)		Sed. que entra (ton)	Sed. que sai (ton)
16 (montante de 18)	0,92	83,313	0,02774	0,02773	10,331	83,51	4,981
18 (Roque)	0,8	58,606	0,04332	0,04331	8,127	14,12	8,859
Roque	-	-	0,04331	0,0311	-	8,859	0,457
20 (jusante de Roque)	24,52	59,916	0,04227	0,04225	8,839	446,8	2,41
26 (jusante de 20)	12,36	52,145	0,0534	0,05338	9,623	123,4	3,962
31 (jusante de 26)	24,2	60,912	0,07275	0,07271	8,918	799,1	11,26
Bola I	-	-	0,07271	0,01552	-	11,26	0,06779
35 (jusante de Bola I)	4,6	62,258	0,03576	0,03575	14,052	68,56	10,11
36 (jusante de 35)	0,68	47,036	0,04249	0,04248	7,981	16,21	2,91
38 (jusante de 36)	21,92	54,504	0,0498	0,04977	7,574	376,2	3,331
47 (jusante de 38)	14,84	52,243	0,05957	0,05953	6,424	441,2	12,35
Luiz Heleno	-	-	0,05953	0,04545	-	12,35	0,7288
53 (jusante de LH)	11	56,223	0,05187	0,05187	10,925	258,8	13,31
55 (jusante de 53)	32,92	59,088	0,06345	0,06341	14,861	643,4	10,32
58 (jusante de 55)	4,4	59,271	0,06876	0,06876	8,322	261,5	27,7
63 (jusante de 58)	8,64	55,165	0,07468	0,07466	6,024	308,1	16,1
61 (jusante de 63)	0,44	42,595	0,00007039	0,00007033	1,358	0,5975	0,5975
69 (jusante de 61)	26,04	53,203	0,1245	0,1244	10,689	549	33,43
66 (jusante de 69)	1,28	54,031	0,1289	0,1289	5,079	255,7	59,45
68 (jusante de 66)	2,96	47,04	0,1315	0,1315	2,277	174,6	45,42
71 (jusante de 68)	15,16	49,68	0,1434	0,1434	7,55	496,6	53,28
72 (jusante de 71)	1,64	60,355	0,1439	0,1438	0	53,28	15,26
Média		54,682	0,072	0,068	7,701	253,316	15,777

Tabela 5.46 Fluxo de água e sedimentos para Janeiro de 2004 pela simulação utilizando o MDE interpolado sem a presença de açudes

Sub-Bacia	Área (ha)	Esc. Sup. (mm)	Valor Médio Diário		Aporte de Sedimen- tos (ton/ha)	Total Acumulado	
			Vazão que entra (m³/s)	Vazão que sai (m³/s)		Sed. que entra (ton)	Sed. que entra (ton)
16 (montante de 18)	0,92	80,99	0,02773	0,02773	10,632	83,79	4,978
18 (jusante de 16)	0,8	55,264	0,04325	0,04325	9,42	15,14	8,835
20 (jusante de Roque)	24,52	59,916	0,05437	0,05435	8,839	461	3,386
26 (jusante de 20)	12,36	52,196	0,0655	0,06547	9,671	125	5,346
31 (jusante de 26))	24,2	59,909	0,08454	0,0845	10,458	852,6	14,34
35 (jusante de Bola I)	4,6	62,341	0,113	0,113	14,119	85,71	41,05
36 (jusante de 35)	0,68	47,036	0,1198	0,1198	7,981	47,15	12,13
38 (jusante de 36)	21,92	55,514	0,1269	0,1269	8,913	414,8	12,66
47 (jusante de 38)	14,84	53,756	0,1364	0,1363	8,376	480	29,55
53 (jusante de LH)	11	56,223	0,1427	0,1427	10,925	287,7	41,21
55 (jusante de 53)	32,92	59,088	0,1543	0,1543	14,861	671,3	24,03
58 (jusante de 55)	4,4	59,271	0,1596	0,1596	8,322	275,3	96,13
63 (jusante de 58)	8,64	54,937	0,1654	0,1654	7,602	390,1	36,29
61 (jusante de 63)	0,44	41,165	0,00006797	0,00006792	1,455	0,6403	0,6403
69 (jusante de 61)	26,04	52,93	0,2149	0,2148	13,917	667,9	51,06
66 (jusante de 69)	1,28	51,473	0,2192	0,2192	11,429	287,6	133,9
68 (jusante de 66)	2,96	48,044	0,2218	0,2217	6,095	260,4	68,42
71 (jusante de 68)	15,16	50,382	0,2333	0,2333	9,747	562,2	74,97
72 (jusante de 71)	1,64	51,659	0,2379	0,2378	1,907	219,3	32,34
Média		53,950	0,138	0,138	9,113	339,102	38,127

5.11 Cenário 3 – Simulação com Cobertura Vegetal Uniforme “Range-Brush”

Este cenário apresenta a área da Bacia do Riacho dos Namorados com toda a cobertura vegetal sendo “range brush”, visando as condições da bacia sem as interferências das ações do homem. A cobertura do solo “range brush” apresenta maior verossimilhança com a caatinga, com arbustos predominantes.

Os resultados das simulações, utilizando o MDE ASTER, com médias mensais e anuais, para os períodos simulados estão mostrados nas tabelas 5.47 a 5.50:

Tabela 5.47 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006, do cenário 3, utilizando o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	8,76	0,25	8,98	15,05	1,85	164,28
2	59,66	5,79	0,3	6,07	19,09	1,38	144,89
3	70,1	3,78	0,34	4,1	29,78	0,74	146,72
4	64,72	6,86	0,36	7,2	25,41	1,31	127,92
5	39,44	1,26	0,31	1,56	23,16	0,14	106,78
6	43,32	2,69	0,29	2,96	20,99	0,15	81,52
7	26,02	0,09	0,22	0,32	21,42	0	91,35
8	19,26	0,01	0,18	0,18	16,67	0	113,14
9	7,28	0	0,12	0,12	7,08	0	135,07
10	4,2	0,02	0,1	0,11	3,35	0	171,45
11	6,34	0,28	0,08	0,36	3,34	0	168,85
12	32,97	3,78	0,16	3,92	10,12	0,43	164,06

Tabela 5.48 Resumo das médias mensais para o ano de 1994, do cenário 3, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	14,17	0,35	14,5	29,29	2,95	203,9
2	29,1	0	0,2	0,2	23,96	0	177
3	70,7	0	0,29	0,29	56,98	0	154,2
4	20,3	0	0,19	0,19	24,95	0	140,9
5	112,2	2,75	0,46	3,13	38,92	0,19	81,7
6	74,4	0,1	0,4	0,46	36,27	0	55
7	21,7	0	0,24	0,24	29,97	0	92,3
8	6,2	0	0,16	0,16	8,5	0	112,5
9	16,1	0	0,14	0,14	16,28	0	129,7
10	0	0	0,09	0,09	0,41	0	170,6
11	0	0	0,06	0,07	0,26	0	185
12	26,2	0	0,11	0,11	16,78	0	168

Tabela 5.49 Resumo das médias mensais para o ano de 2004, do cenário 3, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
1	271,7	52,29	0,75	52,72	25,61	9,33	108
2	163,5	38,61	0,88	39,32	43,27	9,62	124
3	71	3,04	0,62	3,65	37,14	0,53	161,6
4	14,7	0	0,35	0,35	16,14	0	158,8
5	0	0	0,25	0,25	0,56	0	108,5
6	0	0	0,17	0,17	0,17	0	66
7	0	0	0,13	0,13	0,21	0	96,1
8	0	0	0,1	0,1	0,33	0	130,2
9	0	0	0,07	0,07	0,31	0	168
10	0	0	0,06	0,06	0,19	0	186
11	0	0	0,05	0,05	0,04	0	201
12	0	0	0,04	0,04	0	0	195,3

Tabela 5.50 Resumo da média anual para todos os períodos simulados do cenário 3 utilizando o MDE ASTER

Média Anual	ASTER		
	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	33,17	17,01	93,94
Fluxo Lateral (mm)	2,7	2,69	3,47
Total de Água que alcança o canal (mm)	35,73	19,57	96,92
REVAP (mm)	197,24	183,63	299,81
Evapotranspiração (mm)	195,0	281,7	124,0
Evapotranspiração Potencial (mm)	1612,3	1664,7	1703,5
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	5,966	3,135	19,481
Produção de Sedimentos (ton)	45,18	23,28	111,48

5.12 Cenário 4 – Simulação com a Bacia Coberta por Algaroba

Este cenário possui a situação hipotética de toda área estar coberta pela vegetação algaroba. Esta espécie, "*Prosopis Juliflora*", possui grande abrangência no nordeste brasileiro, em especial na Paraíba, devido a sua alta capacidade adaptativa às condições locais. Diante disto, um cenário coberto por tal espécie vegetal representaria a situação de reflorestamento da bacia.

O banco de dados da interface ArcSWAT possui as informações completas para a espécie "*Prosopis glandulosa*". Esta árvore pertence ao mesmo gênero da classificação biológica da algaroba e portanto foi utilizada para as simulações em analogia, de forma analisar somente os resultados perante os processos hidrológicos e de perda de solo.

Os resultados das simulações, fornecendo os valores médios mensais e anuais, para os períodos selecionados estão apresentados nas tabelas 5.51 a 5.54:

Tabela 5.51 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006, do cenário 4, utilizando o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	8,39	0,25	8,61	12,75	0,93	164,28
2	59,66	5,29	0,34	5,61	15,95	0,73	144,89
3	70,1	3,45	0,4	3,83	24,75	0,43	146,72
4	64,72	6,47	0,43	6,87	21,81	0,69	127,92
5	39,44	1,24	0,41	1,63	20,21	0,09	106,78
6	43,32	2,6	0,37	2,96	19,92	0,16	81,52
7	26,02	0,13	0,31	0,44	19,37	0	91,35
8	19,26	0,01	0,25	0,26	14,38	0	113,14
9	7,28	0	0,18	0,18	5,43	0	135,07
10	4,2	0,02	0,15	0,16	2,66	0	171,45
11	6,34	0,28	0,12	0,4	2,79	0,01	168,85
12	32,97	3,74	0,18	3,88	8,48	0,15	164,06

Tabela 5.52 Resumo das médias mensais para o ano de 1994, do cenário 4, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	13,62	0,25	13,86	24,02	2,02	203,9
2	29,1	0	0,27	0,27	22,05	0	177
3	70,7	0,02	0,34	0,35	48,18	0	154,2
4	20,3	0	0,27	0,27	19,73	0	140,9
5	112,2	2,14	0,52	2,63	35,06	0,11	81,7
6	74,4	0,14	0,51	0,6	35,92	0	55
7	21,7	0	0,36	0,36	26,18	0	92,3
8	6,2	0	0,24	0,24	6,71	0	112,5
9	16,1	0	0,2	0,2	14,55	0	129,7
10	0	0	0,14	0,14	0	0	170,6
11	0	0	0,1	0,1	0	0	185
12	26,2	0	0,14	0,14	14,52	0	168

Tabela 5.53 Resumo das médias mensais para o ano de 2004, do cenário 4, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	271,7	46,35	0,54	46,58	24,52	4,72	108
2	163,5	35,53	0,96	36,29	36,03	5,92	124
3	71	3,07	0,82	3,88	30,02	0,42	161,6
4	14,7	0	0,52	0,52	15	0	158,8
5	0	0	0,37	0,37	0	0	108,5
6	0	0	0,25	0,25	0	0	66
7	0	0	0,2	0,2	0	0	96,1
8	0	0	0,15	0,15	0	0	130,2
9	0	0	0,11	0,11	0	0	168
10	0	0	0,09	0,09	0	0	186
11	0	0	0,07	0,07	0	0	201
12	0	0	0,06	0,06	0	0	195,3

Tabela 5.54 Resumo da média anual para todos os períodos simulados do cenário 4 utilizando o MDE ASTER

Média Anual	ASTER		
	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	31,49	15,92	84,95
Fluxo Lateral (mm)	3,38	3,34	4,15
Total de Água que alcança o canal (mm)	34,7	19,15	88,58
REVAP (mm)	220,77	219,18	307,55
Evapotranspiração (mm)	168,1	246,2	105,6
Evapotranspiração Potencial (mm)	1612,3	1664,7	1703,5
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	3,167	2,132	11,061
Produção de Sedimentos (ton)	42,44	23,52	96,12

5.13 Cenário 5 – Simulação com o Plantio de Milho

O cultivo de milho muito presente na região foi abordado neste cenário, assumindo o cultivo deste em toda a bacia. Seguiu-se com as opções de “*default*” para o plantio e colheita desta cultura disponíveis no banco de dados da interface ArcSWAT.

Os resultados estão apresentados nas tabelas 5.55 a 5.58.

Tabela 5.55 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006, do cenário 5, utilizando o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	13,12	0,22	13,3	12,77	3,25	164,28
2	59,66	9,13	0,3	9,4	15,92	2,63	144,89
3	70,1	6,73	0,36	7,07	26,96	1,4	146,72
4	64,72	9,31	0,39	9,68	23,76	1,19	127,92
5	39,44	2,44	0,37	2,8	20,97	0,26	106,78
6	43,32	4,72	0,34	5,04	17,13	0,46	81,52
7	26,02	0,33	0,29	0,61	17,46	0,03	91,35
8	19,26	0,12	0,24	0,35	13,96	0,01	113,14
9	7,28	0,05	0,17	0,22	6,29	0	135,07
10	4,2	0,13	0,14	0,26	2,99	0,01	171,45
11	6,34	0,59	0,11	0,7	2,84	0,07	168,85
12	32,97	5,97	0,17	6,08	8,49	0,95	164,06

Tabela 5.56 Resumo das médias mensais para o ano de 1994, do cenário 5, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	23,75	0,22	23,95	24,04	5,62	203,9
2	29,1	0	0,24	0,24	22	0	177
3	70,7	0,05	0,32	0,36	52,17	0	154,2
4	20,3	0	0,26	0,26	19,06	0	140,9
5	112,2	5,87	0,47	6,27	40,72	0,45	81,7
6	74,4	1,02	0,49	1,38	28,1	0,04	55
7	21,7	0,01	0,36	0,37	24,49	0	92,3
8	6,2	0	0,24	0,24	8,33	0	112,5
9	16,1	0	0,2	0,2	13,34	0	129,7
10	0	0	0,14	0,14	0,42	0	170,6
11	0	0	0,1	0,1	0	0	185
12	26,2	0	0,14	0,14	14,53	0	168

Tabela 5.57 Resumo das médias mensais para o ano de 2004, do cenário 5, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	271,7	75,59	0,45	75,8	24,54	13,8	108
2	163,5	50,53	0,81	51,18	36,04	14,1	124
3	71	7,5	0,71	8,2	30,26	1,89	161,6
4	14,7	0	0,46	0,46	14,64	0	158,8
5	0	0	0,32	0,32	0	0	108,5
6	0	0	0,22	0,22	0	0	66
7	0	0	0,17	0,17	0	0	96,1
8	0	0	0,13	0,13	0	0	130,2
9	0	0	0,1	0,1	0	0	168
10	0	0	0,08	0,08	0	0	186
11	0	0	0,06	0,06	0	0	201
12	0	0	0,05	0,05	0	0	195,3

Tabela 5.58 Média Anual para todos os períodos simulados do cenário 5 utilizando o MDE ASTER

Média Anual	ASTER		
	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	52,39	30,71	133,63
Fluxo Lateral (mm)	3,11	3,16	3,57
Total de Água que alcança o canal (mm)	55,27	33,63	136,77
REVAP (mm)	204,01	204,38	278,48
Evapotranspiração (mm)	169,1	246,4	105,5
Evapotranspiração Potencial (mm)	1612,3	1664,7	1703,5
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	10,183	6,113	29,787
Produção de Sedimentos (ton)	76,3	35,04	179,64

5.14 Cenário 6 – Simulação da Condição da Bacia Totalmente Desmatada

O último cenário analisado trata da bacia sem cobertura vegetal, com o solo exposto. Para tal, utilizou-se diretamente uma função da interface ArcSWAT que

promove a simulação com o solo exposto, a partir do cenário de cultivo de milho. Os cenários são conforme o esperado, altíssimos valores de escoamento superficial e aporte de sedimentos, conforme as tabelas 5.59 a 5.62.

Tabela 5.59 Resumo das médias mensais para o período entre 1988 a 2006, do cenário 6, utilizando o MDE ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	60,01	13,77	0,22	13,95	15,1	3,87	164,28
2	59,66	9,86	0,26	10,09	18,73	3,09	144,89
3	70,1	7,97	0,3	8,25	26,83	2,65	146,72
4	64,72	12,55	0,31	12,83	23,79	4,87	127,92
5	39,44	3,1	0,28	3,36	22,05	1,18	106,78
6	43,32	4,67	0,26	4,91	21,32	1,73	81,52
7	26,02	0,31	0,21	0,51	20,34	0,07	91,35
8	19,26	0,11	0,17	0,27	16,01	0,02	113,14
9	7,28	0,01	0,12	0,12	7,61	0	135,07
10	4,2	0,13	0,09	0,22	3,74	0,01	171,45
11	6,34	0,59	0,08	0,66	3,49	0,09	168,85
12	32,97	6,05	0,14	6,14	10,22	1,37	164,06

Tabela 5.60 Resumo das médias mensais para o ano de 1994, do cenário 6, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapo-transpiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapo-transpiração Potencial (mm)
1	117,3	25,6	0,29	25,87	29,27	6,26	203,9
2	29,1	0	0,18	0,18	23,59	0	177
3	70,7	0	0,28	0,28	50,01	0	154,2
4	20,3	0	0,19	0,19	23,29	0	140,9
5	112,2	7,57	0,45	7,9	36,28	2,32	81,7
6	74,4	0,84	0,39	1,11	36,15	0,17	55
7	21,7	0	0,24	0,24	28,48	0	92,3
8	6,2	0	0,16	0,16	8,91	0	112,5
9	16,1	0	0,14	0,14	16,19	0	129,7
10	0	0	0,09	0,09	0,9	0	170,6
11	0	0	0,06	0,06	0,37	0	185
12	26,2	0	0,11	0,11	16,89	0	168

Tabela 5.61 Resumo das médias mensais para o ano de 2004, do cenário 6, utilizando a ASTER

Mês	Precipitação total mensal (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Fluxo Lateral (mm)	Água que alcança o canal no trecho (mm)	Evapotranspiração (mm)	Aporte de Sedimentos (ton/hectare)	Evapotranspiração Potencial (mm)
1	271,7	82,68	0,65	82,99	25,67	17,35	108
2	163,5	53,16	0,73	53,71	42,98	16,56	124
3	71	8,19	0,51	8,7	34,27	2,56	161,6
4	14,7	0	0,3	0,31	15,32	0	158,8
5	0	0	0,21	0,21	1,87	0	108,5
6	0	0	0,15	0,15	0,17	0	66
7	0	0	0,11	0,11	0,23	0	96,1
8	0	0	0,09	0,09	0,27	0	130,2
9	0	0	0,06	0,06	0,29	0	168
10	0	0	0,05	0,05	0,28	0	186
11	0	0	0,04	0,04	0,26	0	201
12	0	0	0,03	0,03	0,22	0	195,3

Tabela 5.62 Resumo da média anual para todos os períodos simulados do cenário 6 utilizando o MDE ASTER

Média Anual	ASTER		
	88-06	1994	2004
Precipitação (mm)	431,8	493,2	520,9
Escoamento Superficial (mm)	58,86	34,01	144,03
Fluxo Lateral (mm)	2,42	2,59	2,94
Total de Água que alcança o canal (mm)	61,05	36,33	146,46
REVAP (mm)	180,06	17862	252,23
Evapotranspiração (mm)	188,8	269,5	121,8
Evapotranspiração Potencial (mm)	1612,3	1664,7	1703,5
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	18,889	8,748	36,476
Produção de Sedimentos (ton)	82,44	43,8	216,0

CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No capítulo 5 foram explicadas as diversas etapas de aplicação do modelo SWAT para a Bacia do Riacho dos Namorados. Os resultados obtidos em cada etapa apresentada no capítulo anterior serão discutidos a seguir.

6.1 Delimitação das Bacias

O processo de delimitação das Sub-Bacias e da Bacia do Riacho dos Namorados foram bastante satisfatórios.

As sub-bacias foram bem representadas, apesar da resolução dos MDEs. A delimitação efetuada pelo MDE interpolado nas Sub-Bacias 1 e 2 foi bastante satisfatória, uma vez que foi reconhecido um divisor topográfico entre os dois. Este divisor não foi visto pelo MDE ASTER, na qual a delimitação apresentou um espaço vazio entre as Sub-Bacias.

As características mostradas na tabela 5.4 apresentaram as dimensões dos canais para as delimitações com ambos os MDEs, para a Sub-Bacia 2 (para a Sub-Bacia 1 e a Bacia Riacho dos Namorados as dimensões encontram-se no Anexo 1). Mesmo não sendo possível fazer uma comparação por sub-bacia delimitada, uma vez que a numeração não representa necessariamente a mesma área para as duas delimitações, percebe-se que há valores semelhantes obtidos com ambos os MDEs. A largura e profundidade média dos trechos possuem valores bastante próximos entre os MDEs - inclusive com o mesmo valor para o canal do exutório. Por outro lado, as declividades mostraram maiores diferenças, com a delimitação com o MDE interpolado originando três canais com declividade superior a 0,070 – o que não ocorreu com a delimitação com o MDE ASTER. Esta diferença é resultado dos processos de obtenção do MDE e influenciam diretamente na capacidade de transporte dos canais.

Na delimitação da Bacia do Riacho dos Namorados o que se percebe é a influência dos açudes no processo, prejudicando a aquisição de pontos cotados pela interface para uma melhor definição no processo de delimitação. Trata-se de algo que precisa ser melhor estudado para bacias maiores.

A atividade de correção pixel a pixel dos MDEs não foi efetuado por se entender que se trata de algo bastante específico, que não está dentro dos objetivos deste trabalho.

6.2 Escoamento Superficial para as Sub-Bacias 2 e 1

Como primeiros resultados na aplicação do modelo SWAT, os dados de campo forneceram os melhores resultados na Sub-Bacia 2. Este fato destaca a necessidade da aquisição de dados de solo no campo, evitando a atribuição da textura de solo a partir de documentos regionais que extrapolam algumas informações. Sendo assim, é vital a atenção quando houver simulação para grandes bacias para que haja coleta de dados de solo em todas as áreas significativas e um mapeamento do solo o mais detalhado possível.

A tabela 5.10 expõe o desempenho do modelo para diferentes situações, na Sub-Bacia 2. Acontece que a inclusão de 31 eventos de chuva que não geraram escoamento distorcia os coeficientes de desempenho. Nestes eventos notou-se também grande influência de um evento singular sobre o coeficiente de Nash e R^2 . A retirada destes eventos das análises resultaram em uma avaliação mais satisfatória do modelo.

As figuras, 5.22 a 5.25, em que os citados eventos foram excluídos, parecem indicar que o modelo SWAT tende a subestimar a maioria dos eventos, e em diversos casos o modelo não gerou escoamento para lâminas observadas de até 5 mm. A subestimação das lâminas escoadas também foi verificada por Uzeika (2009) na aplicação em uma pequena bacia. Esses resultados podem ser atribuídos ao uso do

Método Curva-Número para estimativa do escoamento superficial, uma vez que este trabalha diretamente com o volume diário precipitado – desconsiderando a intensidade e duração da chuva diária.

A importância da averiguação dos dados, observados e simulados, fica mais evidente na simulação da Sub-Bacia 1. A tabela 5.14 apresenta o desempenho do modelo com a simulação de todos os eventos, resultando em um péssimo coeficiente de Nash e apenas um valor razoável de R^2 . Contudo, já na tabela 5.15, com a exclusão de eventos sem lâmina e dois eventos singulares, o desempenho do modelo tem uma melhora muito significativa, e o coeficiente de Nash foi de 0,699.

As tabelas 5.11 e 5.16 indicam uma convergência dos resultados para longos períodos de simulação, de modo que o total simulado aproxima-se do total observado. Esta análise denota, em primeira estância, um melhor desempenho do modelo SWAT quando se trata de longos períodos. Isto indica a possibilidade de uso do modelo para fins de planejamento para médio e longo prazo.

O modelo SWAT não proporciona uma calibração evento a evento, e mesmo a análise de seu desempenho na escala de tempo diário não é bastante vista na literatura. Observa-se na literatura o vasto uso do modelo SWAT para a escala de tempo mensal (Gassman, 2007; Sudheer, 2007). No Brasil, os trabalhos de Uzeika (2009), Moro (2005), Baldissera (2005) e Marchioro (2008) utilizaram o modelo SWAT na escala de tempo mensal.

O desempenho do modelo SWAT para a geração do escoamento superficial mostra que uma parametrização adequada dos seus principais componentes, como dados de solo e da cobertura do solo, fornece bons resultados. A influência do terceiro componente, dados topográficos obtidos a partir do MDE, mostrou-se muito pequena na geração do escoamento superficial. Este fato possui grande importância, uma vez que mostra através da comparação de eventos observados e simulados, que um MDE originado por sensoriamento remoto, aplicado ao modelo SWAT, gera resultados bem similares a um MDE gerado com dados de campo. O MDE ASTER é de grande utilidade em bacias sem dados topográficos de campo.

O uso direto do banco de dados de culturas da interface ArcSWAT proveu bons resultados para a estimativa do fluxo superficial pelo modelo SWAT. As pequenas

modificações realizadas em alguns parâmetros nos bancos de dados das culturas foram naqueles parâmetros que, de acordo com a literatura, possuem uma maior influência da geração do escoamento superficial e aporte de sedimentos.

6.3 Aporte e Produção de Sedimentos para as Sub-Bacias 2 e 1

Os resultados apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13, para Sub-Bacia 2, e 5.17 e 5.18, para a Sub-Bacia 1, levam à constatação de que o modelo SWAT não respondeu bem no aporte de sedimentos, incluindo alguns eventos de aporte nulo devido a não geração de escoamento superficial. Sendo assim, enfatiza-se a subestimativa do modelo na geração do escoamento superficial, denotando a possibilidade de falhas.

De uma maneira geral, a averiguação direta da produção de sedimentos, valor efetivamente observado no exutório, fica bastante comprometida. Os resultados são bastantes variados, com raras exceções verificou-se uma entrada de sedimentos, na bacia do exutório, próximo do valor observado. Assim, a averiguação desses resultados fica bastante difícil e complicada.

A análise do aporte de sedimentos indica uma superestimativa na simulação frente aos dados de campo em todas as simulações. Esta aparente discordância denota uma deficiência nos dados de campo, bem como uma possível sensibilidade do modelo em simular os processos hidrossedimentológico na superfície da bacia. Neste ponto, é interessante a constatação de que o aporte de sedimentos para os diferentes MDEs, nas Sub-Bacias 1 e 2, foram bastante próximos conforme tabela 5.23 e 5.24. Este fato enaltece a consonância dos MDEs para o aporte de sedimentos simulados pelo modelo SWAT em pequenas bacias.

Por outro lado, os dados apresentados nas tabelas 5.12 e 5.13, para a Sub-Bacia 2, mostram que quase a totalidade dos sedimentos que entram o canal da sub-unidade do exutório se deposita. Isto permite a constatação de que o processo de deposição é característico deste trecho. Observando a soma de todos os eventos, verifica-se que

99,4% dos sedimentos foram depositados no caso do MDE interpolado, enquanto que no MDE ASTER este valor é de 96,7%. Trata-se de um resultado alarmante quanto ao assoreamento deste trecho que não se verifica em campo e denota um resultado insatisfatório pelo modelo. Enquanto que na Sub-Bacia 1, o processo de assoreamento no exutório não se mostra tão intenso quanto no caso da Sub-Bacia 2.

Uma análise da tabela 6.1, a seguir, em conjunto com a tabela 5.4 permite verificar o processo de transporte de sedimentos erodido. Com tabela 6.1 torna-se possível acompanhar a vazão líquida e a carga de sedimentos que entra e sai em cada trecho dos canais, na Sub-Bacia 2, utilizando ambos os MDEs.

Tabela 6.1 Fluxo de água e carga de sedimentos nos trechos de rio da Sub-Bacia 2 para o evento do dia 04/02/2004 com 49,3mm de chuva

Sub- Unidade	MDE Interpolado				MDE ASTER			
	Fluxo médio que entra (m ³ /s)	Fluxo médio que sai (m ³ /s)	Sedimento que entra (ton)	Sedimento que sai (ton)	Fluxo médio que entra (m ³ /s)	Fluxo médio que sai (m ³ /s)	Sedimento que entra (ton)	Sedimento que sai (ton)
1	0,0026	0,0026	1,0500	1,0500	0,0011	0,0011	0,1702	0,1702
2	0,0013	0,0013	0,7050	0,7050	0,0011	0,0011	0,1984	0,1984
3	0,0044	0,0044	1,9180	0,0032	0,0013	0,0013	0,5591	0,5591
4	0,0013	0,0013	0,8656	0,8656	0,0016	0,0016	1,2860	1,2860
5	0,0026	0,0026	0,6467	0,6467	0,0011	0,0011	1,0020	1,0020
6	0,0016	0,0016	1,1950	1,1950	0,0044	0,0044	1,4240	0,0032
7	0,0032	0,0032	1,4710	1,4710	0,0016	0,0016	0,6842	0,6842
8	0,0023	0,0023	1,3740	1,3740	0,0017	0,0017	1,0140	1,0140
9	0,0071	0,0071	1,5780	0,0049	0,0062	0,0062	4,4620	4,4620
10	0,0077	0,0077	4,0770	0,0054	0,0040	0,0040	2,9210	0,0027
11	0,0009	0,0009	0,5998	0,5998	0,0088	0,0088	5,8040	0,0066
12	0,0005	0,0005	0,3527	0,3527	0,0020	0,0020	0,8366	0,8366
13	0,0012	0,0012	0,5478	0,5478	0,0069	0,0069	1,1130	0,0036
14	0,0003	0,0003	0,1857	0,1857	0,0009	0,0009	0,3285	0,3285
15	0,0010	0,0010	0,5282	0,5282	0,0007	0,0007	0,2475	0,2475
16	0,0023	0,0023	1,2720	1,2720	0,0047	0,0047	1,0470	1,0470
17	0,0045	0,0045	2,7000	0,0039	0,0011	0,0011	0,2609	0,2609
18	0,0076	0,0076	4,3710	0,0070	0,0067	0,0067	1,8250	0,0058
19	0,0135	0,0135	1,1330	0,0123	0,0098	0,0098	1,3950	0,0088
20	0,0199	0,0199	2,9800	0,0147	0,0173	0,0173	0,4632	0,0118
21	0,0379	0,0379	2,4600	0,0181	0,0184	0,0184	1,7000	0,0089
22					0,0375	0,0375	0,7464	0,0292

A tabela 6.1 permite a constatação de que, efetivamente, as conformações do relevo influenciam bastante na entrega de sedimentos no exutório – enquanto que a

vazão líquida apresenta-se menos sensível, mesmo a vazão no exutório, que foi objeto de avaliação do desempenho do modelo, oferecendo resultados satisfatórios. O que acontece é que a propagação de sedimentos é função direta da capacidade de transporte, sendo esta bastante influenciada pelas dimensões e a declividade do canal. Conforme a discussão referente à tabela 5.4, o que se observa é uma diferença mais significativa na declividade obtida para a delimitação com os dois MDEs. Esta diferença reflete diretamente na propagação dos sedimentos.

O aporte de sedimentos de uma sub-bacia é originado a partir da soma de todas as estimativas calculados no âmbito da Unidade de Resposta Hidrológica. Em seguida o modelo SWAT considera que toda essa carga alcançará o trecho de rio de curso de drenagem referida sub-bacia. O modelo também permite a estimativa dos processos de erosão e deposição na calha fluvial, contudo o que se observa na tabela 6.1 é que a erosão do leito não acontece – haja vista que não há saída de sedimentos maior que a entrada – e que existe um processo acentuado de assoreamento em alguns trechos, especialmente na calha fluvial principal, que pode ser observado na análise da figura 5.34 (A). Este fato também é verificado no MDE ASTER, figura 5.34 (B), o que pode indicar uma limitação do modelo SWAT e necessita de futuros estudos.

Por fim, o processo hidrossedimentológico simulado pelo SWAT precisa de maiores verificações no campo. O aporte de sedimentos mostrou uma semelhança entre os MDEs, conforme as tabelas 5.23 e 5.24, evidenciando a consistência do modelo para a investigação de bacias maiores. Contudo, a entrega de sedimentos, sendo uma função da capacidade de transporte na calha fluvial, é altamente sensível ao MDE utilizado, de modo que precisa ser mais investigada, para que se torne possível uma confiança maior nos resultados obtidos.

6.4 As médias anuais e distribuição espacial do escoamento e erosão nas Sub-Bacias

Os resumos mensais e anuais fornecem diretamente resultados médios dos processos simulados nas URH. O aspecto principal destes resumos é facilitar a comparação dos resultados para os diferentes MDEs.

As tabelas 5.19 a 5.22, de resultados mensais, atentam para uma aparente falha no fechamento do balanço hídrico. Isto na verdade não acontece, pois o SWAT simula um processo denominado por "REVAP", no qual a água é captada pelas raízes das plantas ou ascendem novamente a zona insaturada proporcionando nova retirada da demanda evaporativa. As tabelas 5.23 e 5.24, com os resultados anuais, já incluem este processo e o balanço hídrico é verificado corretamente.

A geração de escoamento superficial possui uma diferença ínfima entre os MDEs, enquanto que o fluxo lateral apresenta uma diferença significativa, no qual o interpolado gera uma lâmina maior. Este fato pode estar diretamente relacionado à própria resolução do MDE, pois a declividade é a variável que difere na aplicação da equação (3.33), e na geração do número de URH para a simulação

O aporte de sedimentos para a Sub-Bacia 2 tem uma maior diferença entre os dois MDEs simulados, com cerca de 700 quilogramas por hectare, enquanto que na Sub-Bacia 1 a diferença é de 100 kg/ha. Muito desta diferença pode ser atribuída a variações da declividade entre os dois MDEs, haja vista que o ASTER reconheceu aproximadamente 78% da área da Sub-Bacia 2 com declividade inferior a 8%, ao passo que o MDE interpolado constatou quase 58% de sua área com declividades inferior a 8%.

Na Sub-Bacia 2, para os três anos simulados, o MDE interpolado resultou em uma média anual de aporte de sedimentos em 4,556 ton/ha, o que promove uma perda de solo da ordem de 0,27 mm/ano. A simulação pelo ASTER acarreta em uma perda de solo de aproximadamente 0,23 mm/ano devido à estimativa de produção anual em 3,796 ton/ha.

Enquanto que na Sub-Bacia 1 os resultados da simulação mostram uma carga de sedimento que alcança os canais da ordem de 6,02 ton/ha/ano para o MDE interpolado e 6,112 ton/ha/ano para o MDE ASTER. Trata-se de uma perda de solo de aproximadamente 0,37 mm por ano para ambas as estimativas.

A variação espacial da produção de escoamento e produção de sedimentos pela Sub-Bacias 2 e 1 seguem uma tendência bastante semelhante. O destaque de algumas áreas no escoamento superficial se dá pela presença de afloramento rochoso ou cultivo de milho. E as zonas que apresentam um maior aporte de sedimentos possuem maiores declividades ou têm o cultivo de milho. Para o MDE interpolado estes aspectos serão discutidos com maiores detalhes.

O afloramento rochoso ocupando cerca de 25% da área da primeira sub-bacia da Sub-Bacia 2, promove uma maior geração de escoamento superficial – conforme podemos observar nos resultados do ano de 2004 e os meses de Abril e Junho de 2005 (figuras 5.28 e 5.30). Por outro lado, é possível destacar as sub-bacias 6, 18 e 19 (definidas na figura 5.4 (A)), no aporte de sedimentos, em janeiro de 2004 (figura 5.29). Estas sub-bacias apresentam uma maior fração de área com declividades superior a 8%. Além destas, há também as sub-bacias 10,11 e 12 com erosão alta. A tabela 6.2 mostra a distribuição das áreas da Sub-Bacia 2 em relação à declividade.

Tabela 6.2 Distribuição da área contida em intervalos de declividade para algumas sub-bacias contidas na Sub-Bacia 2, pelo MDE interpolado de 20metros

Sub-Unidades	Porcentagem da área da sub-unidade inserida (%)	
	8 a 10%	Superior a 10%
6	11,76	58,82
10	21,05	47,37
11	20	40
12	80	20
18	42,86	57,14
19	13,33	53,33

Os resultados da Sub-Bacia 1, pelo MDE interpolado se mostram bastante dependente dos diversos componentes morfológicos e da cobertura do solo. A geração de escoamento superficial possui seu ápice nas sub-bacias que apresentam o cultivo de milho e afloramento rochoso, tais quais as sub-bacias 1, 2, 4, 5, 15 e 41 (definidas

na figura 5.4 (A)), observado nas figuras 5.28, 5.30 e 5.32. A tabela 6.3 ilustra a cobertura do solo nas referidas sub-bacias.

Tabela 6.3 Distribuição da áreas de plantio de milho e afloramento rochoso na ocupação do solo para sub-bacias da Sub-Bacia 2

Sub-Unidades	Percentagem da área da sub-unidade inserida (%)	
	Milho	Afloramento Rochoso
1	72,43	-
2	82,85	-
4	68,62	-
5	69,09	-
15	-	12,94
41	-	58,99

A produção sedimentos para a Sub-Bacia 1 predomina na parte baixa, conforme as figuras 5.40, 5.42 e 5.44. O cultivo de milho concentra-se em área de declividade inferior a 6%, de modo que o aporte de sedimentos nas sub-bacias em que há seu cultivo foi influenciado pelo alto valor do Fator C da MUSLE, de 0,2. Este parâmetro que relaciona a cobertura vegetal capaz de proteger o solo varia de 0, para um solo totalmente protegido, a 1, para um solo sem proteção. "Range Brush" e "Range Grass" possuem o Fator C com valor de 0,003. Enquanto que demais áreas com maior aporte de sedimentos possuem influência direta da declividade, tais quais sub-bacias apresentadas na tabela 6.4.

Tabela 6.4 Distribuição das áreas contidas em intervalos adotados da declividade para algumas sub-bacias contidas na Sub-Bacia 1

Sub-Unidades	Percentagem da área da sub-unidade inserida (%)	
	8 a 10	Superior a 10
26	23,14	30,86
27	12,86	29,57
29	37,14	22,29
34	-	75,22
35	11,14	40,86
36	6,54	71,95
40	7,87	57,03

6.5 Distribuição Espacial dos Resultados Obtidos nos Cenários

Nesta etapa são apresentados mapas, da figura 6.1 a 6.9, que mostram a distribuição espacial da erosão de sedimentos nos diferentes cenários, além de um mapa do assoreamento para os cenários 1 e 2 com o MDE interpolado (os mapas originados do MDE ASTER encontram-se no Anexo 3).

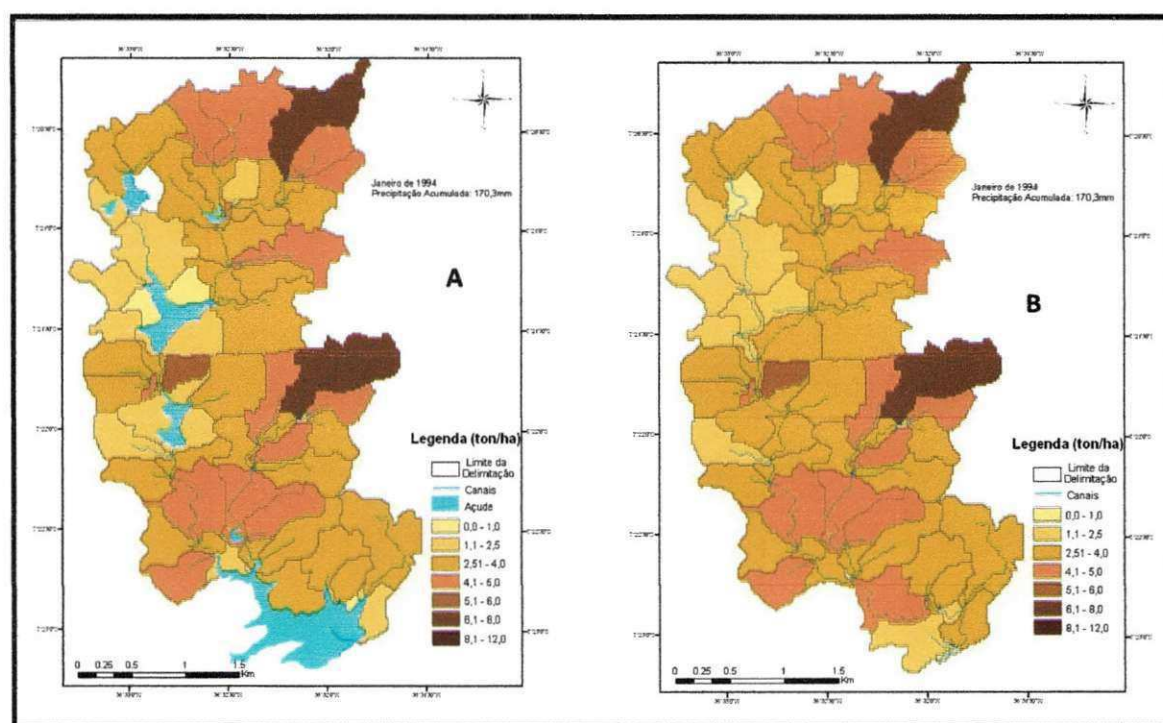


Figura 6.1 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 1994 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)

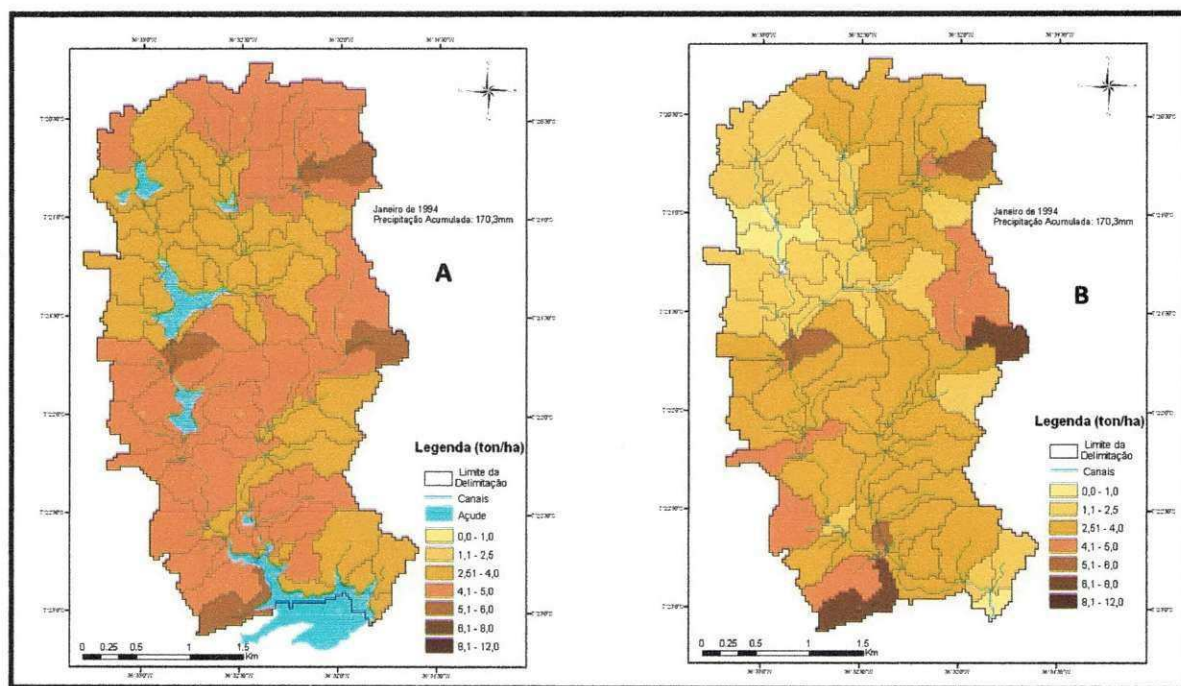


Figura 6.2 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 1994 pelo MDE ASTER no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)

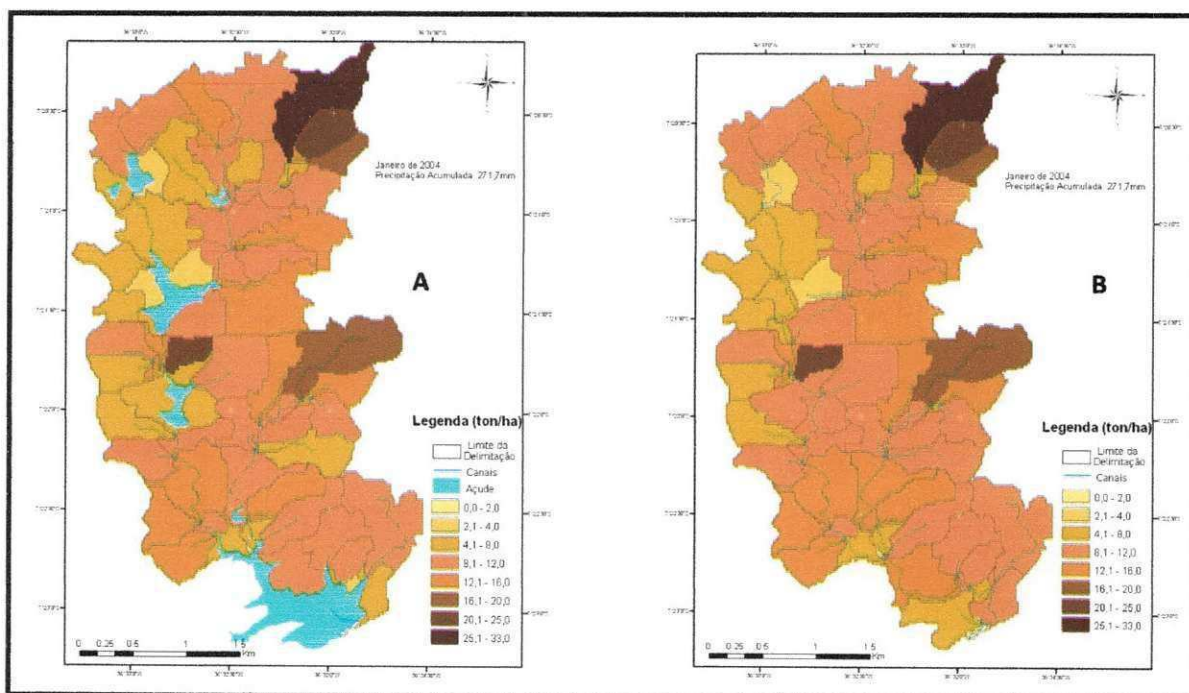


Figura 6.3 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)

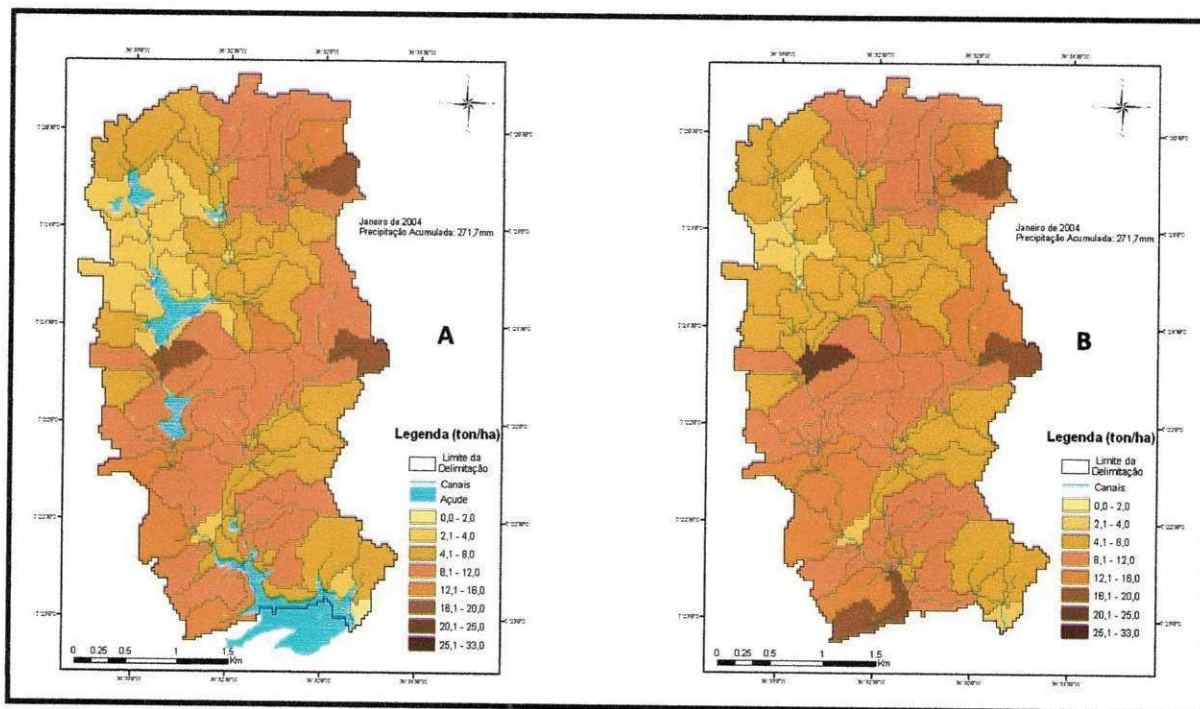


Figura 6.4 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE ASTER

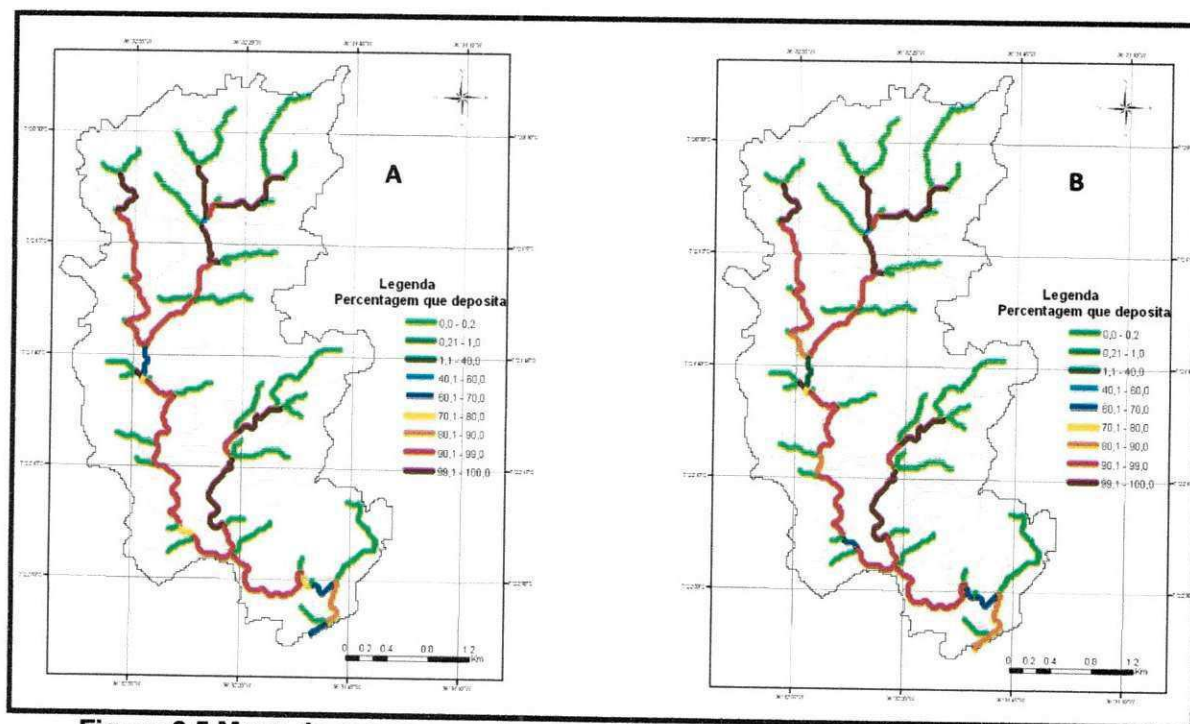


Figura 6.5 Mapa do assoreamento no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE interpolado, entre 1988 a 2006

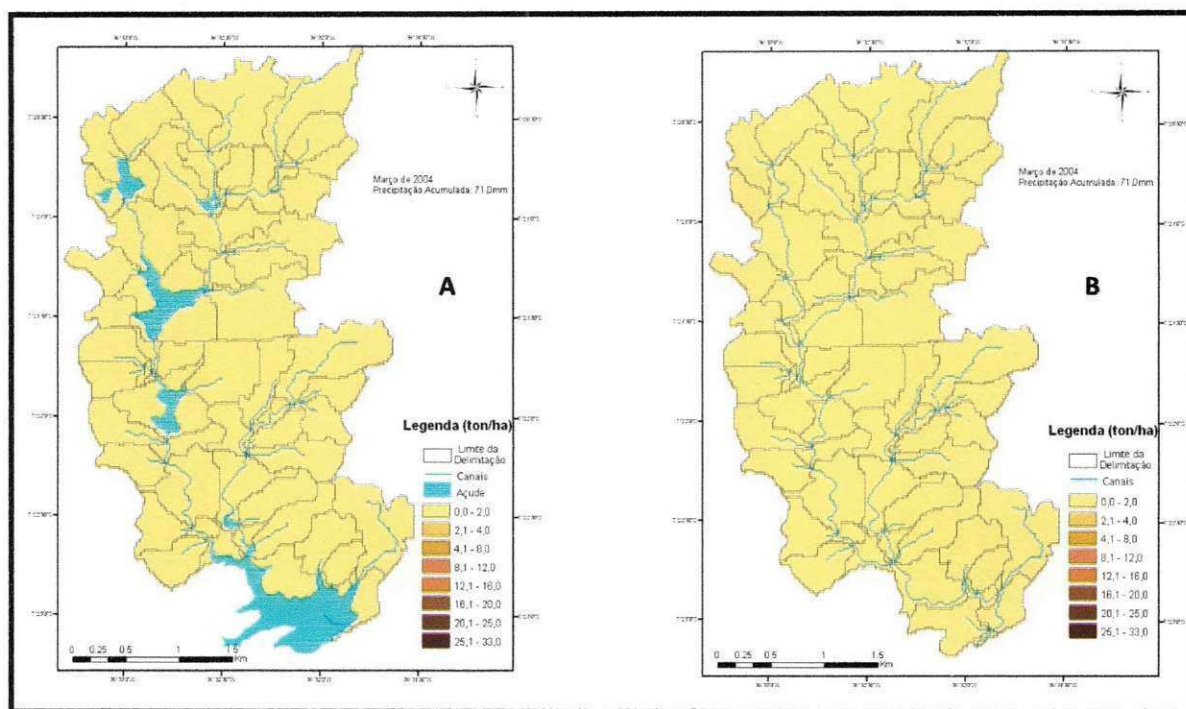


Figura 6.6 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE interpolado no cenário 1 (A) e pelo cenário 2 (B)

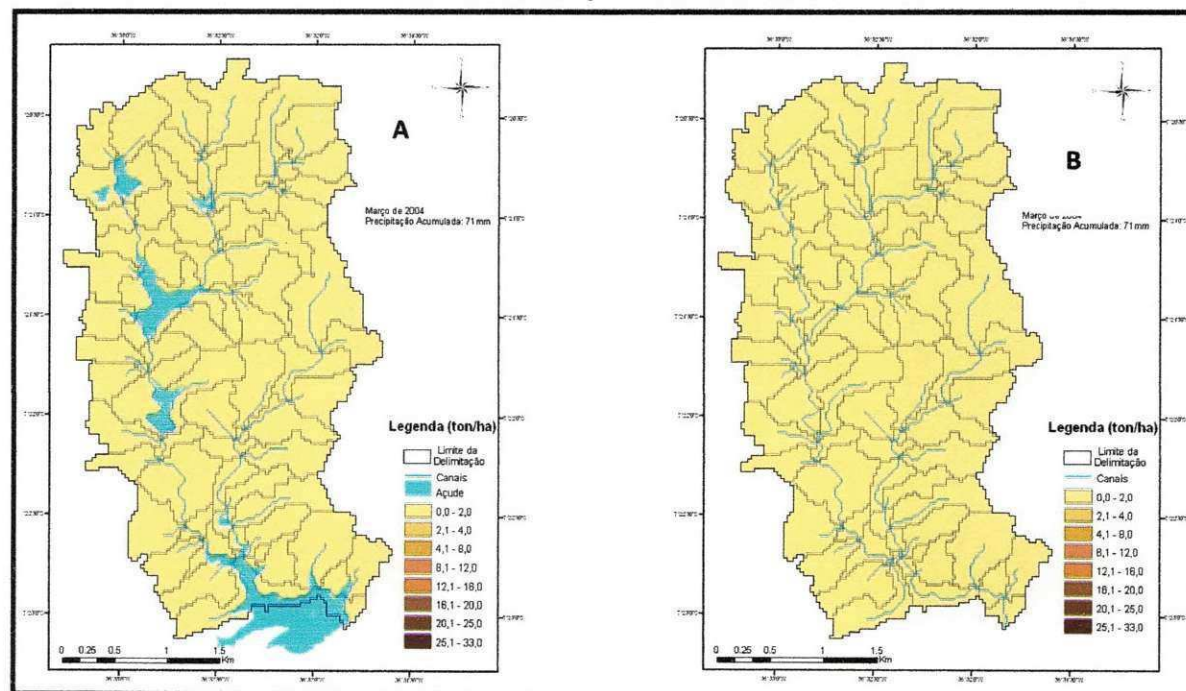


Figura 6.7 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B)

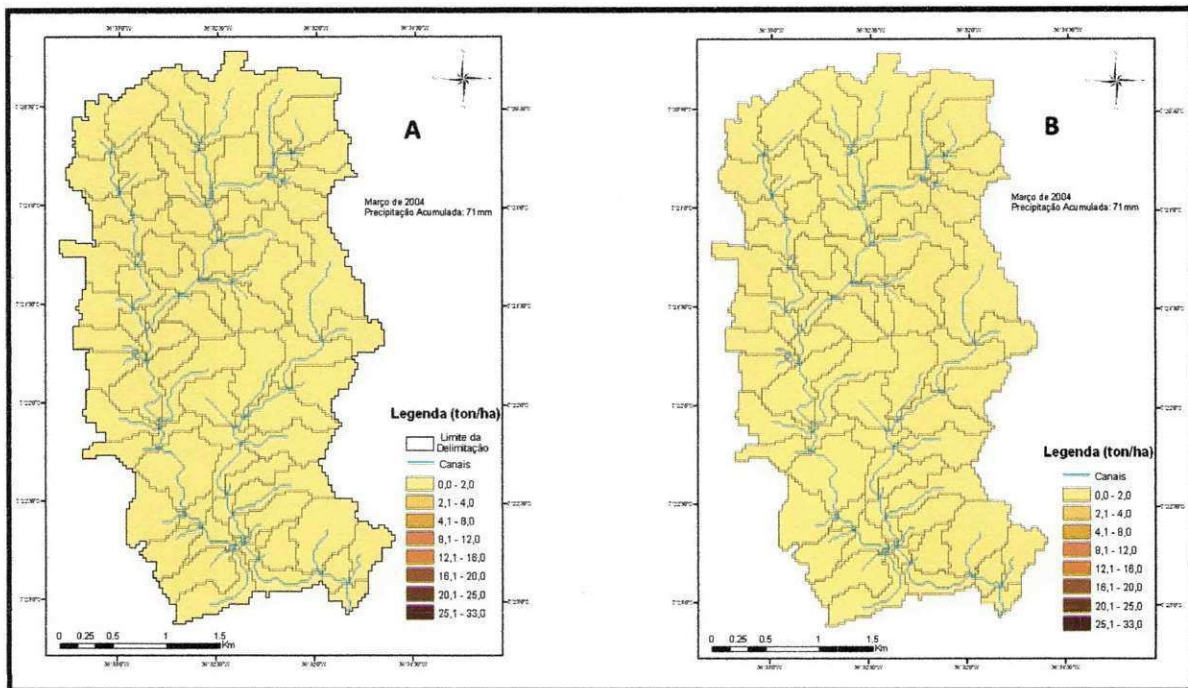


Figura 6.8 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 3 (A) e no cenário 4 (B)

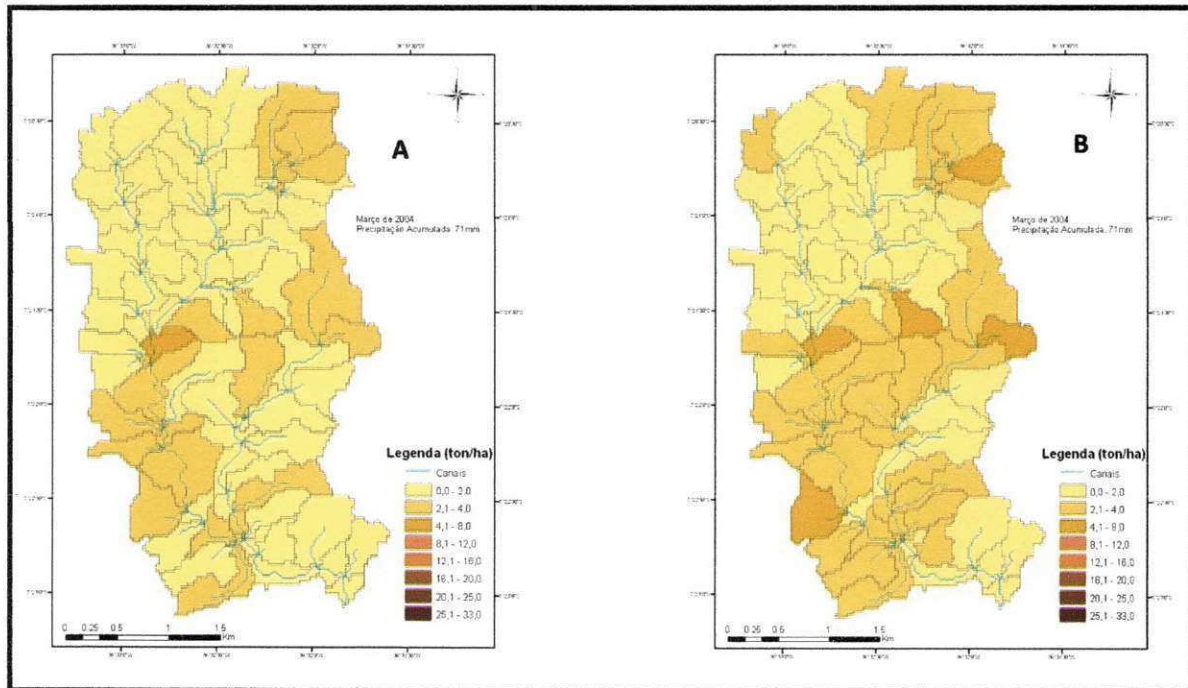


Figura 6.9 Mapa do aporte de sedimentos para Março de 2004 pelo MDE ASTER no cenário 5 (A) e no cenário 6 (B)

6.6 Cenários 1 e 2

A simulação da Bacia do Riacho dos Namorados nas condições atuais do uso do solo, com e sem a presença de açudes, objetivou a verificação do grau de influência dos açudes presentes na bacia sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos. Estes cenários também permitem uma avaliação comparativa entre os MDE utilizados na simulação, e para tal, as tabelas 6.5 a 6.7 expõem objetivamente os resultados da geração de escoamento superficial, aporte e produção de sedimentos é exibida.

Tabela 6.5 Resumo das médias anuais dos resultados para a simulação no período entre 1988 a 2006

Média Anual	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER				
Escoamento Superficial (mm)	33,43	32,69	35,6	36,18	33,17	31,49	52,39	58,86
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	6,897	5,482	7,211	5,864	5,966	3,167	10,183	18,889
Produção de Sedimentos (ton)	15,68	32,86	22,03	50,52	45,18	42,44	76,3	82,44

Tabela 6.6 Resumo das médias anuais dos resultados para a simulação no ano de 1994

Média Anual	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER				
Escoamento Superficial (mm)	17,48	16,86	18,68	18,88	17,01	15,92	30,71	34,01
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	3,680	2,978	3,853	3,216	3,135	2,132	6,113	8,748
Produção de Sedimentos (ton)	4,68	10,2	9,0	29,76	23,28	23,52	35,04	43,8

Tabela 6.7 Resumo das médias anuais dos resultados para a simulação no ano de 2004

Média Anual	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
	Interpolado	ASTER	Interpolado	ASTER				
Escoamento Superficial (mm)	91,95	91,85	97,94	91,85	93,94	84,95	133,63	144,03
Aporte de Sedimentos (ton/ha)	22,082	17,528	23,062	17,528	19,481	11,061	29,787	36,476
Produção de Sedimentos (ton)	41,04	98,76	56,4	98,76	111,48	96,12	179,64	216,0

No que se refere aos dois MDEs, foi observado que a nível das Sub-Bacias, a geração de escoamento superficial apresenta diferenças mínimas enquanto que o aporte de sedimentos mostra diferenças mais significativas. A produção de sedimentos a nível da Bacia do Riacho dos Namorados também mostra diferenças consideráveis, contudo devido a existência do açude do Namorados no exutório – o que dificultou o processo de delimitação automática – enaltece a necessidade de outros estudos futuros. Ainda assim, o MDE ASTER respondeu com uma maior taxa de entrega de sedimentos que o interpolado, para todos os períodos simulados e em ambos os cenários, conforme se verifica nas tabelas 5.31 e 5.42.

Por outro lado, o aporte de sedimentos foi superior para o MDE interpolado, em todos os períodos e em ambos os cenários. A isto aponta-se a influência da declividade no processo, uma vez que o MDE interpolado possui mais áreas com declividade superior a 8% e como se pode observar na figura 5.10 (A), as manchas com diferentes declives apresentam-se mais consistentes e concentradas. Isto é, provavelmente, ocasionado pela própria origem daquele modelo digital de elevação, gerado com dados topográficos de campo.

O cenário 2, em que os reservatórios da bacia foram ignorados, apresentou uma maior geração de escoamento superficial e aporte de sedimentos. Este fato já era esperado, pois parte da precipitação incide diretamente sobre o açude, diminuindo o fluxo na superfície e a erosão pelo impacto da chuva.

A análise da simulação entre os dois MDEs para os diferentes períodos destaca os resultados do aporte de sedimentos, de maneira que a diferença para o ano de 2004 é muito significativa. Em contraponto, a diferença para todo o período apresenta-se distribuída no valor médio, principalmente devido aos anos de pouca precipitação, como é possível perceber no ano de 1994, no qual a diferença é bastante reduzida. Isto enaltece a atenção que deve ser considerada quanto aos resultados entre os MDEs, uma vez que longos períodos podem diluir os resultados, aproximando-os, enquanto que anos mais particulares pode promover uma maior diferença.

A existência dos açudes no cenário 1 origina erros aparentes no balanço hídrico, de modo que a evapotranspiração tem seu valor muito alto. Este caso é objeto de discussão no fórum do modelo SWAT, e talvez ocorra devido à rotina de estimativa da

área do espelho d'água. O que acontece é que a área do espelho d'água é convertida diretamente pela interface ArcSWAT com a cobertura do solo e tipo de solo para água, permanecendo assim inalterada.

A influência dos açudes pode ser verificada através das tabelas: 5.43 e 5.44, para o ano de 1994 e 5.45 e 5.46 para no ano de 2004. Desde já atenta-se para a discrepância da produção de sedimentos para ambos os períodos. Para o cenário 1, no ano de 1994, cerca de 4,3 ton alcança o exutório, ao passo que com a ausência de açudes esse valor chega a 7,7 ton. Enquanto que no ano de 2004, a presença de açudes faz chegar 15,3 ton enquanto que o cenário 2 promove uma produção de sedimentos em 32,3 ton. Esta redução, do cenário 2 para 1, na ordem de 45 e 53%, aproximadamente, para os anos de 1994 e 2004, respectivamente, é devido a atenuação da capacidade de transporte de sedimentos – que é função direta do fluxo na calha fluvial.

A carga de sedimentos transportada relaciona-se diretamente com a vazão. Neste ponto, verifica-se que a vazão que entra e sai de cada sub-bacia é diretamente influenciada pela existência dos açudes. Os açudes retêm água que normalmente escoaria, e consigo levaria os sedimentos. O modelo SWAT foi capaz de representar a retenção de água ao longo dos reservatórios na Bacia do Riacho dos Namorados, de modo que há uma ligeira diferença na vazão média que entra e sai para as simulações com a existência de açudes. E a comparação entre as simulações com e sem açude torna o efeito de atenuar a vazão e o fluxo de sedimentos bem claro.

Para o ano de 1994 há uma redução média da vazão que sai de cada sub-bacia com um açude da ordem de 74%, enquanto que para o ano de 2004 esse valor é de 52%. Por outro lado, a redução média da carga de sedimentos que sai por trecho é de 80% para o ano de 1994 e aproximadamente 60% para o ano de 2004. O modelo SWAT utiliza a equação de Bagnold, da Potência do Fluxo para a capacidade de transporte, de modo que a máxima concentração de sedimentos que pode ser transportada pelo fluxo é função direta da velocidade de pico da vazão no canal. A velocidade de pico é estimada pela relação entre a vazão de pico e a área da seção do canal. Contudo, as condições de erosão do leito no canal não permitem uma relação linear entre a vazão e a carga de sedimentos transportada.

Assim, o modelo SWAT foi capaz de reproduzir os efeitos dos açudes em cascata na Bacia do Riacho dos Namorados. Entretanto, este fato denota uma necessidade de trabalhos futuros, com mais dados de vazão e fluxo de sedimentos para que se torne possível uma validação de resultados quantitativos.

A visualização espacial do aporte de sedimentos para o cenários 1 e 2, exposto nas figuras 6.1 a 6.4 para o mês de Janeiro de 1994 e de 2004 permitem algumas constatações. A observação dos resultados pelo MDE interpolado, em conjunto com a figura 5.10 (A), aponta diretamente que as sub-bacias que obtiveram maior aporte de sedimentos foram aquelas inseridas no intervalo de declividade superior a 10%. São os casos das sub-bacias 5, 7, 37 e 41 (definidas na figura 5.9 (A)). Por outro lado, o aporte de sedimentos pelo MDE ASTER não se mostra tão evidente na análise conjunta com a figura 5.10 (B), exatamente porque os intervalos da declividade são mais espaçados.

Sendo assim, a averiguação das sub-bacias que mais promoveram erosão do solo, possibilitam a checagem direta de suas características no banco de dados. A confecção de mapas promove uma facilidade quanto a observação de áreas suscetíveis a erosão e a busca por essa explicação. Os resultados mostram que as sub-bacias que possuem neossolo apresentam um aporte de sedimentos entre de 8 a 16 ton/ha para ambos os MDEs. O neossolo, entre os solos encontrados na bacia, é o que possui maior valor do fator de erodibilidade (0,165) e, portanto o motivo para sua elevada produção de sedimentos.

Verifica-se que as sub-bacias influenciadas pelos açudes apresentam uma menor erosão do solo, conforme visualização direta das figuras 6.1 a 6.4. Ou seja, o cenário 1 apresenta uma menor erosão do solo nas sub-bacias na qual o reservatório superficial possui abrangência. No cenário 2 tais sub-bacias mostram maior erosão do solo. Trata-se de um resultado importante da influência dos açudes na Bacia do Riacho dos Namorados.

A análise das figuras para os dois MDEs mostram algo importante: que a distribuição espacial do aporte de sedimentos não é muito semelhante. Há diferenças notáveis, seja para mais ou para menos, do aporte de sedimentos. Isto indica a necessidade de uma atenção maior para o estabelecimento do MDE como dado de entrada para o modelo SWAT, haja vista que para fins de planejamento a visualização

espacial de resultados é uma ferramenta de grande importância. E diante da ausência de dados observados quanto ao aporte de sedimentos ao longo da Bacia do Riacho dos Namorados torna-se impossível apontar qual MDE é mais realista, apenas fornece uma primeira estimativa deste componente que norteia, na rotina de simulação do modelo SWAT, todo o processo hidrossedimentológico.

A figura 6.5 que apresenta os trechos de canais assoreamento para ambos os cenários 1 e 2, utilizando o MDE interpolado, para todo o período simulado. Estas figuras mostram que as sub-bacias, logo a montante ou a jusante de um reservatório, são possuem influencia no processo de deposição, de tal modo que a montante a deposição ocorre devido a obstrução da represa, e a jusante devido a redução da vazão líquida – e a conseqüente atenuação da capacidade de transporte.

6.7 Cenários 3, 4, 5 e 6

A análise dos demais cenários visa uma identificação direta da influência da cobertura do solo na região.

O cenário 3 simulou a ausência da interferência das ações do homem, com uma cobertura representativa da caatinga. Apenas o cenário 4, reflorestamento com algaroba, apresenta uma melhor proteção do solo que o cenário 3. O cenário 6, com o solo exposto, é o mais agressivo ao solo, favorecendo a enormes perdas de solo por hectare, seguido pelo cenário 5 – a cobertura de milho.

Os cenários 3 e 4 aproximam-se na geração de escoamento superficial, contudo o aporte de sedimentos mostra uma diferença significativa. Isto é principalmente pelo Fator de Cobertura do solo, presente no banco de dados da interface para a “honey mesquite”, correspondendo a algaroba, é de 0,001 enquanto que a “range brush” é de 0,003, o que corresponde a caatinga. O valor de CN foi igual para ambas as coberturas, em 77, como também foi considerado que a zona radicular igualaria a profundidade máxima permitida para a perfil do solo.

O cultivo de milho promove uma grande degradação do solo, haja vista seu Fator de Cobertura do Solo com valor de 0,2 e CN de 83. Isto promove uma maior facilidade para erosão, uma vez que o solo encontra-se em um estágio de menor proteção e melhores condições para escoamento superficial.

O cenário 6, simulado diretamente utilizando a opção no modelo de considerar o solo exposto, mostra altíssimos valores do aporte de sedimentos em comparação aos demais cenários simulados.

A distribuição espacial do escoamento superficial e a produção de sedimentos pela erosão, plenamente evidencia a influência da cobertura do solo, do tipo de solo e da declividade do terreno. A análise das figuras 6.6 a 6.9, mostrando a distribuição do aporte de sedimentos para Março de 2004, quando a precipitação não foi tão intensa, servem bem para ilustração. Verifica-se que os cenários de 1 a 4 tiveram um aporte de sedimentos inferior a 2 ton/ha, enquanto que para os cenários 5 e 6 houve intervalos de produção de até 8 ton/ha em algumas sub-bacias. O cenário 6 apresenta mais sub-bacias com maior aporte de sedimentos que o cenário 5, e o que se verifica é que bacias que apresentam o neossolo e possuem no mínimo 15% de sua área com declividade superior a 12% já promove um aporte de sedimentos superior a 2 ton/ha/ano para o período determinado.

A altura de solo média que se perdeu no período entre 1988 a 2006 foi de 1,145 mm para o cenário 6, enquanto que o cenário 4 apresentou uma perda na ordem de 0,2mm.

Tabela 6.8 Perda de solo por erosão nos cenários

Cenário	Perda de Solo (mm)
3	0,362
4	0,192
5	0,617
6	1,145

Por fim, a produção de sedimentos maior para os cenários 5 e 6 estão de acordo com a vazão superior em seus canais, o que proporciona uma maior capacidade de transporte.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho utilizou-se o modelo SWAT como ferramenta para avaliar o escoamento superficial e produção de sedimentos pela erosão, através da simulação destes processos na Bacia do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano.

Sendo o primeiro emprego deste modelo no semi-árido do Brasi, buscou-se verificar as vantagens e dificuldades no uso deste modelo bem como a influência de diversos fatores inerentes no seu uso. Além disso, procurou-se extrair o máximo possível da ferramenta SIG ao qual o modelo se acopla, através de uma gama de mapas de variações espacial que auxiliariam em um processo de tomada de decisão para fins de planejamento das bacias hidrográficas.

O modelo foi parametrizado a nível de duas sub-bacias hidrográficas da Bacia Experimental de São João do Cariri, e posteriormente o modelo foi utilizado para simular os processos hidrossedimentológicos na Bacia do Riacho dos Namorados. Com base nestes resultados conclui-se que:

- a) A utilização do modelo SWAT é bastante amigável, haja vista sua interface gráfica e o banco de dados do modelo permitem a parametrização de forma simples, tornando o modelo bastante versátil.
- b) O acoplamento da ferramenta SIG – ArcGIS/ArcSWAT – proporciona a geração de vários tipos de mapas, que permitem a visualização de diversas informações topográficas, morfométricas e dos resultados dos processos simulados. Estes mapas são a grande vantagem da ferramenta SIG e podem ser explorados, através do modelo SWAT;
- c) Apesar da utilização direta de mapa de cobertura do solo que considera apenas o tipo de vegetação, o modelo SWAT foi bastante satisfatório a nível das Sub-Bacias 1 e 2, conforme os valores dos coeficiente de Nash e R^2 . Nestas Sub-Bacias a geração do escoamento superficial pelo modelo foi bem mais eficiente que o aporte de sedimentos.

- d) Os resultados a nível da Bacia do Riacho dos Namorados quanto a geração de escoamento superficial foram próximos aos encontrados na literatura, julgando pelo coeficiente de rendimento da bacia, em torno de 10%;
- e) A primeira aplicação do modelo ao nível da Bacia do Riacho dos Namorados foi bastante satisfatória, os resultados da simulação mostraram bem a influência dos reservatórios sobre a saída do fluxo no exutório da bacia e a retenção de sedimentos produzidos a montante dele;
- f) Os diversos resultados e comparações entre os MDEs gerados mostram que existem diferenças importantes entre os resultados obtidos e como nem sempre será possível a aquisição de dados cotados em campo, os resultados deste trabalho indicam que pode-se confiar nos resultados da simulação utilizando MDE originado por imagem de satélite para o escoamento superficial. Para o aporte de sedimentos os resultados das simulações servem como a primeira estimativa devendo ser aprimorado com dados e medições no campo;
- g) Verifica-se na comparação da distribuição espacial produção de sedimentos que não há muita conformidade entre os MDEs utilizados, apesar da proximidade dos valores expostos nos resumos. Isto depende das declividades extraídas nos MDEs. Diante disto, a utilização de um MDE originado por sensoriamento satélite requer maiores cuidados na utilização dos resultados;
- h) A simulação dos cenários permite a averiguação dos processos hidrossedimentológicos de maneira bastante objetiva, tornando possível a constatação da influência da cobertura vegetal, reflexo de parâmetros como CN ou Fator *C*, na geração parâmetros do escoamento superficial e produção de sedimentos, e
- i) Foi verificado, através das simulações, que o reflorestamento com algaroba proporcionaria um maior grau de conservação do solo, superando inclusive a caatinga. Por outro lado, o cultivo do milho apresentou uma elevada degradação do solo, da qual apenas o solo nu obteve mais preocupante resultado.

Recomendações Futuras

- a) Promover a construção de um banco de dados para a cobertura do solo que mais bem represente caatinga em diferentes estágios de crescimento e densidade, atentando para os parâmetros mais sensíveis nos processos hidrossedimentológicos;
- b) Trabalhar efetivamente com uma imagem de satélite de modo a considerar toda a cobertura do solo abrangendo, além da vegetação, imóveis e pistas;
- c) Aplicar o modelo SWAT a uma bacia de maior escala no semi-árido do Brasil que contenha dados observados para diferentes sub-bacias nela contida. Com isto seria possível uma calibração por sub-bacia, extraindo mais do desempenho do modelo, e
- d) Aplicar o modelo SWAT para bacias com reservatórios superficiais que possuam dados observados da entrada e saída, tanto de vazão líquida quanto de sedimentos, de modo a averiguar a confiabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, H. M. (2008). *Bacia Experimental e Representativa da Rede de Hidrologia do Semi-Árido*. Relatório de Atividades, Processo nº 372001/2006-8.

AMORIM, H. R. F. (2010). *Avaliação do comportamento de quatro pequenos corpos lênticos em cascata em épocas de seca e chuva no semiárido*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 130p.

AKSOY, Hafzullah; KAVVAS, M. Levent. *A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models*. *Catena*, vol 64, pp 247 -271, 2005.

ARABI, Mazdak; FRANKENBERGER, J. R.; ENGEL, B. A.; ARNOLD, J. F. (2008). *Representation of agricultural conservation with SWAT*. *Hydrological Processes*. Vol. 22, 3042-3055 pp.

ARAGÃO, R. (2006). *Análise da Influência Antrópica na Produção de Escoamento Superficial e Sedimentos em Bacias Hidrográficas do Cariri Paraibano Através da Modelização dos Processos Físicos e do Emprego de Sig*. Relatório Técnico, Edital 002/03 – FAPESQ-PB/MCT/CNPq, CNP q – Processo N°. 35.0599/2004-1.

BALDISSERA, G.C. (2005). *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, 144 p.

BALTOKOSKY, Valmir (2008). *Modelo SWAT 2005 aplicado às sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiros – Pato Branco / PR*. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 138p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2005) *Conservação do solo*. 5ª edição, São Paulo: Ícone, 355 p.

BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N.; VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. (2009). *Water Erosion Distribution in the Itutinga/Camargos Hydroelectric Plant Watershed (Minas Gerais, Brazil) using Distributed Modeling*. *Catena*. Vol. 79, 49-59pp.

BORAH, Deva K.; KRUG, E. C.; YODER, D. (2007). *Watershed Sediment Yield*. In: *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers, 827-858p.

Ministério da Agricultura (1972). *Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba*. Rio de Janeiro; Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (MA), 670p.

BRIMICOMBE, Allan (2010). *GIS, Environmental Modeling and Engineering*. CRC Press, 2ªEd, 380p.

CAMARA, Gilberto. (2001). *Introdução a Ciência de Geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 345p.

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. (2006). *Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba*. *Revista de Biologia e Ciência da Terra*. Vol. 6, nº 1, 45-50pp.

CAMPOS, J.N.B.; STUDART T. M. C. (2001). *Gestão de Águas:Princípios e Práticas*. ABRH, 197 p.

CARVALHO, N. de O (2008). *Hidrossedimentologia prática*. Interciência. 600p. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2008.

CHAVES, L.H.G., MENINO, I.B., ARAÚJO, I.A., CHAVES, I.B.(2004). *Avaliação da fertilidade dos solos das várzeas do município de Souza, PB*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.2, n.3, p.262-267, 1998.

CHAVES, L.H.G.; CHAVES, I.B.; VASCONCELOS, A.C.F. (2002). *Salinidade das águas superficiais e suas relações com a natureza dos solos na Bacia Escola do açude Namorados*. BNB/UFPB. 114 p.

CHILDS, Colin (2004). *Interpolating Surface in ArcGIS Spatial Analyst*. Disponível em: <http://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpoiatung.pdf> . Acessado no dia: 06/06/2010.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L. W. (1988). *Applied Hydology*. New York : McGraw-Hill. 572pgs.

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. (2010). *Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model*. Hydrological Process, vol 24, pp 1133-1148.

DEVANTIER, Bruce A., FELDMAN, Arlen D. (1993). *Review of GIS Application in Hydrologic Modelling*. Journal of Water Resources Planning and Management. Volume 119, Nº 2.

DHAR, Sujana; MAZUMDAR, Asis (2009). *Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India*. Hydrological Processes, vol 23, 2394 – 2406 pp.

DINGMAN, S. L. (2008). *Physical Hydrology*. Wavelan Press, 646pp.

FAZAL, Shahab (2008). *Gis Basics*. New Age International, 350p.

FERRAZ, F.F.B; MILDE, L.D.E; MORTATI, J. (1999) *Modelos hidrológicos acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um estudo de caso*. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba, v14, PP. 45-56.

FIGUEIREDO, E.E. (1998). *Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-Arid Region of Brazil*. PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, England.. 264 pp.

FITZ, P.R. (2008) *Geoprocessamento Sem Complicação*. Oficina de Textos São Paulo – SP, 160 pp.

FLANAGAN, D.C. e M.A. Nearing (Eds). (1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. NSERL Report No. 10. USDAARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.

FLEMING, P. M. et all (2003). *Transpiração em Plantas de Algaroba (Prosopis juliflora (Sw.) Dc.) Cultivadas no Semi-Árido Nordestino*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, nº 4, 25-30 pp.

GASSMAN, P. W. et all (2007). *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(4): 1211-1250.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. (2005). *Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model*. Hydrological Processes. Vol. 19, 683–692 pp.

GREEN, G. H.; GRIENSVEN, A. (2008). *Autocalibration in hydrologic modelling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds*. Environmental Modelling and Software. Vol. 23, 422-434 pp.

GREGORY, Ian N., ELL, Paul S. (2007). *Historical GIS: Technologies, Methodologies and Scholarship*. Cambridge University Press, 241 p.

HILLEL, Daniel (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, 494 pp.

HORNBERGER, G. M. (1998). *Elements of Physical Hydrology*. The John Hopkins University Press, 302 pp.

JHA, M., GASSMAN, P. W., SECCHI, S., GU, R., ARNOLD, J. (2004). *Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, And Nutrients Predictions*. Journal of the American Water Resources Association, 811-825 pp.

JENSEN, John R. (2009). *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*; Ed. Parêntese. São José dos Campos – SP, 672 pp

JOHNSON, Lynn E. (2009). *Geographic Information Systems In Water Resources Engineering*. CRC Press, 340p.

LACROIX, Martin P. et al (2002). *Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of hydrologic model*. Environmental Modelling and Software, v17, PP 127 – 136.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. (2002). *Comparison of two different approaches of sensitivity analysis*. Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 27, pp 645-654.

LIERSCH, S. 2003a. *The Programs dew.exe and dew02.exe: user's manual*. Berlin.

LIERSCH, S. 2003b. *The Program pcpSTAT: user's manual*. Berlin.

LOPES, Nadia Hidemi Yano (2008). *Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 164p.

LOPES, V. L. (1987). *A numerical model of watershed erosion and sediment yield*. Tucson, PhD Dissertation, University of Arizona, EUA.

LOPES, W. T. A. (2003). *Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida Paraibana*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 174p.

LUBITZ, Emerson (2009). *Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC*. Dissertação (mestrado). Universidade Regional de Blumenau, 125p.

MARCHIORO, Eberval (2008). *Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 218p.

MACHADO, R. E (2002). *Simulação de Escoamento e Produção de Sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 166p.

MAIDMENT, D, R. (1993). *Hydrologic Cycle*. In: *Handbook Of Hydrology*. McGraw-Hill, 2ªEd, 1.1-15p.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. (2009). *Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region*. Revista Ciência Agronômica. Vol. 40, nº 2, 165-174pp.

MELO, Heber de Andrade (2010). *Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 119p.

MINOTI, R. T. (2006). *Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior / SP*. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 247p.

Ministério do Meio Ambiente (2007). *Atlas das Áreas Suscetíveis à Desertificação do Brasil*. 134p.

MORO, Michele (2005). *A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos*. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo, 100p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2004) *Soil And Water Assessment Tool – Input/Output File Documentation*. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 541p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2005) *Soild And Water Assessment Tool – Theorical Documentation*. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 494p.

NETO, A. G. S. (2009). *Avaliação da Área Foliar de Cinco Espécies Florestais Ocorrentes no Semi-Árido Paraibano*. Monografia (graduação). Universidade Federal de Campina Grande. 37p.

NETO, J. G. C. et all (2010). *A Influência dos Métodos da Interpolação na Geração dos Modelos Numéricos de Terreno e os Resultados da Simulação pelo Modelo SWAT*. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Brasília

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO, D. F. (2000). *Estimativa das Equações de Chuvas Intensas para Algumas Localidades no Estado de Goiás Pelo Método da Desagregação de Chuvas*. Pesquisa Agropecuária Tropical. Vol. 20, pp 23- 27.

OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; SILVA, I. F.; SILVA, M. L. N. (2008) *Tolerância de Perda do Solo por Erosão para o Estado da Paraíba*. Revista de Biologia e Ciências da Terra. Vol. 8, nº 2, pp 60-61.

OLIVERA, Francisco; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. (2006). *ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT*. Journal of the American Water Resources Association. vol 42, nº2, pp 295-309.

PAES-SILVA, Albanita Peixoto (2002). *Cobertura Vegetal da bacia hidrográfica do açude do Namorado no Cariri Oriental Paraibano*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. 95p.

PAIVA, F. M. de L. (2008). *Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Micro-bacias na Região Semi-Árida Paraibana*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Área de Recursos Hídricos, 208p.

PETERSON, J. R.; HAMLET, J. M. (1998). *Hydrologic Calibration of the SWAT Model in a Watershed Containing Fragipan Soils*. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 34, no.3, pp 531 – 544.

PRADO, T. B. G. (2005). *Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim*. Dissertação (mestrado). Instituto Agrônomo de Campinas. 72p.

PULLAR, David; SPRINGER, Darren (2000). *Toward integrating GIS and catchment models*. Environmental Modelling and Software 15, PP 451-459.

RACLOT, D.; ALBERGEL, J. (2006). *Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment*. Physics and Chemistry on Earth. Vol. 31, pp 1038-1047.

RAUDIQUIVI, A. J. (1976). *Loose Boundary Hydraulics*. Pergamon International. 2ª Edição. 397pp.

RAWLS, W.J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D, L.; SHIRMOHAMMADI, A. (1993). *Infiltration and Soil Water Movement. In: Handbook of Hydrology*. McGRAW-HILL, 2ªEd, 5.1 – 5.51p.

RAWLS, W.J.; SAXTON, K.E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. American Society of Civil Engineering, *Journal of Irrigation and Drainage*, 25(5), 1316-1320,p.

REFOSCO, J. C.; PINHEIRO, A. (1999). *Impacto do deflorestamento sobre o regime hídrico de uma bacia hidrográfica*. Revista de Estudos Ambientais. Vol. 1, nº 2.

RENNÓ, C. D. (2003) *Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas*. Tese (doutorado). São José dos Campos: INPE, 148p.

SAGHAFIAN, Bahran; LIESHOUT, Arno m. van; RAJAEI, Hossein M. (2000). *Distributed catchment simulation using raster GIS*. JAG, v2, PP 199-203.

SANGOI, Ranieri Gustavo (2007). *Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos na bacia hidrográfica de São Martinho da Serra – RS*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 132p.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. SRINIVASAN, V. S. (2000). *Influência do tipo da cobertura vegetal sobre erosão no semi-árido paraibano*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 4, nº 1, pp92-96.

SANTOS, L. L. (2008). *Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três Modelos em Pequenas Sub-Bacias na Região Semi-Árida Paraibana*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, 155p.

SIMANTON, J. R., HAWKINS, R. H., SARAVI, M. M. e RENARD, K. G. (1996). *Runoff Curve Number Variation with Drainage Area, Walnut Gulch, Arizona*. Transactions of the ASAE, Vol. 39(4): 1391-1394.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. 1990. *EPIC – Erosion productivity impact calculator: Model Documentation*. Washington: U.S. Department of Agriculture. 145 p.

SHEN, Z. Y.; GONG, Y. W.; LI, Y. H.; HONG, Q.; XU, L. LIU, R. M. (2009). *A Comparison of Wepp and Swat for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area*. Agricultural Water Management. Vol. 96, pp 1435 – 1442.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1967). *The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV. A method of estimating the available water capacities of profiles in the field*. Journal of Soil Science, 18: p. 174-181.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. (1969). *The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V. Relationships between particle size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available water*. Journal of Soil Science, 20: p.126-131.

SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. (1992). *Sediment Transport Techonology – Water and Sediment Dynamics*. Water Resources Publications, 919pp.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. (2009). *O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro*. Anais do Congresso XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. (1995). *Evaluation of runoff and erosion loss in micro-basins utilizing the hydrodynamic model WESP*. Advances in Engineering Software. Vol. 22, pp 79-85.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. (2003). *Erosão Hídrica do Solo no Semi-Árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, nº 2, pp 56-72.

SRINIVASAN, V.S., GALVÃO, C.O., SANTOS, C.A.G., FIGUEIREDO, E.E., REGO, J.C., ALCÂNTARA, H.M., ALBUQUERQUE, J.P.T., ARAGÃO, R., MELO, R.N.T., CRUZ, E., GUEDES, G.A., LACERDA, I., SANTOS, L.L., ALVES, F.M. (2004). *Bacia Experimental de São João do Cariri-PB*. In: Righetto, A.M. (Org.), Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido, Cap. 4, FINEP/FUNPEC/CNPq/CTBRASIL. 93-126.

SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I; GARG, V.; MIGLIACCIO, K. W. (2007). *Impact of time-scale of the calibration objective function on the performance of watershed models*. Hydrological Processes. Vol. 21, pp 3409 – 3419.

TUCCI, C. E. M. (2005) *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 678 p.

TUCCI, C. E. M. (2009) *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 943 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1997). *Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 2, nº 1, 135-152pp.

UZEIKA, Talita (2009). *Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.

VALERIANO, M. M. (2004). *Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul*. São José dos Campos, SP. INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756).

VERSTRATEN, Gert; POESEN, Jean (2001). *Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate*. *Geomorphology*, vol 40, 123 – 144 pp.

WALLING, D. E. (1983). *The Sediment Delivery Problem*. *Journal of Hydrology*, 65: 209-237.

WALLING, D. E. (1999). *Linking land use, erosion and sediment yields in river basins*. *Hydrobiologia*, vol 410, pp 223-240.

WHITE, Kati L.; CHAUBEY, I. (2005). *Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model*. *Journal of the American Water Resources Association*. October, pp 1077– 1089.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. (1990). *KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.

WILLIAMS, J. R. (1969). *Flood Routing With Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients*. *Transactions of the ASAE*. Vol. 12, 100-103.

WILLIAMS, J. R. (1975). *Sediment-yield prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor*. Transactions of the ASAE. Vol. 12, 100-103.

WILLIAMS, J. R. (1995). *Chapter 25: The EPIC model*. V.P. Singh (ed). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. .909-1000 pp.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; LUZIO, M.; ARNOLD, J. (2007). *ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User's guide*. Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory. 436p.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning*. Washington D.C., USDA, Agriculture Research Service. 58p. (Agriculture Handbook, 735).

XAVIER, F. V. (2009). *Contribuições metodológicas para ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Mano utilizando o modelo SWAT*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Mato Grosso, 166p.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGURUMARAN, R. (2009). *Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) Into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk*. Land Degradation and Development. Vol 20, 84-94 pp.

ANEXO 1 – PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA REDE DE DRENAGEM

Tabela 1 Parâmetros Morfométricos dos Canais Delimitados da Sub-Bacia 1 pelos dois MDEs

Sub-Bacia	Interpolado				ASTER			
	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)
1	9,000	0,067	0,018	0,039	17,160	0,141	0,030	0,012
2	11,000	0,077	0,020	0,047	10,850	0,070	0,019	0,009
3	2,000	0,012	0,006	0,0003	12,134	0,089	0,022	0,008
4	13,000	0,069	0,018	0,044	19,352	0,287	0,048	0,057
5	17,000	0,116	0,026	0,018	4,384	0,020	0,008	0,023
6	4,828	0,159	0,032	0,004	10,584	0,226	0,041	0,001
7	6,243	0,067	0,018	0,061	7,484	0,326	0,052	0,027
8	3,000	0,065	0,018	0,032	9,034	0,109	0,025	0,055
9	20,000	0,116	0,026	0,002	4,650	0,058	0,017	0,043
10	6,828	0,235	0,042	0,005	9,034	0,101	0,024	0,022
11	5,828	0,077	0,020	0,015	3,100	0,030	0,011	0,010
12	5,000	0,055	0,016	0,013	20,902	0,101	0,024	0,053
13	6,828	0,177	0,035	0,004	4,650	0,058	0,017	0,043
14	11,657	0,377	0,057	0,002	6,576	0,079	0,020	0,046
15	17,485	0,140	0,030	0,00002	4,650	0,070	0,019	0,022
16	19,071	0,135	0,029	0,019	7,484	0,120	0,027	0,040
17	3,000	0,065	0,018	0,017	4,650	0,058	0,017	0,022
18	5,000	0,075	0,020	0,008	18,068	0,424	0,062	0,022
19	7,828	0,094	0,023	0,009	7,484	0,171	0,034	0,013
20	16,828	0,172	0,034	0,002	4,650	0,058	0,017	0,043
21	28,971	0,428	0,062	0,005	17,050	0,124	0,027	0,012
22	6,000	0,485	0,068	0,042	8,768	0,443	0,064	0,010
23	4,243	0,055	0,016	0,025	7,484	0,480	0,067	0,027
24	2,828	0,031	0,011	0,066	11,868	0,214	0,039	0,076
25	21,314	0,224	0,040	0,015	3,100	0,058	0,017	0,032
26	8,485	0,578	0,076	0,015	12,134	0,079	0,020	0,016
27	25,142	0,161	0,032	0,005	10,584	0,581	0,076	0,047
28	9,828	0,065	0,018	0,026	27,212	0,160	0,032	0,044
29	11,485	0,085	0,021	0,021	4,384	0,020	0,008	0,046
30	9,828	0,079	0,020	0,013	4,650	0,058	0,017	0,043
31	5,657	0,629	0,081	0,009	15,234	0,089	0,022	0,026
32	5,000	0,065	0,018	0,098	4,384	0,623	0,080	0,023
33	8,828	0,643	0,082	0,032	24,644	0,147	0,031	0,053
34	4,243	0,052	0,015	0,010	27,368	0,681	0,085	0,026
35	16,485	0,161	0,032	0,038	4,650	0,058	0,017	0,065
36	21,314	0,671	0,084	0,009	7,484	0,737	0,089	0,013
37	2,000	0,023	0,009	0,057	4,650	0,075	0,019	0,022
38	6,243	0,075	0,020	0,040	4,384	0,020	0,008	0,001
39	4,828	0,734	0,089	0,001	10,960	0,097	0,023	0,009
40	18,728	0,125	0,027	0,052	9,034	0,768	0,092	0,011
41	18,314	0,759	0,091	0,028				

Tabela 2 Parâmetros Morfométricos dos Canais Delimitados da Bacia Riacho dos Namorados pelos dois MDEs

Sub-Bacia	ASTER				Interpolado			
	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)	Comprimento do Trecho de Rio (m)	Largura média do Trecho (m)	Profundidade Média do Trecho (m)	Declividade (m/m)
1	48,270	0,517	0,071	0,046	42,042	0,502	0,069	0,056
2	73,933	0,730	0,089	0,027	77,497	0,793	0,094	0,024
3	7,750	0,360	0,056	0,013	20,728	0,468	0,066	0,026
4	6,200	0,959	0,107	0,016	32,799	0,527	0,072	0,036
5	18,444	0,437	0,063	0,027	27,971	0,460	0,065	0,010
6	40,365	0,551	0,074	0,022	3,000	0,327	0,052	0,044
7	40,254	0,523	0,071	0,002	115,912	0,737	0,089	0,052
8	13,950	0,386	0,058	0,014	15,657	0,619	0,080	0,044
9	83,012	0,627	0,080	0,037	27,314	1,059	0,114	0,050
10	24,268	0,736	0,089	0,066	15,828	0,409	0,060	0,018
11	11,868	1,052	0,113	0,017	9,071	0,336	0,053	0,033
12	13,684	0,548	0,073	0,029	47,799	1,318	0,132	0,008
13	12,776	0,342	0,054	0,063	4,243	0,326	0,052	0,009
14	10,960	0,363	0,056	0,001	59,113	0,881	0,101	0,002
15	43,620	0,925	0,104	0,002	55,799	1,113	0,118	0,016
16	27,212	0,386	0,058	0,001	14,485	1,404	0,138	0,021
17	50,352	1,147	0,120	0,006	71,154	0,611	0,079	0,020
18	67,888	1,448	0,140	0,006	10,485	1,921	0,170	0,012
19	31,596	0,387	0,058	0,025	60,456	0,598	0,078	0,026
20	7,484	1,978	0,173	0,001	41,799	2,221	0,187	0,001
21	26,836	1,134	0,119	0,015	10,828	0,780	0,093	0,060
22	4,650	0,331	0,053	0,001	7,828	0,413	0,061	0,042
23	25,552	2,137	0,182	0,004	8,657	0,439	0,063	0,016
24	6,576	0,331	0,053	0,030	84,770	1,290	0,130	0,006
25	12,400	2,201	0,186	0,008	38,728	0,403	0,060	0,006
26	63,770	0,584	0,077	0,011	45,799	2,509	0,203	0,001
27	42,336	1,355	0,134	0,014	66,113	0,777	0,093	0,007
28	6,576	0,356	0,055	0,015	4,243	0,331	0,052	0,013
29	15,344	0,477	0,067	0,013	60,770	1,484	0,143	0,002
30	10,584	1,447	0,140	0,019	31,799	1,578	0,149	0,029
31	43,620	2,413	0,197	0,002	68,912	2,894	0,223	0,007
32	32,284	0,789	0,094	0,006	32,314	0,446	0,064	0,013
33	31,486	0,523	0,071	0,016	17,485	0,408	0,060	0,045
34	25,020	2,706	0,213	0,016	8,485	0,668	0,084	0,010
35	22,828	0,390	0,059	0,009	33,657	3,505	0,253	0,045
36	15,876	0,421	0,062	0,025	6,828	3,638	0,260	0,001
37	20,902	0,404	0,060	0,005	4,243	0,329	0,052	0,021
38	55,488	1,659	0,154	0,007	33,456	3,762	0,265	0,001
39	23,736	1,786	0,161	0,046	41,971	0,652	0,082	0,048
40	44,372	2,806	0,218	0,041	27,556	0,387	0,058	0,013
41	88,791	0,857	0,099	0,014	114,397	0,807	0,095	0,022

42	30,202	0,412	0,061	0,063	10,828	0,606	0,079	0,032
43	18,334	0,377	0,057	0,011	20,728	0,401	0,060	0,027
44	18,444	0,382	0,058	0,027	60,527	0,483	0,068	0,026
45	13,152	0,588	0,077	0,015	53,941	1,125	0,119	0,013
46	33,568	3,579	0,257	0,057	44,799	0,473	0,067	0,008
47	69,172	1,177	0,122	0,014	61,113	3,937	0,274	0,008
48	20,260	0,490	0,068	0,020	28,627	1,382	0,136	0,018
49	58,965	0,569	0,075	0,019	19,899	0,353	0,055	0,003
50	55,488	1,493	0,143	0,013	2,000	0,012	0,006	0,012
51	79,977	3,791	0,267	0,001	60,799	0,536	0,072	0,023
52	87,617	0,568	0,075	0,005	21,071	0,442	0,064	0,019
53	42,602	0,465	0,066	0,014	23,314	4,045	0,279	0,020
54	6,200	3,888	0,271	0,010	21,485	0,491	0,068	0,058
55	40,365	0,485	0,068	0,017	90,912	4,222	0,287	0,004
56	14,968	1,676	0,155	0,027	100,711	1,786	0,161	0,009
57	18,068	1,854	0,166	0,006	11,828	0,451	0,065	0,053
58	51,370	0,504	0,069	0,023	19,314	4,298	0,290	0,058
59	17,050	0,360	0,056	0,029	31,213	0,466	0,066	0,005
60	23,736	3,980	0,276	0,051	32,142	1,938	0,171	0,015
61	59,341	2,040	0,176	0,010	2,828	0,050	0,015	0,007
62	12,134	0,351	0,055	0,041	54,941	0,542	0,073	0,025
63	83,609	4,156	0,284	0,006	49,456	4,391	0,294	0,007
64	21,168	2,129	0,182	0,024	16,657	0,496	0,069	0,033
65	67,622	0,524	0,071	0,033	126,539	0,758	0,091	0,015
66	25,818	0,531	0,072	0,023	18,485	5,255	0,332	0,050
67	22,452	4,257	0,288	0,036	5,000	0,331	0,052	0,012
68	30,844	0,416	0,061	0,032	32,627	5,295	0,333	0,019
69	41,052	4,343	0,292	0,019	119,882	5,189	0,329	0,009
70	8,768	4,486	0,298	0,091	31,213	0,516	0,071	0,002
71	31,752	2,270	0,189	0,019	52,284	5,464	0,340	0,022
72	28,386	0,408	0,060	0,032	21,556	5,532	0,343	0,002
73	4,384	0,030	0,011	0,091				
74	20,636	5,358	0,336	0,044				
75	10,960	0,360	0,056	0,027				
76	30,312	0,497	0,069	0,003				
77	50,838	0,654	0,083	0,012				
78	89,809	5,430	0,339	0,001				
79	29,936	5,548	0,344	0,003				
80	37,796	0,419	0,061	0,021				
81	82,591	0,502	0,069	0,004				
82	29,560	5,611	0,346	0,014				

ANEXO 2 – FIGURAS DA DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES SIMULADAS

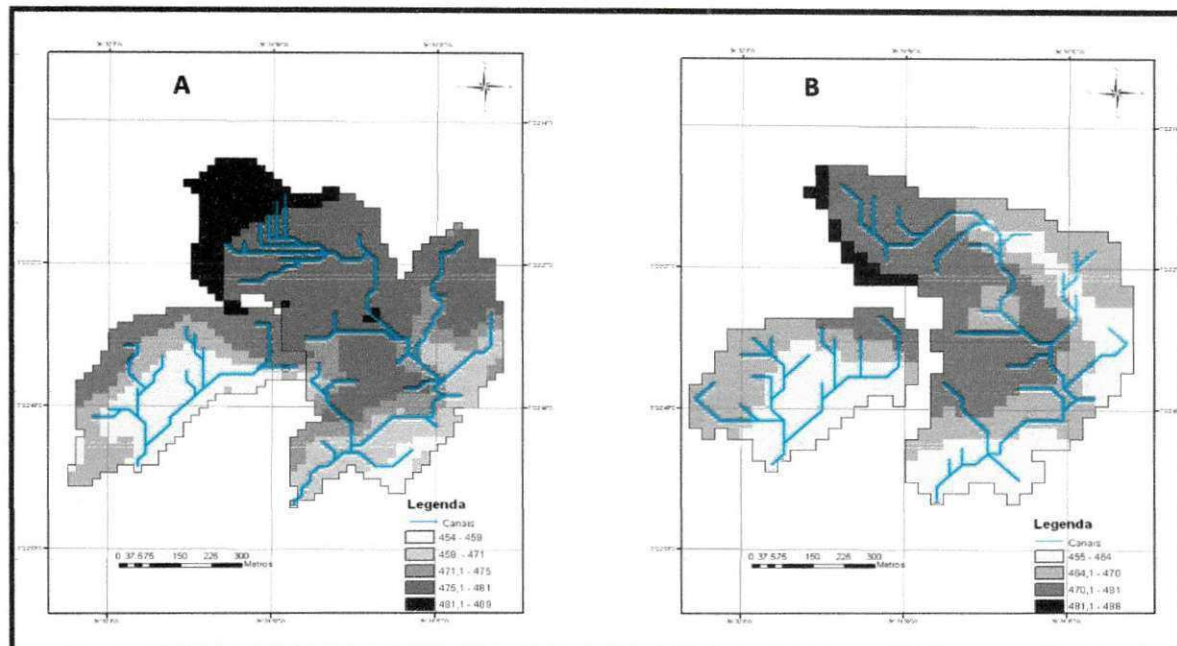


Figura 1 Mapa da distribuição das elevações pelo MDE interpolado(A) e pelo MDE ASTER (B) nas sub-bacias delimitadas

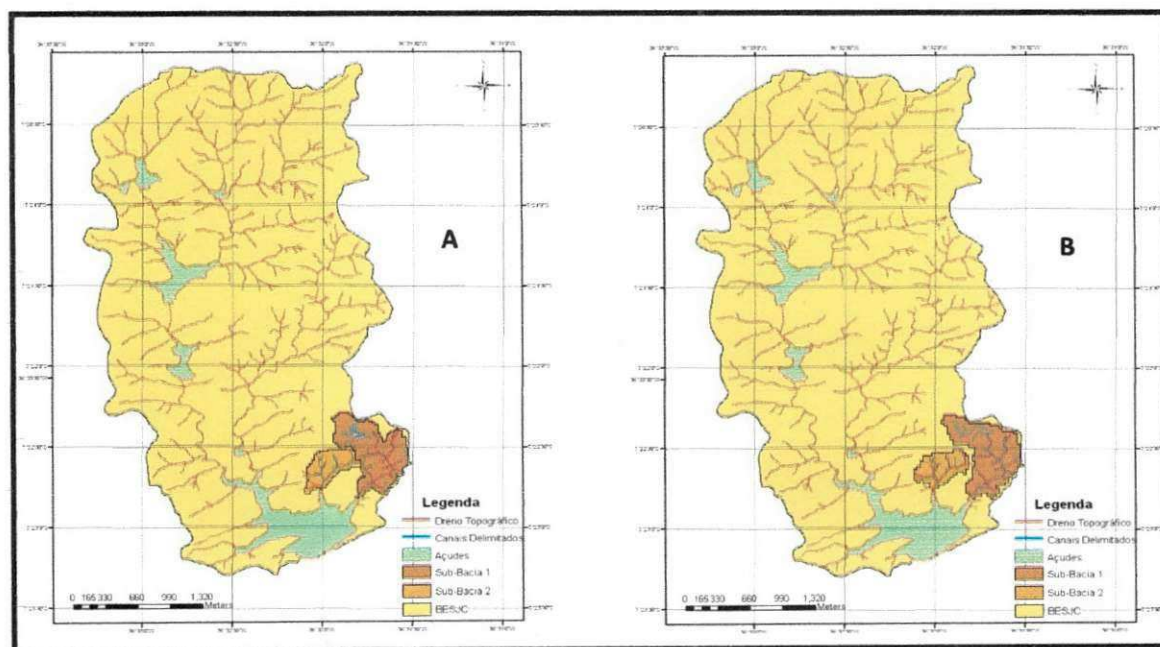


Figura 2 Mapa da localização das sub-bacias delimitadas pelo MDE interpolado (A) e pelo MDE ASTER (B) inseridas na Bacia do Riacho dos Namorados

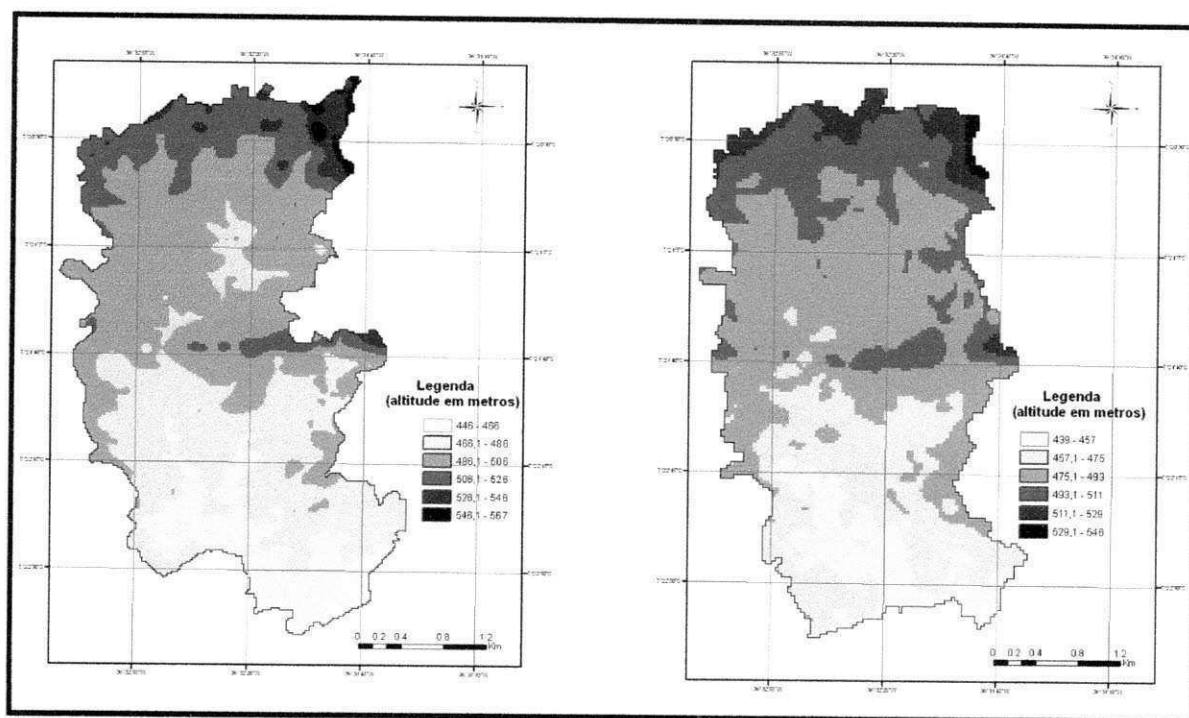


Figura 3 Mapa do intervalo de altitude da delimitação com MDE interpolado (A) e com o MDE ASTER (B)

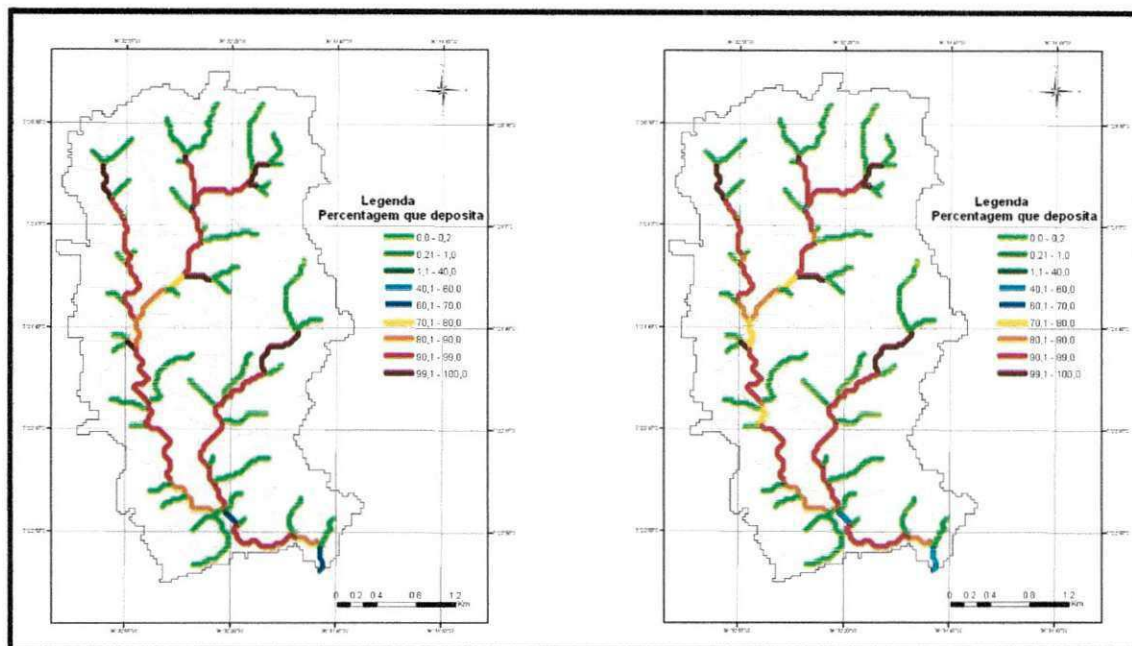
ANEXO 3 – MAPAS DE ASSOREAMENTO PELO MDE ASTER

Figura 1 Mapa do assoreamento no cenário 1 (A) e no cenário 2 (B) pelo MDE ASTER, entre 1988 a 2006

ANEXO 4 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PARA OS CENÁRIOS DA BACIA DO RIACHO DOS NAMORADOS

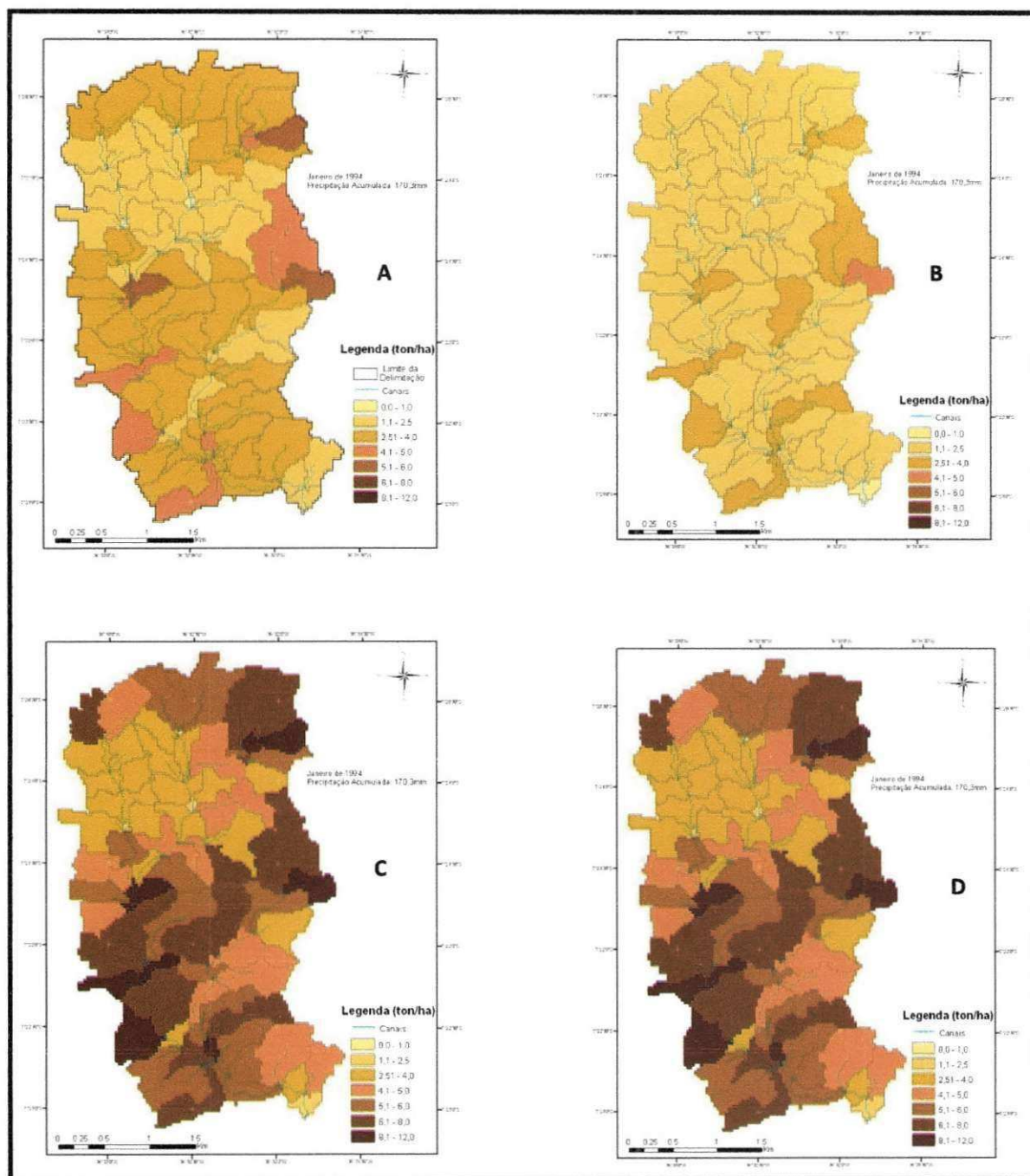


Figura 1 Mapa do aporte de sedimentos para Janeiro de 2004 no cenário 3 (A), coberto por "range brush", no cenário 4 (B), coberto por algaroba, no cenário 5 (C), coberto por milho e no cenário 6 (D), sem cobertura, pelo MDE ASTER