



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Geografia
Programa de Pós-Graduação em Geografia

Dissertação de Mestrado

**MODELAGEM DA RESPOSTA HIDROLÓGICA
ÀS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA
NA BACIA DO BARRO BRANCO/SÃO JOSÉ DE UBÁ - RJ**

Christiane Stefany Brazão Pinto

Rio de Janeiro

2014

CHRISTIANE STEFANY BRAZÃO PINTO

MODELAGEM DA RESPOSTA HIDROLÓGICA
ÀS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA
NA BACIA DO BARRO BRANCO/SÃO JOSÉ DE UBÁ - RJ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como pré-requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof^o. Dsc. NELSON FERREIRA FERNANDES

Co-Orientador: Dsc. SILVIO BARGE BHERING

Rio de Janeiro

2014

CHRISTIANE STEFANY BRAZÃO PINTO

MODELAGEM DA RESPOSTA HIDROLÓGICA
ÀS MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA
NA BACIA DO BARRO BRANCO/SÃO JOSÉ DE UBÁ - RJ

Aprovada em março de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dsc. NELSON FERREIRA FERNANDES – Orientador
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dsc. SILVIO BARGE BHERING – Co-orientador
Embrapa Solos

Prof^o. Dsc. MANOEL COUTO FERNANDES
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dsc. AZENETH EUFRASINO SCHULER
Embrapa Solos

Rio de Janeiro

2014

RESUMO

A produção de sedimentos por erosão dos solos é um importante processo hidrossedimentológico que ocorre em bacias hidrográficas. A produção, o transporte e a deposição de sedimentos são diretamente influenciados pelo escoamento superficial e pelo uso e manejo da terra. Sendo assim, no presente trabalho, buscou-se realizar uma análise espacial dos aspectos hidrológicos na Bacia do Córrego Barro Branco por meio do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tools*). A modelagem de processos hidrológicos na escala de bacia hidrográfica vem se constituindo em uma importante ferramenta para simulação da vazão. Para as simulações, o modelo usa um banco de dados constituído de informações geográficas, pedológicas, hidrológicas e climáticas, e como saída de dados o modelo gera tabelas e mapas. Em análise gráfica, observou-se que, antes da calibração, as vazões mínimas estimadas ficaram abaixo das observadas, porém as vazões de pico eram superestimadas. Após a calibração, as vazões mínimas tiveram melhores correlações, enquanto as vazões de pico foram subestimadas. Os resultados das simulações foram comparados com os dados observados experimentalmente para a vazão durante o ano de 2008. Para validar a previsão do modelo, foi utilizado o coeficiente de Nash e Sutcliffe – COE, entre os dados simulados e experimentalmente observados. O COE para a vazão foi de 0,75, classificado como satisfatório e com comportamento próximo do observado. O modelo SWAT foi capaz de simular vazões na bacia hidrográfica do Barro Branco, desde que não houvesse muitas falhas nos dados monitorados, sendo capaz inclusive de simular dados de outros períodos para os quais os parâmetros não foram ajustados.

Palavras-chave: *Bacia Hidrográfica, Modelos Hidrológicos, Conservação de Água e Solo, SWAT.*

ABSTRACT

The sediment yield by soil erosion process is an important hydrosedimentological process which has taken place in drainage basins. The soil erosion is directly influenced by surface hydrological processes and land management practices, through the sediment production, transport and deposition. In this work the spatial distribution of sediment yield was analyzed in the Barro Branco watershed by SWAT (Soil and Water Assessment Tools) model. The modeling of hydrological processes at catchment scale has shown to be an important tool for simulating the flow. In order to carry out the simulations, the model employs a spatial basin databank, made up of geographical, pedological, hydrological and climate information, and as output data the model generates tables and maps. In graphical analysis, it was observed that before to calibration, the estimated minimum flows were below those observed, but the peak flows were overestimated. After calibration, the minimum flows had better correlations, while the peak flows were underestimated. The results of the simulation were compared to the stream flow data experimentally observed in the year 2008. In order to validate the model prediction, the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NS) was adopted between simulated and experimentally observed data. The NS for flow was 0.75, classified as satisfactory and close to the value observed. The SWAT model was able to simulate flow in the river basin of Barro Branco, since there were not many gaps in the monitored data, and also being able to simulate data from other periods for which the parameters were not adjusted.

Key-words: Watershed, Hydrologic Models, Water and Soil Conservation, SWAT.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01 Ciclo hidrológico.	4
Figura 02 Zona saturada e não saturada do subsolo.	5
Figura 03 Esquema do desenvolvimento histórico do SWAT e algumas das suas adaptações ao longo do tempo.	18
Figura 04 Resentação do modelo hidrológico do SWAT utilizando alguns componentes.	21
Figura 05 Localização do município de São José de Ubá e Drenagem da bacia do Rio São Domingos.	26
Figura 06 Localização e fotos da estação pluvio-fluvio-sedimentológica e vertedouros instalados na bacia do Barro Branco.	27
Figura 07 Precipitação mensal na sub-bacia do Barro Branco.	28
Figura 08 Balanço Hídrico para o Município de São José de Ubá (RJ).	29
Figura 09 Mapa Geológico da Sub-bacia de Barro Branco.	30
Figura 10 Geologia da Bacia do Córrego Barro Branco.	31
Figura 11 Geomorfologia da Bacia do Córrego Barro Branco.	31
Figura 12 Perfil longitudinal do córrego Barro Branco.	33
Figura 13 Mapa Pedológico da Bacia do Córrego Barro Branco.	34
Figura 14 Mapa de Uso do Solo da Sub-bacia de Barro Branco.	35
Figura 15 Fluxograma metodológico.	38
Figura 16 Hipsometria da Bacia do Córrego Barro Branco.	40
Figura 17 Mosaico da imagem WorldView-2 R(5) G(3) B(2).	41
Figura 18 Fluxograma metodológico do PDI para de mapeamento de uso e cobertura da terra.	42
Figura 19 Relação entre a vazão e a precipitação no método SCS de Curva de Número.	49
Figura 20 Base de dados requerido pelo SWAT.	51
Figura 21 Planos cartográficos para gerar as URHs.	52

Figura 22	Ferramenta de processamento dos dados e janela de estabelecimento de parâmetros e processamento da simulação.	53
Figura 23	Janela de processamento dos dados e janela com mensagem de finalização do processamento da simulação.	53
Figura 24	Análise de sensibilidade para escolha dos parâmetros de calibração.	56
Figura 25	Série de dados de precipitação e vazão utilizados nas etapas da modelagem.	60
Figura 26	Dados gerados pelo WGEN.	63
Figura 27	Segmentação multirresolução nos níveis 1 e 2.	66
Figura 28	Descritores espectrais para as classes de florestas, estradas e água.	67
Figura 29	Resultados preliminares da classificação automática.	68
Figura 30	Edição e finalização do vetor.	68
Figura 31	URH representativa dos solos, parâmetro atribuído pelo SWAT.	70
Figura 32	Gráfico de precipitação e vazão (sem calibração).	75
Figura 33	Gráfico de precipitação e vazão após calibração.	76
Figura 34	Diagrama de dispersão entre a vazão diária observada e simulada.	77
Figura 35	Diagrama de dispersão entre a vazão diária observada e validada.	79
Figura 36	Validação da vazão após a calibração do modelo.	80

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 01 Análise dos modelos matemáticos quanto às escalas e limitações.	12
Tabela 02 Aplicações do SWAT no Brasil e no mundo.	25
Tabela 03 Morfometria da Bacia do Córrego Barro Branco.	32
Tabela 04 Parâmetros físicos dos solos da Bacia do Córrego Barra Branco.	45
Tabela 05 Classificação dos grupos hidrológicos.	46
Tabela 06 Parâmetros mensais requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.	48
Tabela 07 Relação de parâmetros calibráveis na simulação da vazão.	54
Tabela 08 Intervalo dos valores dos índices estatísticos e sua classificação quanto ao desempenho do modelo	62
Tabela 09 Dados climatológicos inseridos no modelo.	64
Tabela 10 Distribuição dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.	69
Tabela 11 Intervalos, valores iniciais e valores adotados para calibração dos parâmetros.	71
Tabela 12 Parâmetros e valores adotados para validação dos parâmetros.	78
Tabela 13 Índices estatísticos obtidos na avaliação da calibração e validação do modelo.	79

SUMÁRIO

1. Introdução e Objetivos	1
2. Discussão Bibliográfica	4
2.1 O ciclo hidrológico e a água no solo	4
2.2 A bacia hidrográfica como recorte espacial	7
2.3 Manejo dos solos e erosão na escala de bacia hidrográfica	9
2.4 Modelagem matemática, Geoprocessamento e SIGs	10
2.5 Modelos hidrológicos e de produção de sedimentos	11
2.6 O Modelo SWAT	16
2.6.1 Histórico do modelo	17
2.6.2 Componentes do modelo SWAT	19
2.6.3 Escala de Análise (URHs)	22
2.6.4 Diferentes aplicabilidades do SWAT	23
3. Caracterização da área de estudo	26
3.1 Localização da bacia	26
3.2 Aspectos climatológicos	28
3.3 Geologia e Geomorfologia	29
3.4 Rede de drenagem	31
3.5 Aspectos edáficos	33
3.6 Uso e cobertura da Terra	34
4. Materiais e Métodos	37
4.1 Fluxograma metodológico	38
4.2 Estruturação dos dados	39
4.2.1 Modelo Numérico do Terreno	39
4.2.2 Mapa de Uso e Cobertura da Terra	40
4.2.3 Caracterização das propriedades dos solos	43
4.2.3.1 Classificação dos grupos hidrológicos	46
4.2.4 Dados e parâmetros climatológicos	47
4.2.5 Método da Curva Número	48
4.3 Modelagem no SWAT	50
4.3.1 Sub-divisão da bacia hidrográfica	51

4.3.2 Unidades de resposta hidrológica	51
4.3.3 Simulação	52
4.3.4 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Calibráveis	53
4.3.5 Calibração e Validação dos Resultados	58
4.3.6 Análise de Desempenho do Modelo	60
5. Resultados e discussões	62
5.1 Dados climatológicos	63
5.2 Uso e cobertura da terra	65
5.3 Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia do Barro Branco	69
5.4 Calibração	70
5.5 Validação	78
6. Conclusões	81
Referências bibliográficas	82

1. INTRODUÇÃO

A produção, transporte, deposição e compactação de sedimentos são processos erosivos ou hidrossedimentológicos que ocorrem naturalmente. Os diferentes tipos de uso e manejo dos solos quando aplicados incorretamente, e associados à problemática da erosão nas cabeceiras de drenagem podem acentuar tais processos, diminuindo a produtividade dos solos e aumentando a quantidade de sedimentos acumulada ao longo do canal e no exutório de uma bacia, gerando assim problemas socioeconômicos e ambientais.

As mudanças no uso da terra são amplamente reconhecidas como aceleradores da erosão hídrica, que em excesso, nos solos produtivos, acabaria por resultar na diminuição do potencial agrícola (MONTGOMERY, 2007). Porém, além da agricultura, deve-se atentar para a pecuária, já que o gado é um importante agente de mudanças geomorfológicas devido ao pisoteio do gado que compacta o solo, reduz a infiltração, aumenta o escoamento superficial e a produção de sedimentos (TRIMBLE & MENDEL, 1995).

Esse é um cenário comum a grande parte das terras do sudeste brasileiro, em particular na Região Noroeste Fluminense, onde devido aos longos períodos de exploração agrícola, e ao desconhecimento de técnicas e práticas conservacionistas apropriadas, verifica-se acelerada degradação dos recursos naturais (solo-água-biodiversidade), resultando numa paisagem dominada por solos altamente degradados e raros fragmentos isolados de Mata Atlântica.

O uso sustentável dessas terras requer a formulação de planejamentos conservacionistas compreendendo um conjunto de tecnologias e práticas que permitam o manejo adequado do solo e da água. Para tal, destacam-se ferramentas de modelagem hidrossedimentológica capazes de prever a resposta de perda de água e sedimentos das encostas para o canal, em função do uso e cobertura da terra.

Neste sentido, a modelagem matemática e o desenvolvimento de modelos hidrológicos capazes de prever diferentes impactos no meio tornam possível a previsão da eficiência das práticas de conservação da água e do solo, simulando assim cenários reais da dinâmica na bacia hidrográfica. Tal modelagem é ferramenta eficiente

para a compreensão e estudo de diversos processos físicos e químicos que ocorrem num ambiente geograficamente delimitado.

O avanço das pesquisas sobre modelagem trouxe alguns fatores que se tornam cada vez mais essenciais para o seu uso: o conhecimento dos processos hidrológicos; o desenvolvimento dos sistemas computacionais; a inserção do Geoprocessamento e do Sensoriamento Remoto; e a necessidade de uma resposta rápida e a relativo baixo custo às alterações no uso e ocupação do solo.

A principal vantagem na aplicação de modelos reside na possibilidade de se desenvolver estudos de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica), o que torna os custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo (PESSOA *et. al.*, 1997).

Sendo assim, o presente estudo pretende abordar os principais fatores que interferem nesses processos erosivos e com que magnitude eles ocorrem no Noroeste Fluminense, sendo estes analisados com base nos resultados de vazão obtidos através do uso da modelagem matemática. Para desenvolver a análise pretendida, faz-se necessário primeiramente um levantamento na literatura a respeito das temáticas e conceitos que permeiam as questões relacionadas à modelagem matemática e aos processos erosivos, na escala de bacia hidrográfica.

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho é avaliar espacial e temporalmente o impacto dos diferentes tipos de uso e manejo dos solos na produção de sedimentos e na vazão, através da interface entre modelagem hidrossedimentológica e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

Como objetivos específicos têm-se:

1. Ampliar a compreensão sobre influências geradas por diferentes tipos de manejo/uso do solo na dinâmica dos recursos hídricos e na produção de sedimentos em bacias;
2. Através da análise de sensibilidade dos parâmetros gerar a calibração e validação do modelo, com base nos dados mensurados em campo.

Com isso, ressaltam-se as possíveis questões:

- Como o modelo SWAT responde a movimentação de água no solo? Quais os parâmetros mais sensíveis e como ajustá-los?
- Qual das práticas de conservação da água e do solo será a mais eficiente num curto espaço de tempo, através da previsão feita pelo modelo?
- Qual a influência dos diferentes tipos de uso e cobertura na variação das taxas de infiltração e no tempo de recarga dos aquíferos?
- Qual o tempo estimado necessário, através da análise dos dados gerados pelo modelo, para que ocorram reduções significativas na produção de sedimentos para a bacia como um todo e para cada um dos diferentes tipos de uso?

A inovação desta proposta está vinculada à abordagem integrada que inclui a caracterização das propriedades físico-hídricas dos solos e o emprego de modelos hidrossedimentológicos de distribuição e ocorrência. Os dados climatológicos já gerados e disponíveis para a região e o mapa de uso das terras serão aplicados no modelo como base de dados essenciais para simulação.

2. DISCUSSÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - O ciclo hidrológico e a água no solo

O ciclo hidrológico pode ser considerado como fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. A melhor compreensão desse ciclo é possível a partir da visão do mais amplo para o mais direcionado, como abordado por Libardi (2005) quando diz que o balanço hídrico pode ser estudado em várias escalas.

Na escala global tem-se a circulação da água entre a Terra e a atmosfera, já em escala local, de bacia hidrográfica, os processos já podem ser mais bem detalhados. Quando a água alcança a superfície do terreno a partir da precipitação, ela pode exceder a capacidade de infiltração do solo, ocorrendo o escoamento superficial pela ação da gravidade (Figura 01).

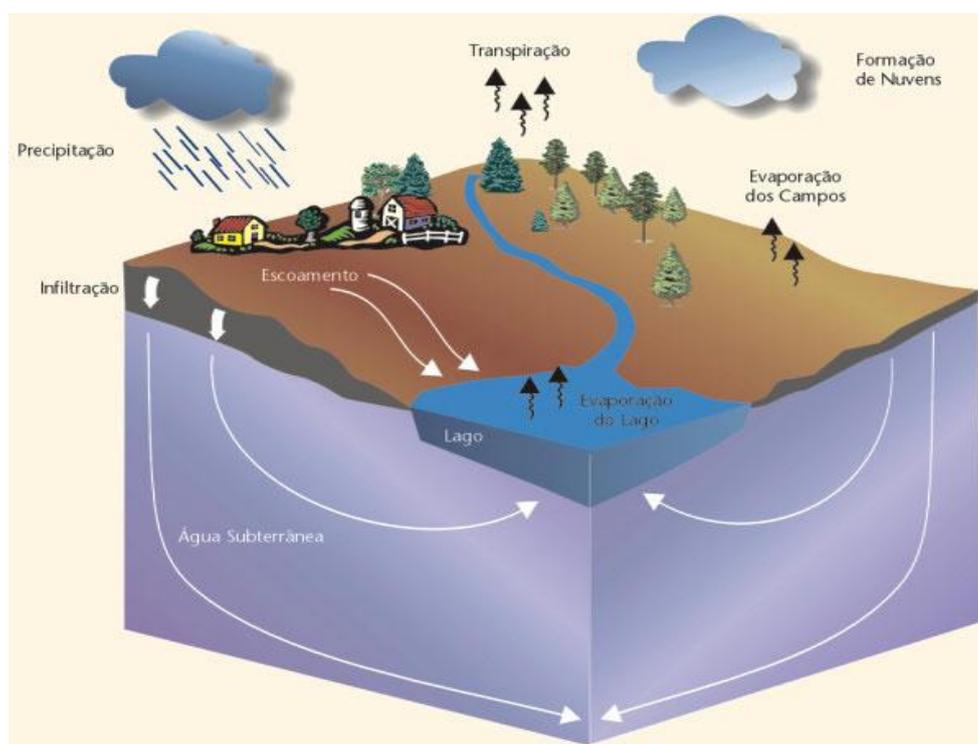


Figura 01: Ciclo hidrológico (Fonte: Instituto Geológico e Mineiro, 2001).

Mas esta descrição do ciclo hidrológico fornece uma imagem simplificada, uma vez que dentro deste ciclo existem vários subciclos: a parte referente à água subterrânea é um desses subciclos, que terá o seu início com a chegada da água à superfície terrestre, seguindo-se a sua infiltração e terminando com o retorno destas águas à superfície. Desde que a água chega à superfície terrestre e se infiltra, atravessa várias zonas com diferentes características e comportamentos, conforme a Figura 02.

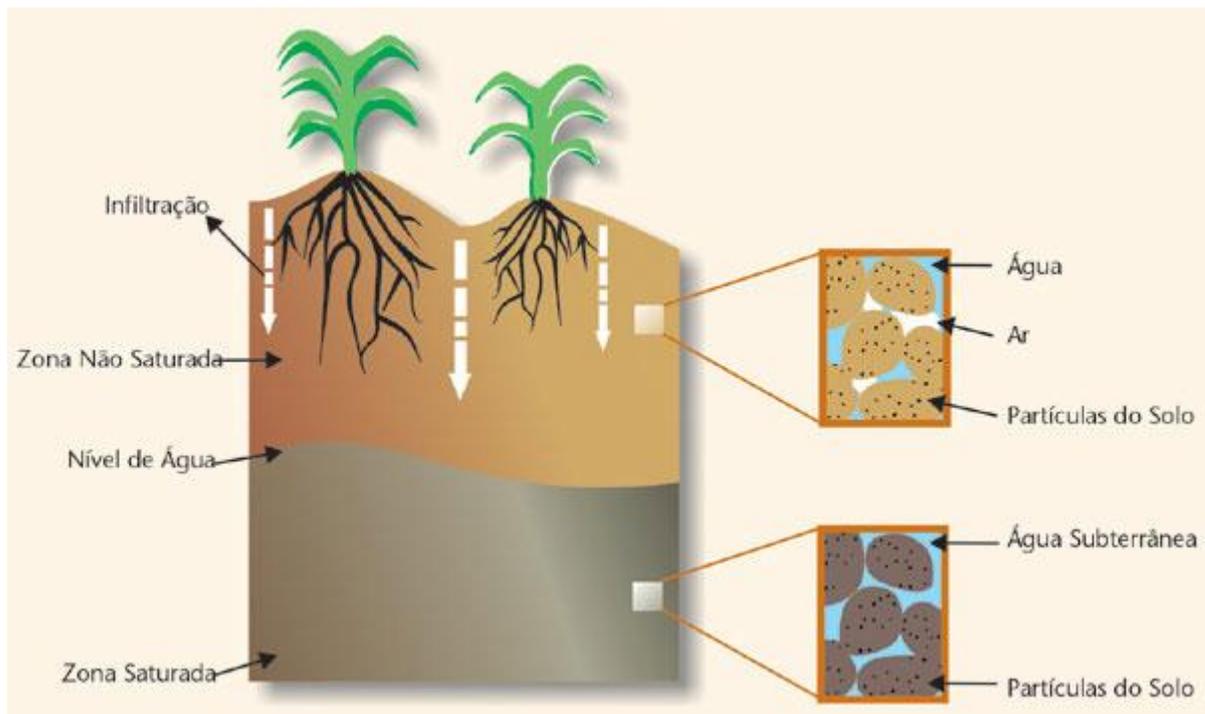


Figura 02: Zona saturada e não saturada do sub-solo (Fonte: Instituto Geológico e Mineiro, 2001).

Assim, a partir da superfície para o interior da Terra tem-se:

- Zona de evapotranspiração (ZET): nesta zona, alguma água pode ser sujeita a evapotranspiração direta para a atmosfera, outra pode ser usada no metabolismo das plantas (fotossíntese) e outra pode continuar a descer. A espessura desta zona é de aproximadamente 2 metros, podendo variar com a capacidade das plantas desenvolverem as suas raízes;
- Zona intermédia (ZI): chega até esta zona a água que não é utilizada na evapotranspiração. Sempre que a quantidade de água infiltrada for inferior à quantidade de água necessária para a evapotranspiração, não passará água para a zona intermédia.

Por outro lado, sempre que a quantidade de água for superior à quantidade de água necessária para a evapotranspiração, este excesso passará para a zona intermédia, deixando de estar disponível para a evapotranspiração. A espessura desta zona depende de vários fatores, sendo por isso muito variável;

- Franja capilar (FC): corresponde a uma faixa estreita, na qual a água pode ter movimento descendente, por ação da força de gravidade, e movimento ascendente, por ação das forças de capilaridade entre partículas adjacentes. Trata-se de uma zona em que a água está em movimento constante;

- Zona saturada (ZS): Toda a água que passa pela franja capilar descende lentamente, até a chegada à zona de saturação, juntando-se à água aí existente e aumentando a quantidade de água armazenada, ou passando a deslocar-se integrada no deslocamento de água subterrâneo desta zona.

Na zona saturada, não existem espaços preenchidos por ar, daí a sua designação de saturada, já nas zonas mais superficiais (ZET, ZI e FC), além da matéria sólida e da água, também existem pequenos espaços preenchidos por ar. Por isso, ao conjunto destas três zonas, denomina-se zona de aeração. O limite entre a franja capilar e a zona saturada não é um limite estático, verificando-se a sua variação mais significativa em função das condições meteorológicas locais e da quantidade de água que se consegue infiltrar.

A quantidade de água existente nestas diferentes zonas é máxima na zona saturada (todos os espaços estão preenchidos por água), mínima nas zonas evapotranspiração e intermediária na franja capilar. Esta quantidade de água varia ainda entre um mínimo, no contacto com a zona intermédia, e um máximo, no contacto com a zona saturada.

Esta abordagem converge com o que é analisado por Reichardt (1987) sobre a relação do ciclo hidrológico com os processos erosivos, onde diz que parte da água ao atingir a superfície do solo se infiltra e outra parte pode desencadear o escoamento superficial, sendo este um dos processos responsáveis pela erosão do solo. Porém, se a capacidade de armazenamento da água que infiltrou for ultrapassada, o excesso percolará para horizontes mais profundos contribuindo para a recarga de aquíferos subterrâneos.

O escoamento em uma bacia hidrográfica pode vir de quatro linhas de fluxos diferentes, sendo estas: a) precipitação direta nos canais; b) escoamento superficial; c) escoamento subsuperficial; d) escoamento subterrâneo (HORNBERGER *et. al.*, 1988). Enfatizando o escoamento superficial, dois clássicos modelos hidrológicos conceituais se legitimaram, um na explicação de fluxos gerados em áreas de baixa permeabilidade, Hortoniano e, outro em áreas de alta permeabilidade onde as condições específicas do relevo o favorecem, o Dunniano.

A geração de escoamento superficial hortoniano (escoamento por exceder a capacidade de infiltração) possui como determinante a condição do solo na superfície, responsável pela distribuição da água para infiltração ou escoamento superficial (DUNNE & LEOPOLD, 1978; MANNING, 1992). É considerado dominante em sistemas onde o perfil do solo ou a superfície do terreno foram radicalmente alterados (p.e. bacias agrícolas), em regiões áridas ou semi-áridas onde a densidade de vegetação é baixa, e em áreas urbanas onde a superfície do solo é pouco permeável devido à pavimentação ou outro tipo de construção (SANTOS, 2009).

Quando a absorção da água pelo solo chega ao limite máximo é atingida a capacidade de infiltração do solo, ativando a produção de escoamento superficial (HEWLETT, 1982; FETTER, 1988). Sendo assim, o ciclo hidrológico atua como agente modelador da crosta terrestre devido à erosão, ao transporte e deposição de sedimentos por via hidráulica, condicionando a cobertura vegetal e, de modo mais genérico, toda a vida na terra.

2.2 - A bacia hidrográfica como recorte espacial

As características físicas e bióticas de uma bacia hidrográfica desempenham papel de fundamental importância nos processos do ciclo hidrológico, exercendo influência na infiltração, no deflúvio, na evapotranspiração e nos escoamentos superficial e subsuperficial. A geomorfologia e o relevo propriamente ditos agem sobre a taxa de deflúvio, isto é, sobre o regime de produção de água, conseqüentemente sobre a taxa de sedimentação. O padrão de drenagem da bacia, ou seja, o caráter e extensão de seus canais exercem influência sobre a disponibilidade de sedimentos e a taxa de formação do deflúvio (TONELLO *et. al.*, 2006). A estrutura geológica também exerce influência e controle sobre as características físicas da bacia hidrográfica.

O caráter e a extensão dos canais fluviais afetam a disponibilidade de sedimentos, bem como a taxa de formação do deflúvio, e variam em função das características físicas da bacia hidrográfica, que por sua vez são, em grande parte, controladas ou influenciadas pela estrutura geológica. Portanto, o entendimento deste contexto e dos processos atuantes em determinadas áreas é de suma importância, podendo ser apreendido por pesquisas flúvio-morfométricas do comportamento da rede de drenagem, esclarecendo questões da morfogênese e morfodinâmica da paisagem.

A avaliação do efeito das mudanças no uso e cobertura da terra para a hidrologia de bacias de drenagem é essencial para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis aos recursos hídricos. O entendimento de como a mudança em cada classe do uso e cobertura da terra influencia nos componentes hidrológicos pode aprimorar significativamente a predição de perdas por erosão e assim auxiliar a melhor tomada de decisão. Entretanto, dado o limitante da disponibilidade de mapas digitais de uso e cobertura do solo e simulações de mudanças considerando diversas classes, é difícil quantificar os impactos da mudança de cada uma delas para a hidrologia.

As discussões ambientais sempre atentam para o fato de o recurso hídrico ser um bem não renovável e importante para todas as formas de vida no planeta, sendo assim, a garantia de um uso sustentável e consciente tornou-se essencial. A ocupação de uma bacia hidrográfica deve seguir um planejamento ambiental, para evitar que o uso crescente da água e a ocupação em áreas de risco de inundação tragam consequências ao meio. A tendência atual envolve o desenvolvimento sustentável da bacia hidrográfica, que considera o uso racional dos recursos com o mínimo de degradação e dano ao meio ambiente (TUCCI, 1997).

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema geomorfológico aberto e, como tal, se encontra, mesmo quando não perturbada, em contínua flutuação, num estado de equilíbrio dinâmico. O seu comportamento hidrológico varia em função de características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, dentre outros), atuando sobre a taxa de produção de água e sedimentos (LIMA, 1986).

As redes de drenagens fluviais sempre tiveram um papel central nos estudos hidrológicos, procurando compreender a ocorrência, distribuição e movimentação da água; assim como nos estudos geomorfológicos, pois se constituem em um dos processos morfogenéticos mais ativos na composição das paisagens terrestres.

Análises como estas se tornaram consistentes devido às ideias de Horton e Strahler, que desenvolveu um grupo de leis chamado “Leis da Composição de Drenagem” obtido através da análise morfométrica, contribuindo especialmente na técnica de ordenação de canais que é o primeiro passo para uma análise morfométrica de bacias hidrográficas.

2.3 - Manejo dos solos e erosão na escala de bacia hidrográfica

Os processos hidrológicos, direta e indiretamente, afetam a erosão do solo, o transporte de sedimentos erodidos, a deposição de sedimentos e as características físicas, químicas e biológicas que coletivamente determinam a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Práticas de manejo de bacias hidrográficas e uso da terra também afetam diretamente a erosão, sedimentação e qualidade da água, pelas variações nos processos hidrológicos (BROOKS *et. al.*, 1991).

A definição de bacia hidrográfica aqui utilizada será a de área de captação natural de águas provenientes das chuvas que drenam para uma única saída, sendo constituída de vertentes, topos ou cristas e fundos de vales, canais e corpos de água subterrânea, tendo seus limites superficiais definidos pelos interflúvios ou divisores de água (DUNNE & LEOPOLD, 1978; COELHO NETTO, 1995; SILVEIRA, 2004).

Uma das principais preocupações em todo o vasto leque de disciplinas referentes ao estudo de bacias é a grande variação nos padrões espaciais e temporais de erosão, transporte de sedimentos, assim como seu armazenamento e produção. Grande parte da teoria que envolve as relações entre estes processos erosivos tem sido desenvolvida a partir de estudos de pequenas áreas durante períodos de tempo curtos (CAMPBELL, 1992).

As variações espaciais e temporais da erosão na bacia podem aparecer associadas às condições socioeconômicas e apresentam relação direta com a ação antrópica já que esta aparece como um dos fatores responsáveis por acelerar ou retardar os processos erosivos nos solos, através do tipo de uso e manejo (GUERRA & CUNHA, 1995). Segundo Brady (1989), a erosão é o fenômeno mais destrutivo em âmbito mundial, trazendo consequências como a perda de solos agricultáveis, o assoreamento de cursos de água e reservatórios, provocando catástrofes como a poluição destes.

A produção de sedimentos pela erosão do solo se destaca dentre os processos hidrológicos modelados atualmente e esta deve ser analisada quanto a sua distribuição espacial. Esta análise torna-se viável através do uso de um conjunto de tecnologias e práticas que auxiliem a adoção de técnicas agrícolas de manejo sustentável do solo e da água.

2.4 – Modelagem matemática, Geoprocessamento e SIGs

As mudanças que ocorreram na Geografia, bem como nas ciências nas décadas de 1960 e 1970, trouxeram consigo mudanças no uso de modelos e leis. Até este período predominavam na Hidrologia leis que descreviam os componentes dos ciclos hidrológicos e da erosão dos solos, tais como a Lei de Darcy, a Equação Universal de Perda do Solo (USLE), e o modelo Hortoniano de infiltração; com o avanço das pesquisas na modelagem, surgiram as definições e classificações dos modelos que serão aqui apresentadas.

As bases para o uso de modelos na Geografia Física foram lançadas por Hagget e Chorley (1967) que os definiam como uma estruturação simplificada da realidade que apresentaria, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos foram posteriormente definidos por Kirkby e Beven (1979) como uma abstração da realidade, que era utilizada na Geografia de forma quantitativa através de equações matemáticas, geralmente por meio de sistemas computacionais. Ele ainda classificou-os em três tipos diferentes: modelos de caixa preta, modelos de balanço de massa e energia e modelos estocásticos.

Os processos que contribuem para as saídas do sistema modelado foram evidenciados por Singh (1995) quando ele classificou os modelos em concentrados, que analisam os processos em seu conjunto sem se preocupar com as variações espaciais; e em distribuídos, que levam em consideração a variabilidade espacial dos componentes e dos valores das variáveis existentes na bacia hidrográfica analisada. Ambos os modelos, concentrados ou distribuídos, podem ainda ser classificados como contínuos ou baseados em eventos isolados, dependendo da escala de tempo.

Na prática, segundo Christofolletti (1999) e Tucci (2004), não há nenhum modelo puramente distribuído porque existem limitações na obtenção de dados de campo e

dados experimentais que acabam por concentrar a análise numa pequena subdivisão dentro da bacia.

A modelagem hidrossedimentológica na escala de bacias hidrográficas, realizada através de alguns modelos, como o SWAT, é uma importante ferramenta utilizada na avaliação de processos hidrológicos e da produção de sedimentos permitindo prever problemas como a deterioração dos solos e a diminuição de áreas agricultáveis.

2.5 – Modelos hidrológicos e de produção de sedimentos

A modelagem matemática e o desenvolvimento de modelos hidrológicos capazes de prever diferentes impactos no meio são de suma importância para auxiliar a tomada de decisões e possíveis mudanças de cenários. Essa modelagem aparece como ferramenta eficiente para a compreensão e estudo de diversos processos físicos e químicos que ocorrem num ambiente geograficamente delimitado.

A principal vantagem na aplicação de modelos reside na possibilidade de se desenvolver estudos de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada ao seu baixo custo: na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é de ordem de grandeza inferior ao correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica), o que eleva os custos operacionais relativos às pesquisas de campo (PESSOA *et. al.*, 1997).

Os modelos comumente utilizados pela ciência dos solos voltados para erosão, impactos e produção de sedimentos possuem grande potencial para serem utilizados no planejamento racional e/ou sustentável dos recursos naturais. A maior limitação ao uso de modelos é a dificuldade em obter e tabular corretamente grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais.

Por essas razões, Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são empregados na criação do Banco de Dados Geográficos (BDG) desses modelos. No SIG, as sucessivas análises dos dados espaciais podem dividir grandes áreas heterogêneas em pequenas

unidades hidrologicamente homogêneas, sobre as quais os modelos são aplicados (TIM, 1994).

A união entre modelagem hidrológica e SIG's, a partir de 1990, evoluíram para o ponto em que as vantagens de cada sistema podem ser totalmente integradas dentro de uma poderosa ferramenta para análise em bacias hidrográficas (MACHADO, 2002). A flexibilidade do SIG, no presente caso o ArcGIS, integrado ao modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) oferece novas perspectivas para a implementação de políticas ambientais com o objetivo de reduzir o impacto de atividades antrópicas sobre bacias hidrográficas.

Assim como o SWAT, outros modelos surgiram ao longo dos anos tentando atender a diferentes escalas espaciais e temporais, abordando saídas de dados específicas e que atendessem as necessidades dos usuários. Alguns dos modelos hidrológicos ou sedimentológicos mais utilizados estão resumidos na Tabela 01.

Tabela 01: Análise dos modelos matemáticos quanto às escalas e limitações.

MODELO	TIPO	ESCALA	SAÍDA DE DADOS	LIMITAÇÃO	REFERÊNCIA
<u>USLE</u>	Empírico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Erosão do solo	Não é preciso para simulação de único evento chuvoso; não estima deposição, carga de sedimentos e erosão no canal ou em voçorocas.	WISCHMEIER & SMITH (1978)
<u>SWRRB</u>	Físico	Bacia Hidrográfica	Produção de sedimentos, propagação de nutrientes e pesticidas por sub-bacia	Não simula erosão para eventos isolados de chuva.	WILLIAMS <i>et. al.</i> (1985)
<u>EPIC</u>	Físico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Produção de sedimentos	Não simula escoamento sub-superficial.	WILLIAMS <i>et. al.</i> (1984)

<u>CREAMS</u>	Físico	Bacia de 40 a 400 ha	Produção de sedimentos e qualidade da água	Não fornece informações durante a chuva; a hidráulica do fluxo é aproximada para o fluxo gradualmente variado.	KNISEL (1980)
<u>WEPP</u>	Físico	Encosta e Bacia Hidrográfica	Escoamento e produção de sedimentos	Na escala de bacia é limitado devido à elevada necessidade de dados; não simula erosão para voçorocas.	FOSTER (1987)
<u>SWAT</u>	Físico	Bacia Hidrográfica	Erosão/produção de sedimento e qualidade da água em forma de mapas e gráficos	Não simula erosão para eventos isolados de chuva; indisponibilidade para grandes bacias; assume a dimensão do canal como estática ao longo da simulação	ARNOLD & SRINIVASAN (1995)

Existem também modelos matemáticos que buscam estimar taxas de erosão ou produção de sedimentos, nas mais diversas escalas espaciais e temporais. Boardman (2006) aponta que os modelos são importantes para identificar áreas em que as taxas de erosão excedem os limites aceitáveis, estimar a perda de sedimentos em locais onde não existe disponibilidade de dados relacionados ao processo erosivo e prever futuras taxas de erosão de acordo com mudanças nas condições do clima ou do uso do solo.

O referido autor também relata alguns problemas relacionados à aplicação de modelos em estudos erosivos, como o alto custo de desenvolvimento, a complexidade e

dificuldade de aplicação por parte dos usuários, a carência de dados requeridos para o funcionamento do modelo, assim como para sua validação.

Nesse sentido, Stroosnijder (2005) salienta que devido à alta demanda por informações e a crônica falta de bons dados, os modelos de predição da erosão geralmente usam dados que são estimados ou derivados de funções de pedotransferências. Assim, embora muitos modelos sejam classificados como determinísticos, eles poderiam ser considerados empíricos também.

Um dos modelos mais utilizados para estimar taxas de erosão é a USLE (*Universal Soil Loss Equation*) que, como explicado por Zaroni (2006), é um modelo empírico desenvolvido por Wischmeier e Smith na década de 1960, baseado em correlações entre perdas de solo obtidas em parcelas experimentais e parâmetros de erosividade, erodibilidade, topográficos, uso ou cobertura vegetal e a adoção de práticas conservacionistas.

Segundo Boardman (2006), a USLE proporciona estimativas da taxa média anual de erosão, porém como esse modelo foi desenvolvido para as condições presentes no leste dos Estados Unidos, existem sérias dificuldades para sua aplicação em áreas com características de precipitação, processos hidrológicos e diversidade da paisagem diferentes das encontradas nesse país. Outra limitação apresentada pelo autor se refere ao fato da USLE utilizar uma representação média da área de estudo traduzida através dos fatores presentes no modelo, tornando sua aplicação em bacias hidrográficas muito problemática.

Visando superar algumas dessas limitações, foram propostas versões com modificações e revisões (MUSLE e RUSLE, respectivamente) desse modelo. No entanto, as restrições dessas alterações também são bastante discutidas, principalmente no que se refere à sua dependência de dados gerados em parcelas de erosão e à sua difícil aplicação em grandes áreas por não considerarem o processo de deposição dos sedimentos, conforme discutido anteriormente.

Diante desse quadro, existem resultados bastante contrastantes na literatura quanto ao uso da USLE como meio de estimar o processo erosivo. Como exemplo, podem-se citar os trabalhos de Bacchi *et. al.* (2003) e Belyaev *et. al.* (2005) que utilizaram três métodos diferentes para avaliar a produção de sedimentos e os processos erosivos em

uma bacia hidrográfica no Brasil e na Rússia, respectivamente. Dentre esses métodos, encontrava-se a USLE.

De acordo com Zaroni (2006), embora projetada para estimar as perdas anuais de solo em encostas, Wischmeier & Smith (1978 *apud* ZARONI, 2006) associaram os resultados da USLE a um índice de transferência de sedimentos (SDR), o que permitiu incorporar no modelo a deposição de sedimentos que ocorre em sopés de encostas. Dessa forma, a USLE associada ao SDR pode ser aplicada para estimar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, principalmente com o apoio dos Sistemas Geográficos de Informação hoje disponíveis.

Esse procedimento foi realizado pela autora na Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos (BHRSD), mais especificamente, na sub-bacia hidrográfica de Santa Maria/Cambiocó. De acordo com Zaroni (2006), o modelo USLE, mesmo sendo elaborado na década de 1960, se apresentou como uma ferramenta útil na análise e diagnóstico do processo erosivo, permitindo a espacialização de áreas críticas de perdas de solo e de produção de sedimentos, subsidiando assim a implementação de um manejo conservacionista no uso das terras.

No entanto, a autora reconhece que para as estimativas quantitativas são necessárias, além da validação dos resultados, maiores pesquisas dos métodos inseridos nos modelos para o cálculo dos seus parâmetros. Além disso, por se tratar de um modelo empírico baseado em resultados de amostras locais, apresenta limitações para a extrapolação dos resultados obtidos.

De acordo com Boardman (2006), mesmo com os avanços obtidos na modelagem matemática nos últimos anos, ainda há muito para desenvolver nesse ramo, como a necessidade de integrar o trabalho de pesquisadores que se dedicam em acessar a erosão em campo com o trabalho de pesquisadores que se dedicam ao desenvolvimento de modelos e aproximar o debate dos “*experts*” com os usuários da modelagem matemática, evitando assim o uso errôneo de modelos.

Modelos hidrológicos e de qualidade da água vêm sendo desenvolvidos para prever o impacto da agricultura na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Dentre os muitos modelos que tentam exprimir a ação dos principais fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica, estão os modelos conceituais distribuídos que simulam os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico.

O presente trabalho aborda o uso dos modelos matemáticos, enfatizando o modelo de base física SWAT, por este ser uma importante ferramenta de uso global que tem provado ser eficaz para a avaliação dos recursos hídricos e dos problemas de poluição, numa ampla variação de escalas e condições ambientais.

A modelagem através do SWAT ganhou aceitação global como uma ferramenta de uso interdisciplinar e com boa aplicabilidade a nível de bacia, como evidenciado por conferências internacionais, porém alguns aspectos devem ser melhorados e sua relação com outros modelos aperfeiçoada. Nos Estados Unidos e na Europa tem crescido o interesse na modelagem do movimento de poluentes e sedimentos, integrada a SIG. No Brasil, essa poderosa combinação ainda é relativamente pouco conhecida e precisa ser difundida.

2.6 - O modelo SWAT

O SWAT é um modelo matemático, desenvolvido em 1996, pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* objetivando a análise dos impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água. É baseado em características físicas da bacia; usa dados de entrada normalmente disponíveis; é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo, e possui uma base de usuários muito grande nos países desenvolvidos (NEITSCH *et. al.*, 2005).

Ele foi originado, principalmente, do modelo SWRRB (ARNOLD *et. al.*, 1990) e possui características dos modelos CREAMS, EPIC, GLEAMS e ROTO. Ele possui oito principais componentes: hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento da vegetação, nutrientes, pesticidas e práticas agrícolas. O escoamento superficial é estimado pelo método da Curva Número e a vazão de pico pelo método Racional Modificado, já a produção de sedimentos é determinada pela Equação Universal da Perda de Solo Modificada – MUSLE.

Os resultados obtidos na caracterização das propriedades físico-hídricas dos solos são utilizados para calibração e validação do modelo. Os mapas de declividade, solos e uso e ocupação da terra são os dados de entrada iniciais ao modelo.

2.6.1 – Histórico do modelo

Num breve histórico do SWAT tem-se que ele foi originalmente proposto no início da década de 1990 por Jeff Arnold para o USDA Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) e vem sendo aperfeiçoado por ele e pelo *Soil and Water Research Laboratory* – Temple – Texas, nos Estados Unidos da América (EUA).

O SWAT incorpora recursos de vários modelos e é um descendente direto do modelo SWRRB1 - Simulador de Recursos Hídricos em Bacias Rurais. Dentre alguns modelos tem-se os que contribuíram significativamente para o desenvolvimento do SWAT: CREAMS2, GLEAMS3 e EPIC4. O desenvolvimento do SWRRB começou com a modificação da precipitação diária associada a hidrologia no modelo de CREAMS.

O foco principal do uso de modelos hidrológicos, no final da década de 1980, foi a avaliação da qualidade da água, e o desenvolvimento do SWRRB refletiu essa ênfase. Notáveis modificações foram feitas no SWRRB incorporando: o destino dos pesticidas; a tecnologia SCS opcional para estimar vazão pico; e as equações para calcular a produção de sedimentos. Essas modificações deram ao modelo maior capacidade para lidar com uma grande variedade de bacias hidrográficas, buscando a solução para problemas de gestão.

No final de 1980, o Bureau de Assuntos Indígenas necessitava de um modelo para estimar o impacto da gestão da água a jusante de terras em reserva indígena no Arizona e Novo México. O SWRRB foi facilmente utilizado para as bacias hidrográficas com algumas centenas de quilômetros quadrados de tamanho, porém não conseguia simular vazão para as bacias com alguns milhares de quilômetros quadrados. Estas limitações levaram ao desenvolvimento de um modelo chamado ROTO – *Routing Outputs to Outlet*, que utilizou-se das respostas do SWRRB e simulou novamente vazão e sedimentos através de canais e reservatórios. Tal programa superou as limitações do SWRRB que passou a simular o fluxo independente do ROTO e vice-versa. Para superar o embaraço deste acordo, SWRRB e ROTO foram fundidos no início dos anos 1990 em um único modelo, denominado SWAT, como pode ser visto na Figura 03.

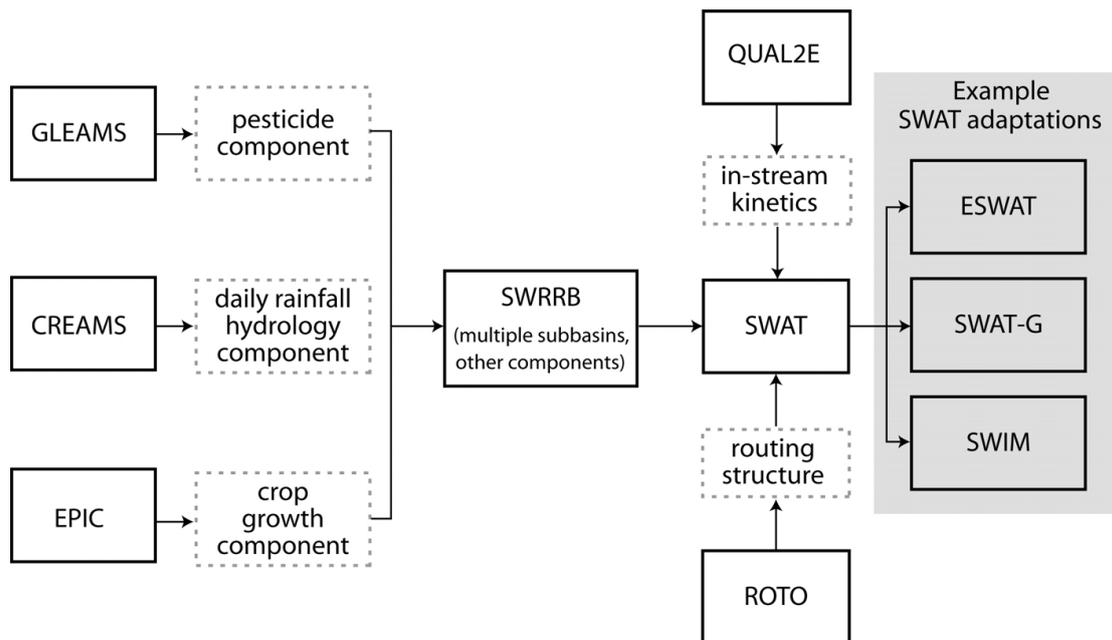


Figura 03: Esquema do desenvolvimento histórico do SWAT e algumas das suas adaptações ao longo do tempo.

O novo modelo (SWAT) surgiu permitindo simulações de áreas muito extensas e mantendo todas as características que fizeram do SWRRB um valioso modelo de simulação. Desde quando o SWAT foi criado no início de 1990 ele vem sofrendo revisão e expansão das capacidades, sendo que as melhorias mais significativas do modelo ao longo do tempo entre as suas versões incluem:

- ◆ SWAT94.2: incorporou as unidades de resposta hidrológica (URHs);
- ◆ SWAT96.2: foram adicionados como opção de gerenciamento: fertilização, auto-irrigação e armazenamento de água no dossel; incorporou a equação de evapotranspiração potencial de Penman-Monteith;
- ◆ SWAT98.1: rotinas de qualidade da água foram melhoradas; rotinas de ciclagem de nutrientes expandidas; adicionou o fluxo do canal como função do manejo, aparecendo como opção de gestão; foi modificado para uso no hemisfério sul (utilização em áreas tropicais);
- ◆ SWAT99.2: rotinas de ciclagem de nutrientes que tinham sido expandidas em 98 foram melhoradas; ocorreram mudanças nas rotinas dos reservatórios e lagoas; banco de armazenamento de água nas margens foi acrescentado; todas as referências aos anos passaram dos últimos dois dígitos do ano para os quatro dígitos do ano; a influência das

construções da área urbana sobre o ciclo hidrológico foram acrescentadas através das equações de regressão da USGS;

◆ SWAT2000: rotinas do transporte de bactérias foram adicionadas; modelo de infiltração de Green & Ampt acrescentado; gerador de clima melhorado; permitiu obter os valores de radiação solar diária, a umidade relativa e a velocidade dos ventos; todos os métodos de ET (evapotranspiração) foram revistos; permitiu incorporar número ilimitado de reservatórios; foi desenvolvido uma interface com o SIG através do GRASS e do ArcView;

◆ SWAT2005: rotinas de transporte de bactérias que foram adicionadas em 2000 sofreram melhorias; o parâmetro de retenção utilizado no cálculo diário da curva número (CN) passou a ser função do conteúdo de água no solo ou da evapotranspiração das plantas;

◆ SWAT2009: essa versão apresenta algumas mudanças importantes relacionadas ao uso de SIGs, como a incorporação do ArcView 9.3.2, gerando o ArcSWAT: o modelo também passou a ser submetido à validação extensiva.

2.6.2 – Componentes do Modelo SWAT

O modelo é composto pelos seguintes elementos, conforme Figura 04:

1. Hidrologia: com base na equação de balanço de água, que calcula infiltração, umidade relativa, escoamento superficial, fluxo sub-superficial lateral, utilizando alguns dados como a precipitação e evapotranspiração;
2. Clima: possibilita a geração estocástica de dados climáticos através de um algoritmo baseado na cadeia de Markov para uma localidade específica, tais como precipitação, temperatura, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar;
3. Solos: utiliza parâmetros físico-hídricos do solo como textura e condutividade hidráulica;
4. Processo de erosão/sedimentação: utiliza a Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) a qual emprega o escoamento e a erodibilidade do solo para simular a erosão e produção de sedimentos;

5. Crescimento de plantas: simula as mudanças temporais das plantas e resíduos, com base no modelo EPIC que utiliza biomassa produzida pelas plantas, profundidade das raízes, entre outros parâmetros;
6. Nutrientes e Pesticidas: o modelo simula o comportamento destas variáveis para as encostas e também a propagação ao longo do canal;
7. Manejo: permite que o usuário obtenha uma maior confiabilidade nos dados através da indicação do tipo, início e fim do manejo para que o modelo possa simular sua variação temporal;
8. Gestão Agrícola: é um opcional do modelo abordado como um sub-modelo que simula alguns itens como, por exemplo, sistemas de preparo e irrigação.

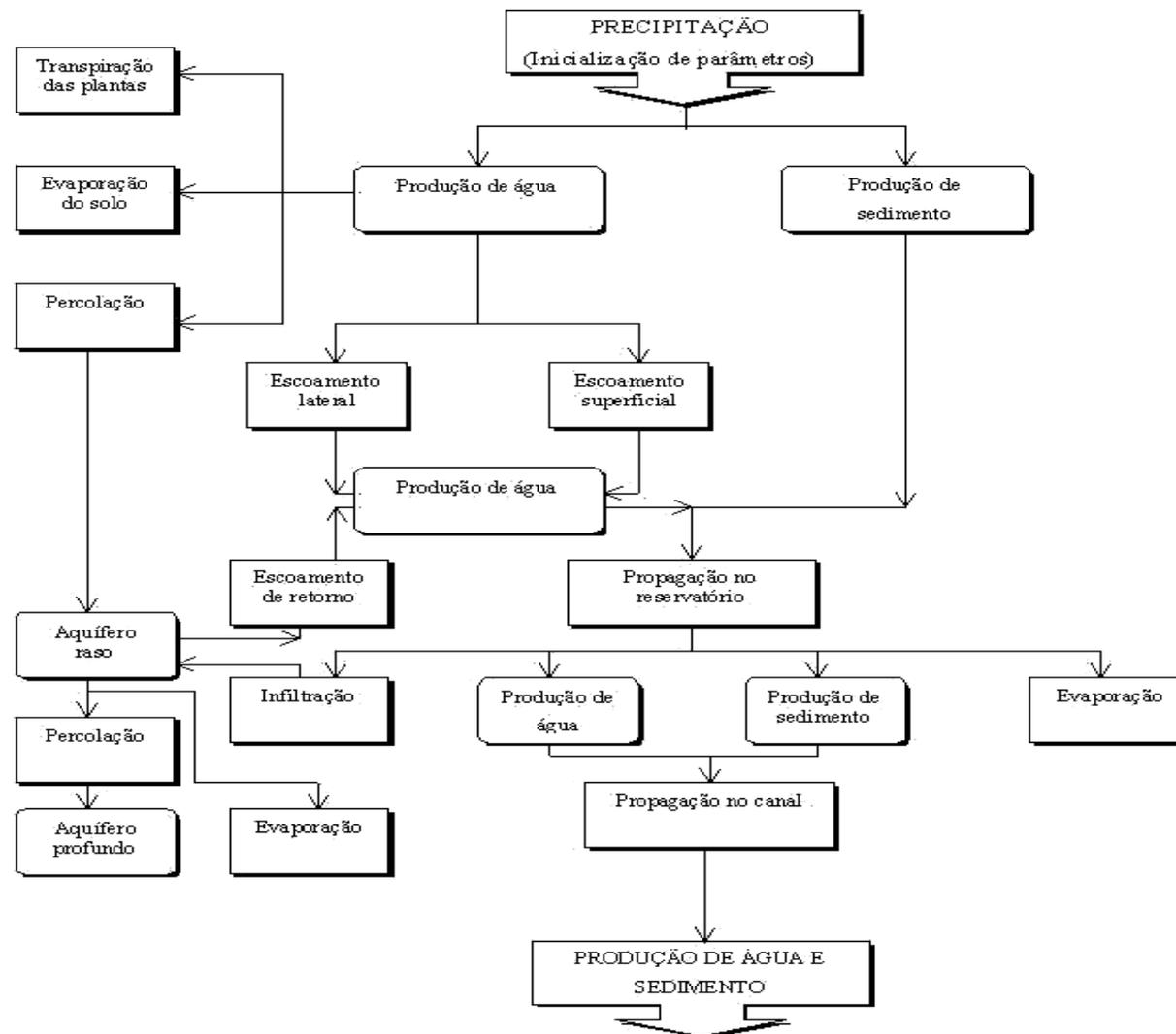


Figura 04: Representação do modelo hidrológico do SWAT utilizando alguns componentes.

2.6.3 Escala de Análise (URHs)

As bacias hidrográficas podem ser modeladas através de três esquemas diferentes, são eles:

- 1) Dividida em sub-bacias preservando os caminhos de fluxo natural, canais e limites, o que proporciona o encaminhamento realista da água, sedimentos e nutrientes;
- 2) Subdividida pela sobreposição de um *grid* simulando o roteamento entre as redes;
- 3) Agregando áreas com uma combinação única de solo e uso da terra, independentemente da posição espacial na bacia – chamadas de Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs).

O uso de URHs é uma das características do modelo SWAT, no qual a bacia hidrográfica é fracionada em diversas sub-bacias e onde o roteamento entre as unidades não pode ser simulado, assim como o escoamento estimado de cada URH é simplesmente somado para obter o fluxo estimado na saída da bacia.

O modelo SWAT é considerado por alguns autores como distribuído, onde a bacia hidrográfica pode ser dividida em sub-bacias e cada uma dessas sub-bacias pode ser parametrizada pelo SWAT, através de uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (ou *Hydrologic Response Units* – HRUs). Estas URHs tem a capacidade de refletir os diferentes tipos de solo, cobertura vegetal, topografia e uso da terra, sendo possível a divisão de centenas a milhares de células, cada célula se referindo a uma URH.

Portanto, o SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias com base no relevo, solos e uso da terra e, desse modo, preserva os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e características homogêneas dentro da mesma. Porém, ao avaliar as características de subdivisão utilizadas pelo modelo, tem-se que este é um modelo semi-distribuído já que, não será cada célula a responsável por dar uma resposta a aplicação do modelo, mas sim um conjunto de células.

A subdivisão da bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo demonstrar diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes usos e solos. Como dito anteriormente, o escoamento é calculado para cada URH e propagado para obter o escoamento total para a sub-bacia. Isso pode

aumentar a precisão das predições e fornecer uma melhor descrição física do balanço de água na bacia (ARNOLD *et. al.*, 1998).

Para gerar as URHs em cada sub-bacia, um nível de sensibilidade é adotado eliminando as classes de uso da terra com área menor do que o valor arbitrado. O segundo passo controla a criação das URHs com base na distribuição dos diferentes tipos de solo sobre os usos selecionados. O solo com área menor do que o nível de sensibilidade adotado (para o solo) também é eliminado.

Sendo assim, tem-se que o modelo fornece três opções de distribuição de URHs:

- a) Uma única URH para a sub-bacia – caracterizada pelo uso e cobertura vegetal, solo e declividade dominante;
- b) Uma única URH para cada sub-bacia – onde seleciona-se o URH de igual dominância para a categoria de uso da terra, dentro de cada linha divisória das águas, sendo esta a URH dominante;
- c) Múltiplas URHs para cada sub-bacia – onde deve-se especificar o nível de sensibilidade de uso da terra e dados de solo que devem ser utilizados para determinar o número específico de URHs em cada linha divisória das águas. Este segundo passo controla a criação de URHs com base na distribuição dos diferentes tipos de solo sobre os usos da terra selecionados.

Ao utilizar a segunda opção de distribuição deve-se atentar para o fato de que quanto menor forem os níveis de sensibilidade, maior será a capacidade do modelo de distinguir áreas com diferentes usos e manejo, bem como as distintas classes de solo presentes na bacia.

2.6.4 – *Diferentes aplicabilidades do SWAT*

A abordagem das diversas aplicabilidades do SWAT traz consigo a importância desse modelo para a análise de diferentes cenários, e antes de serem abordados alguns trabalhos, deve-se lembrar que o objetivo deste modelo é analisar os impactos das alterações no uso da terra sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas (SRINIVASAN & ARNOLD, 1994).

As numerosas aplicações do SWAT relatadas na literatura podem ser classificadas de diversas maneiras e Gassman *et. al.* (2005) utilizaram uma classificação através do agrupamento de artigos em nove subcategorias, e depois mais amplamente definida de acordo com as perdas, podendo ser elas: apenas hidrológicas; hidrológicas e de poluentes; e apenas de poluentes.

Apesar do SWAT ser relativamente recente, ao ser comparado com outros modelos, ele apresenta variadas aplicações como, por exemplo, em Rosenthal *et. al.* (1995) que utilizaram o modelo sem calibração para simular o comportamento mensal de escoamento para o rio Colorado no Texas (EUA). Já Srinivasan *et. al.* (1998) validaram o SWAT levando em conta a variável escoamento e produção de sedimentos em *Mill Creek*, no Texas, e perceberam que na escala mensal houve boa previsão, porém, o modelo superestimou as variáveis durante poucos anos para os meses de primavera e verão, em função da precipitação.

Fohrer *et. al.* (1999) aplicaram o modelo a dois cenários distintos de uso e ocupação da terra para a região da Alemanha, a fim de simular o efeito sobre o balanço hídrico. Em comparação com estudos preexistentes na região com a utilização de outros modelos, e o uso dos mesmos cenários, os resultados encontrados foram satisfatórios. Machado (2002) aplicou o SWAT para simular a produção de sedimentos e o escoamento nos anos de 1999 e 2000 na bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). Souza *et. al.* (2003) aplicaram o SWAT para simular a concentração total de fósforo, numa bacia hidrográfica em área rural na Austrália, e sua implicação na produção de clorofila, chegando a resultados que mostram a consequência da aceleração do processo de eutrofização.

O modelo SWAT tem sido muito utilizado no Brasil (OLIVEIRA, 1999; BALDISSERA, 2005; PRADO, 2005; MARCHIORO, 2008). Dentre estes autores, Oliveira (1999) aplicou tal modelo na bacia hidrográfica do rio Joanes, na Bahia (755,4 Km²), para estudar as alterações hidrossedimentológicas geradas por diferentes tipos de uso e cobertura dos solos dessa bacia. Diante de apreciáveis estudos com o modelo SWAT em diversos locais do mundo pode-se dizer que ele é um importante suporte para resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (Tabela 02).

Tabela 02: Aplicações do SWAT no Brasil e no mundo

Autor	País	bacia	Água		Sedimentos		Resolução	Cenário
			Água	Sedimentos	Água	Sedimentos		
Machado (2002)	Brasil	59,73 km ²	x	x	$Nash = 0,90$ $D_v = -0,7$ $R^2 = 0,94$	$Nash = 0,83$ $D_v = -3,2$ $R^2 = 0,96^*$	20 m	1. APP nas margens dos rios e nas encostas
Minoti (2006)	Brasil	78,3 km ² 47,21 km ²	x	x				1. vegetação natural ocupando toda a bacia 2. cana-de-açúcar por toda a bacia
Baldissera (2005)	Brasil	28.922 km ²	x		$Nash = 0,69^*$ $D_v = -8,15^*$ $R^2 = 0,75^*$		150m	1. Vegetação natural ocupando toda a bacia
Armas (2006)	Brasil	1710 km ²	x	(pesticidas)	$Nash = 0,94$ $D_v = 19,53$		25m	1. Cultivo de cana-de-açúcar
Neves (2005)	Brasil	223 km ²		x (nutrientes)				
Prado (2005)	Brasil	120,15 km ²		x			20 m	1. Vegetação natural ocupando toda a bacia
Abu El-Nars <i>et al.</i> (2005)	Bélgica	465 km ²	x		$Nash = 0,39$ $R^2 = 0,45$		250m	
Green & Van Griensven (2008)	EUA	5,95 ha*	x	x	$Nash = 0,65^*$ $R^2 = 0,66^*$ $D_v = -5,20^*$	$Nash = -0,05^*$ $R^2 = 0,61^*$		
Govender e Everson (2005)	África do Sul	0,677 km ²	x		$R^2 = 0,68$		10 m	
Eckhardt <i>et al.</i> (2005)	Alemanha	134 km ²	x		$Nash = 0,86$			

* = valores médios. Fonte LOPES e KOBİYAMA (2009)

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 - Localização da bacia

A bacia experimental objeto desse estudo é a sub-bacia do Córrego Barro Branco, que está inserida na bacia hidrográfica do Rio São Domingos afluente do Rio Muriaé, na Região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro (Figura 05). A bacia do Rio São Domingos possui uma área de aproximadamente 280 km² e é representativa de grande parte da realidade fundiária do sudeste brasileiro, dominando a pequena propriedade rural com atividades agropecuárias em terras de média declividade e elevada erosão.

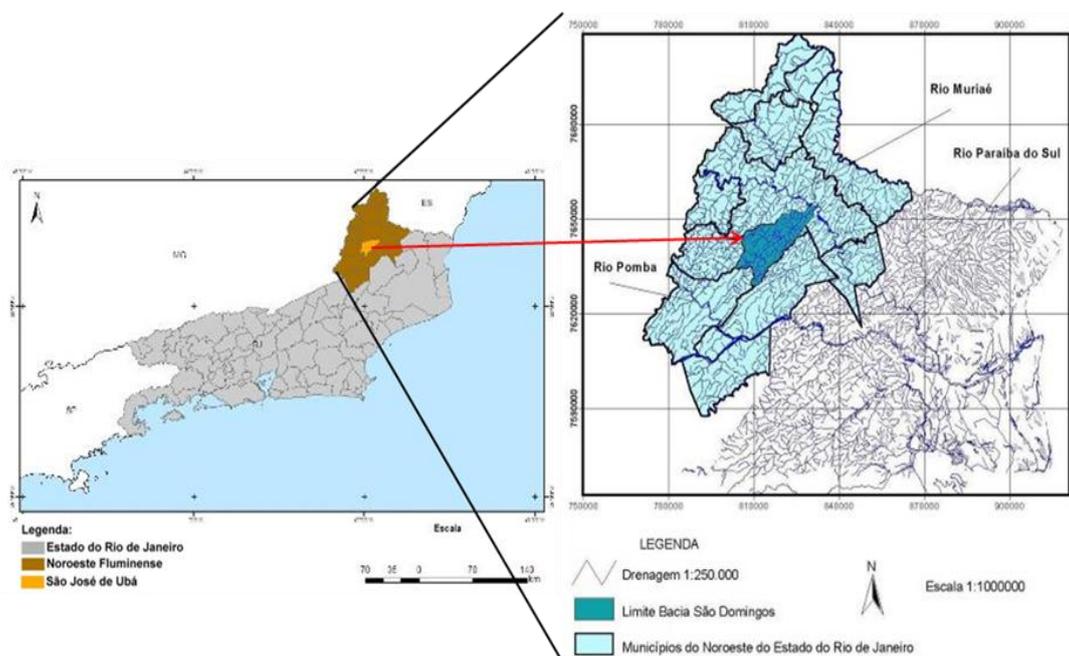


Figura 05: Localização do município de São José de Ubá e Drenagem da bacia do Rio São Domingos.

A sub-bacia do Barro Branco drena aproximadamente 6 Km² com pequenas parcelas de cultivos de distribuição espacial não uniforme - sendo o principal o tomate - e com predomínio de extensas áreas de pastagem e solo exposto. Nela há acelerada degradação dos recursos naturais, resultando num mosaico com matriz agropecuária e fragmentos isolados de Mata Atlântica, apresentando também um dos mais baixos

índices de desenvolvimento humano do estado do Rio de Janeiro, num permanente ciclo de obsolescência.

No estado do Rio de Janeiro, a Região Noroeste Fluminense se destaca por problemas decorrentes da erosão hídrica, que vem se acentuando desde o ciclo cafeeiro do século XIX, e do avanço da pecuária a partir da década de 1980. Este uso da terra provocou grande redução da cobertura florestal natural, que associada às práticas de manejo inadequadas e características naturais da região, como a ocorrência de chuvas concentradas em um período do ano e a presença de declividades acentuadas, favorecem a perda de solo.

Além da sub-bacia experimental em questão ser representativa do ponto de vista abordado, a parceria desta pesquisa com a Embrapa Solos possibilita a obtenção de dados necessários para a modelagem ambiental proposta, englobando o monitoramento da pluviosidade, vazão fluvial e concentração de sedimentos, sendo estes dados provenientes de uma estação pluvio-fluvio-sedimentológica automática (Figura 06).

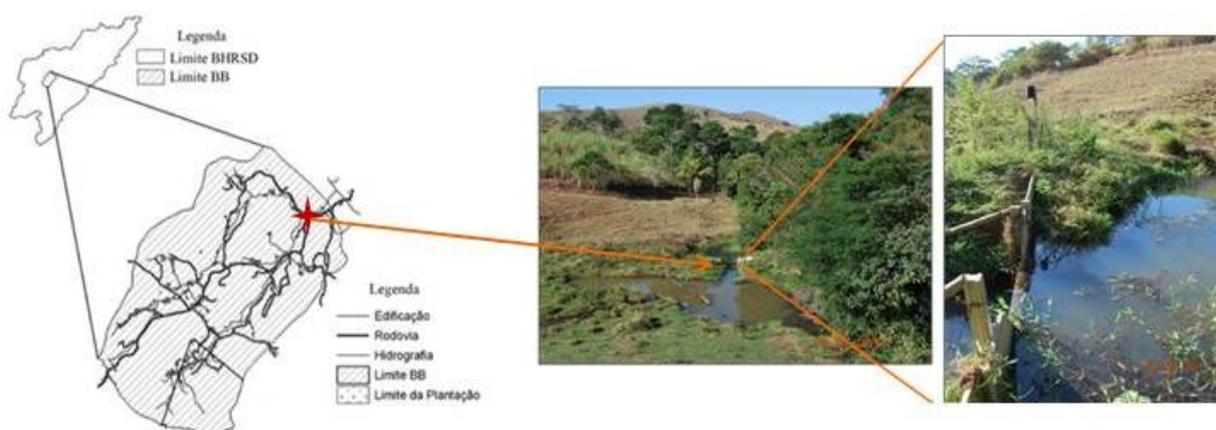


Figura 06: Localização e fotos da estação pluvio-fluvio-sedimentológica e vertedouros instalados na bacia do Barro Branco. (Fotos: Arquivo Pessoal)

A sub-bacia de Barro Branco vem sendo estudada desde 2003 no âmbito de projetos como o GEPARMBH (2002) e Prodetab Aquíferos (2003), desenvolvidos pela Embrapa Solos em parceria com outras instituições, realizando pesquisas e atividades em prol da adoção de práticas conservacionistas do solo e da água na região.

3.2 – Aspectos climatológicos

A classificação climática do Barro Branco, segundo KOPPEN (1948), é A_w , ou seja, clima tropical com inverno seco. A precipitação anual acumulada na bacia hidrográfica é de aproximadamente 1.200mm, onde a estação chuvosa é o verão, com maiores médias em Dezembro e Janeiro, sendo dezembro o mês mais chuvoso, com 219 mm. E a estação seca é o inverno, com os menores índices pluviométricos registrados nos meses de Junho e Julho (GONÇALVES *et. al.*, 2006), como mostra a Figura 07.

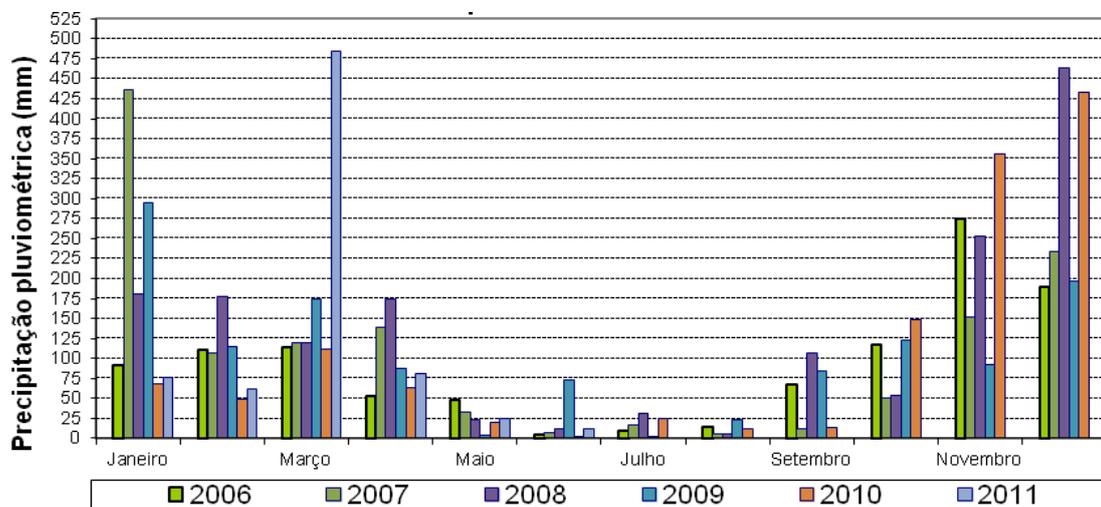


Figura 07: Precipitação mensal na sub-bacia do Barro Branco. (Fonte: Embrapa)

A Figura 08 retrata o balanço hídrico da área elaborado por Gonçalves *et. al.* (2006), baseado na metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), mostrando o período de março a agosto como o de déficit hídrico, com negativas de até 60 milímetros, e o com excedente nos meses de outubro a fevereiro, chegando a mais de 100 mm.

A compreensão dos aspectos climáticos da região é de extrema importância, pois conforme discutido por Gonçalves *et. al.* (2006), o longo período de deficiência hídrica aliado a solos com baixa capacidade de retenção de água e elevada evapotranspiração resultante das altas temperaturas, faz com que seja necessária, na zona rural, a adoção de práticas de manejo que melhorem a capacidade de retenção de água no solo, como o plantio direto, além do uso racional de água na zona urbana.

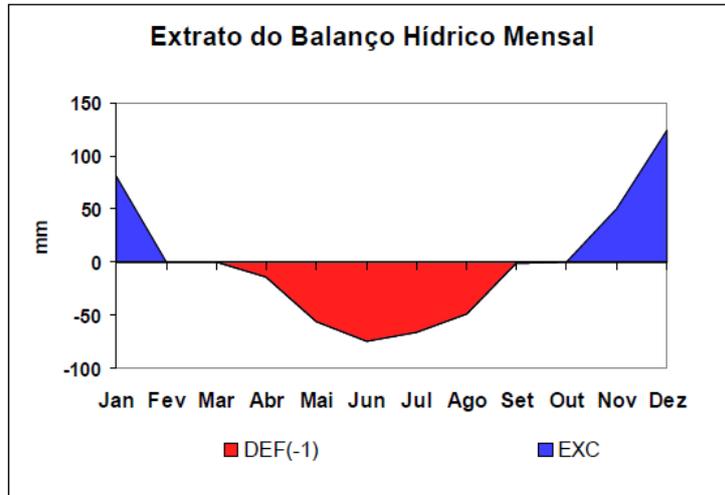


Figura 08: Balanço Hídrico para o Município de São José de Ubá (RJ). Fonte: Gonçalves *et. al.* (2006).

3.3 – Geologia e Geomorfologia

A área da sub-bacia do Barro Branco, geologicamente, compreende um conjunto predominante de rochas metamórficas, juntamente com sedimentos aluvionares nos fundos de vales (DANTAS *et. al.*, 2001). Essa formação é representada por terrenos colinosos de baixa amplitude de relevo, em alternância com alinhamentos de cristas serranas de elevada amplitude, sendo este domínio bastante comum ao longo do Estado do Rio de Janeiro.

Conforme explicita Heilbron *et. al.* (2005), a região Noroeste Fluminense é constituída por terrenos pré-cambrianos sujeitos a metamorfismo de alto grau incluídos no contexto geotectônico que deu origem à Faixa Ribeira durante a orogenia Brasileira. Ainda de acordo com este, a bacia do Rio Barro Branco está inserida ao longo do contato tectônico que divide os terrenos ocidental e oriental, como pode ser visto nas Figuras 09 e 10. As cabeceiras da bacia são compostas pelo Domínio tectônico Juiz de Fora, com rochas granulíticas de maior resistência à erosão comparadas às demais.

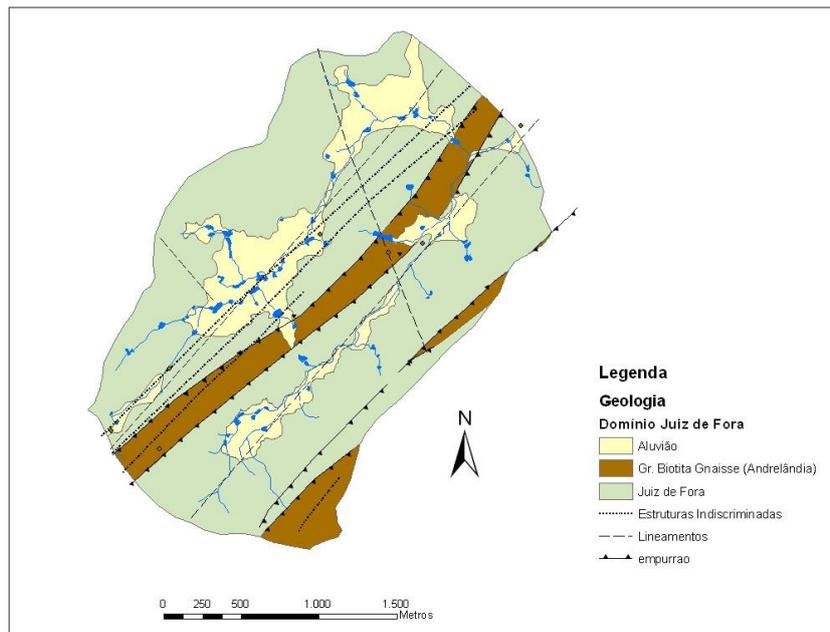


Figura 09: Mapa Geológico da Sub-bacia de Barro Branco. Fonte: Projeto PRODETAB/Aqüíferos.

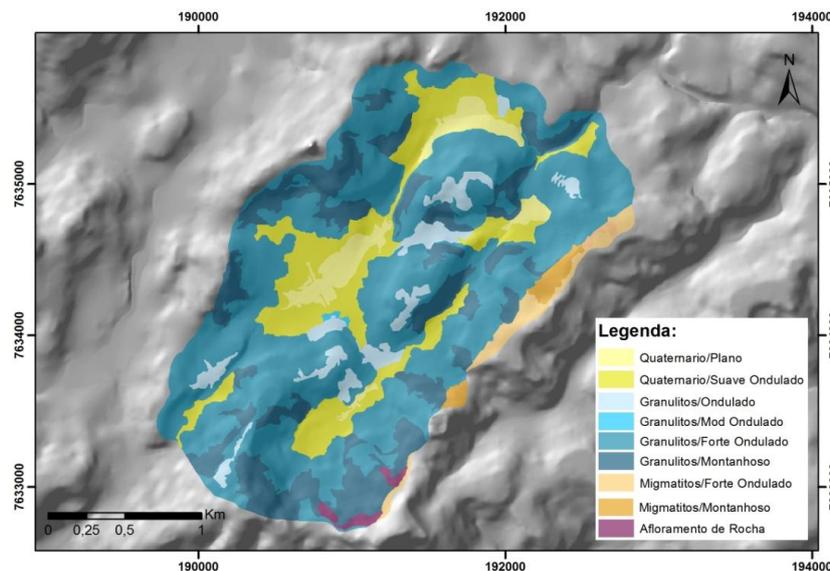


Figura 10: Geologia da Bacia do Córrego Barro Branco. Fonte: EMBRAPA.

As rochas na bacia se encontram intensamente intemperizadas, ocorrendo afloramentos apenas nas altas elevações, na porção Sul. As principais direções de fraturas e discontinuidades são as direções NE-SW, sendo concordante com a foliação metamórfica milonítica e com o cisalhamento regional (BARRETO, 2000). Do ponto de

vista hidrogeológico, ocorrem na bacia os aquíferos fissurais que estão associados a fraturas e fendas nas rochas.

Em relação à geomorfologia, Dantas (2000) explica que a unidade predominante na região é a Depressão Interplanáltica com Alinhamentos Serranos do Norte-Noroeste Fluminense. Nessa unidade, o relevo homogêneo de colinas, morrotes e morros baixos (Figura 11) alterna-se bruscamente com alinhamentos serranos bastante elevados. É acentuado o controle dos lineamentos de direção WSW-ENE, tanto sobre a rede de drenagem tributária aos canais principais, quanto no alinhamento das cristas serranas.

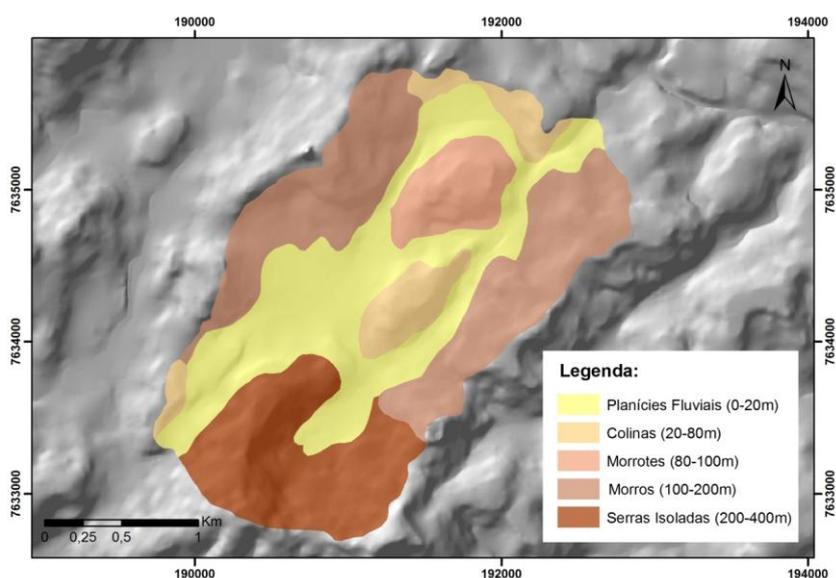


Figura 11: Geomorfologia da Bacia do Córrego Barro Branco. Fonte: SILVA, 2002.

3.4 – Rede de drenagem

O sistema de drenagem é formado pelo rio principal e seus tributários. Seu estudo indica a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica, sendo, assim, o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, sendo expressa pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da rede – sejam eles perenes, intermitentes, ou temporários – e a área total da bacia. O índice foi determinado utilizando a Equação 1:

$$Dd = \frac{Lt}{A}, \quad (\text{Equação 1})$$

sendo: Dd a densidade de drenagem (Km/Km²), Lt comprimento total de todos os canais (Km) e A a área de drenagem (Km²).

O resultado desta análise é exposto na Tabela 03 e a partir dele destaca-se que a bacia hidrográfica em estudo possui alto índice de circularidade (0,67), o que pode ocasionar alagamentos, já que as águas concentram-se rapidamente. Contudo, este fenômeno pode ser amenizado devido à baixa amplitude altimétrica da área drenada – 275m – em um perfil longitudinal côncavo (Figura 12) e com baixa declividade em torno de 2,5%. Quanto à rede de drenagem, esta exhibe alta densidade (2,48) com alta frequência de canais de primeira ordem, e ela é de 3ª ordem, de acordo com a ordenação de Strahler.

Tabela 03: Morfometria da Bacia do Córrego Barro Branco.

VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS	UNIDADE DE MEDIDA	VALOR
Área	m ²	5616921,89
Perímetro	m	10251,96
Comprimento do canal principal	m	4389,24
Comprimento total dos canais	m	13999,84
Amplitude altimétrica	m	275
Declividade média	%	2,5
Ordem	adimensional	3°
Índice de Circularidade	adimensional	0,67
Densidade de Drenagem	m/m2	2,48

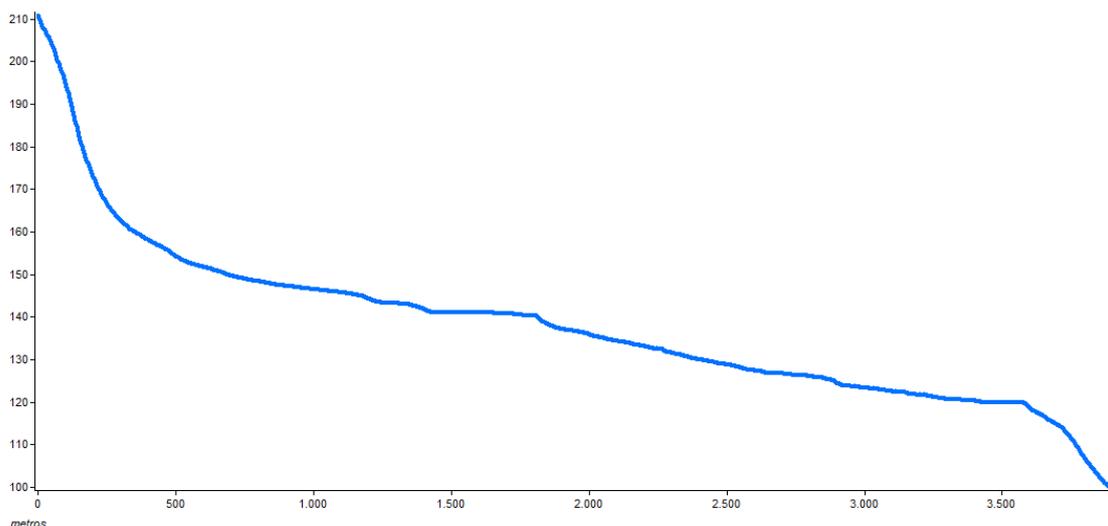


Figura 12: Perfil longitudinal do córrego Barro Branco.

3.5 – Aspectos edáficos

Os estudos de solos na presente área de estudo mostram a predominância de dois domínios pedológicos associados a feições geomorfológicas regionais de baixadas, morros e morrotes (LUMBRERAS *et. al.*, 2006). Nas porções planas foram identificadas associações de Gleissolos, em contraponto, no sopé das encostas há predomínio de Argissolos vermelhos e vermelho-amarelos que gradualmente dão lugar aos Nitossolos à medida que o relevo fica mais acentuado (Figura 13).

Em virtude de sua posição topográfica que condiciona um pedoambiente mais úmido, a deficiência hídrica regional é minimizada nas baixadas, onde se observa aumento da deficiência de oxigênio e também dos impedimentos à mecanização.

Os fatores citados anteriormente são de extrema importância para uma análise integrada socioambiental, visto que a irrigação necessária às culturas nas encostas é feita de forma manual e ineficiente, com o uso de mangueiras acopladas a bombas. A água que abastece esse sistema origina-se em pequenos reservatórios formados artificialmente nas baixadas através do represamento indiscriminado dos córregos, com o auxílio de máquinas, o que contribui para degradação dos recursos hídricos.

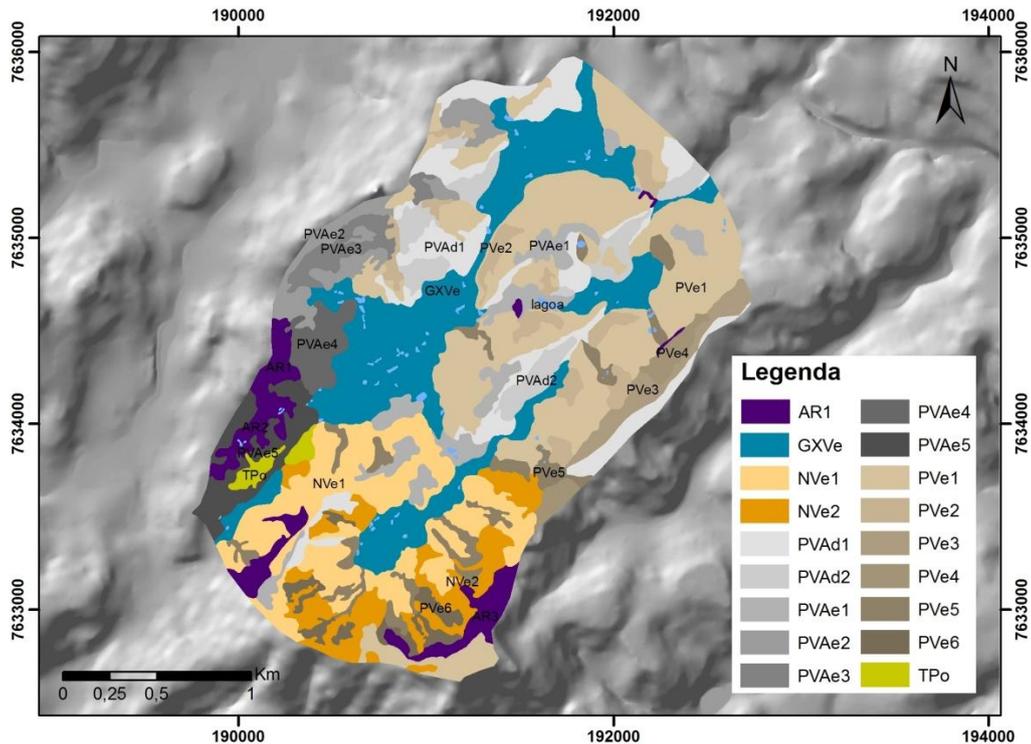


Figura 13: Mapa Pedológico da Bacia do Córrego Barro Branco. Fonte: EMBRAPA.

3.6 – Uso e Cobertura da Terra

De acordo com Tôsto *et.al.* (2004), a região Noroeste Fluminense era habitada por tribos indígenas até a chegada dos colonizadores, no século XIX, em busca de terras para a prática agrícola. Frades catequizavam os índios e utilizavam esta mão-de-obra na agricultura; posteriormente, imigrantes italianos, portugueses, suíços e espanhóis buscavam terras, impulsionados pelo sucesso da produção cafeeira e canavieira da época, trazendo tradições de agricultura e comércio.

A construção das ferrovias consolidou o povoamento da região, facilitando o escoamento da produção; até os dias de hoje, a economia destes municípios é baseada na produção agrícola (TÔSTO *et. al.*, 2004). Como consequência da forte ocupação do espaço agrícola ocorrida desde o início da colonização do país, a cobertura florestal, que corresponde a remanescentes da Mata Atlântica, é de apenas 9,64% da área do Norte-Noroeste Fluminense.

Este dado representa o maior percentual de desmatamento entre os Domínios Geoambientais do Estado (LUMBRERAS *et. al.*, 2006). Além disso, segundo Dantas *et. al.* (2001), a região demonstra hoje um quadro de estagnação econômica, calcado no subaproveitamento de suas terras. Conforme mostrado por Barreto (2000), o uso predominante da bacia é a pastagem, ocupando 94,68% de sua área, seguida por 5,09% da área ocupada por vegetação natural alterada e 0,23% por solo exposto, mostrado na Figura 14.

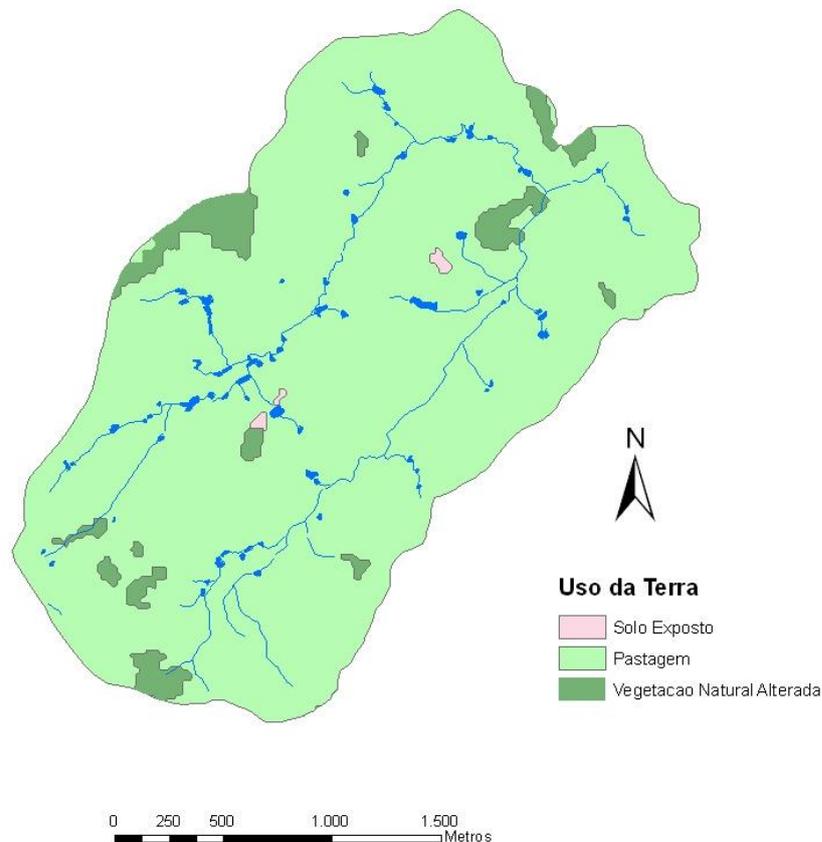


Figura 14: Mapa de Uso do Solo da Sub-bacia de Barro Branco. Fonte: Projeto PRODETAB/Aqüíferos.

Abreu & Fidalgo (2006) apontam ainda o cultivo de tomate e pimentão durante o inverno, e produção de milho e arroz durante o verão. Porém, esse tipo de lavoura é de difícil mapeamento, pois apresenta alta rotatividade nas terras da região, ocupando uma determinada área por cerca de três anos, que posteriormente é deixada em pousio ou utilizada para pastagem. A bacia hidrográfica de Barro Branco apresenta características

do uso e ocupação do solo e degradação ambiental bastante similar ao apresentado para a Região Noroeste Fluminense e para a Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos (BHRSD).

Levando em consideração as interações entre os diversos componentes dos meios físicos e bióticos regionais, além das condições do uso atual do solo e da intensidade do processo erosivo, Lumbreras (2008) identificou diferentes Macropedoambientes na área. Conforme essa classificação, a Sub-bacia Hidrográfica do Barro Branco está inserida no Macropedoambiente Itaperuna, domínio esse que apresenta os maiores níveis de degradação das terras da região. De acordo com o referido autor, juntamente com o médio vale do rio Paraíba do Sul, essa área exibe os processos erosivos mais intensos do estado, predominando os laminares e em sulcos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

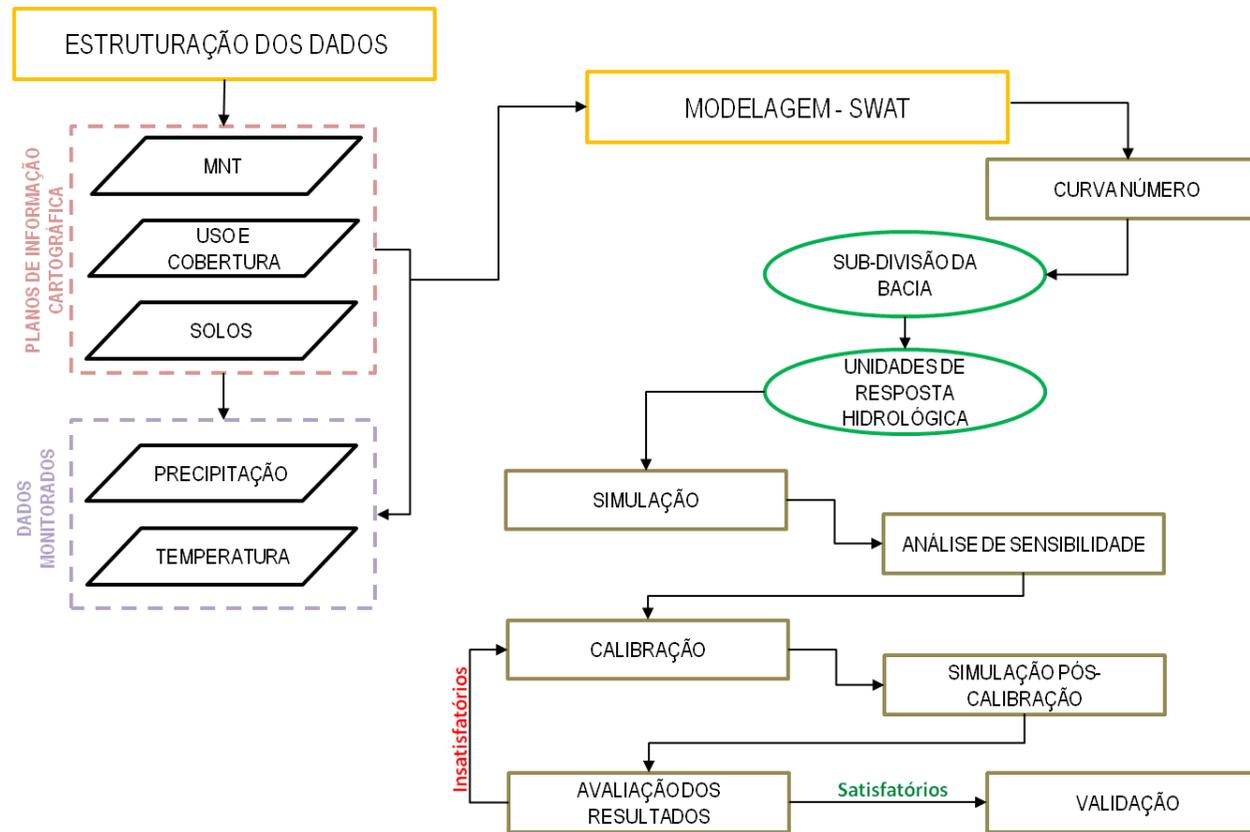
Visando caracterizar a dinâmica hidrológica dos fluxos de água superficiais e subsuperficiais nos solos, resultantes das diferentes formas de intervenção (sistemas de uso e manejo) existentes na área, são apresentados cenários, simulados pela modelagem matemática, distribuídos tanto no espaço quanto no tempo, buscando compreender os fatores que controlam a resposta hídrica da bacia conforme descrito por Dumanski & Huffman (1981).

O modelo matemático utilizado é o SWAT2009, versão também denominada de ArcSWAT, que possui interface com o ArcGIS 9.3. As ações de caracterização do meio físico, essenciais à aplicação do modelo são feitas a partir do mapa de solos já existente, da montagem da base de dados meteorológica, da geração do modelo numérico de elevação e da geração do mapa de uso atual da bacia do Barro Branco, e estes seguirão os procedimentos a seguir:

- A base de dados da estação pluvio-fluvio-sedimentológica automática instalada na saída da bacia foi tabulada pela Embrapa Solos e os dados inseridos no modelo num intervalo mensal;
- O mapa de declividade é derivado do modelo numérico do terreno (MNT) da bacia, a partir da utilização dos dados relativos às curvas de nível, com equidistância vertical de 5m, hidrografia e pontos cotados – base esta proveniente da Embrapa Solos.

Combinações dessas premissas serão aplicadas para definição de planos e estratégias de ampliação da recarga do aquífero. Para avaliar a eficiência do ArcSWAT 2009 e simular a CSS utilizar-se-á o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – COE.

4.1 – Fluxograma Metodológico



4.2 - Estruturação dos dados

4.2.1 – *Modelo Numérico do Terreno (MNT)*

O termo modelo numérico de terreno (MNT) é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Um MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y), em um referencial qualquer, com atributos denotados de z, que descrevem a variação contínua da superfície (CÂMARA *et. al.*, 2004).

Comumente associados à altimetria, também podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, como teor de minerais, ou propriedades do solo ou subsolo, como aeromagnetismo. Entre os usos de modelos numéricos de terreno, pode-se citar (BURROUGH, 1986):

- (a) Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- (b) Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- (c) Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade;
- (d) Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- (e) Representação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

O método escolhido, pela autora, para a elaboração do modelo foi baseado no ajustamento da superfície, utilizando o módulo TOPOGRID do ArcGIS 9.3, na escala 1:10.000 a partir da utilização dos dados relativos às curvas de nível, com equidistância vertical de 5m, da hidrografia e de pontos cotados (Figura 16). Além disso, a grade de declividade é derivada do MNT da microbacia. A declividade é um dos mais importantes atributos topográficos primários que controlam os processos pedogenéticos, pois afetam diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial de água e conseqüentemente o teor de água no solo, o potencial de erosão/deposição, e muitos outros processos importantes (WILSON & GALLANT, 2000).

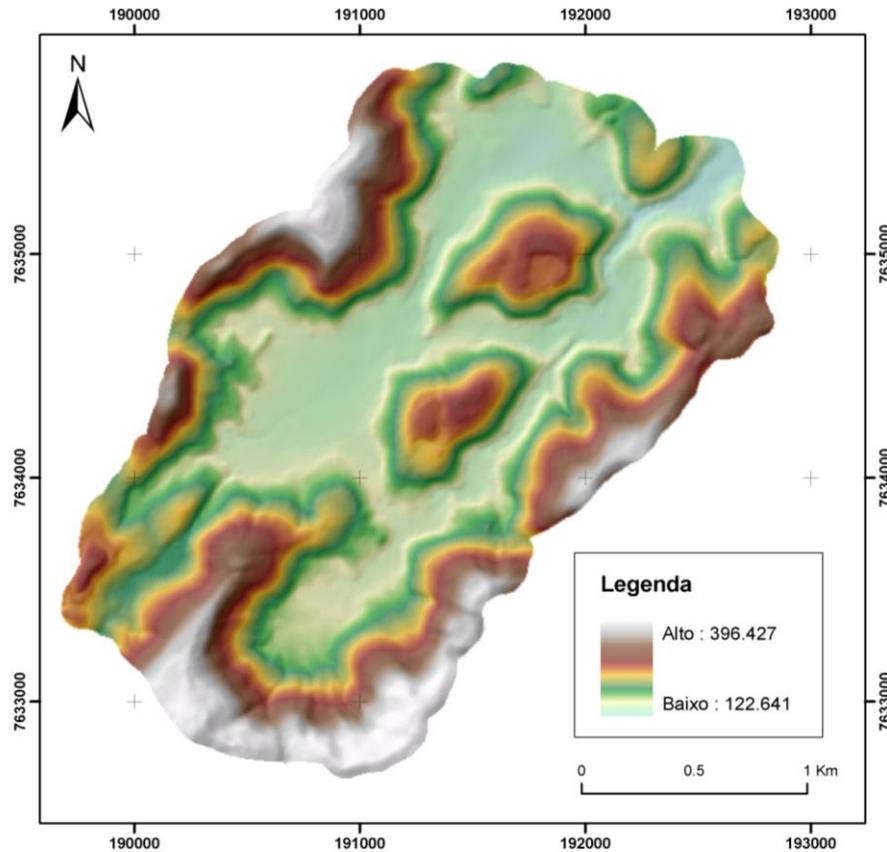


Figura 16: Hipsometria da Bacia do Córrego Barro Branco.

4.2.2 – Mapa de uso e cobertura da Terra

O fator de uso e cobertura da terra é de relevante importância no que concerne ao entendimento do desencadeamento de processos erosivos acelerados e da suscetibilidade a erosão em suas diversas formas. Assim, entende-se que a ruptura do equilíbrio natural do meio físico pela ação antrópica, tal como pelo desmatamento ou determinada utilização do solo, possui como uma de suas respostas o fenômeno da erosão e dos movimentos coletivos de solos, uma resposta “*incontinenti*” de busca a uma nova condição de estabilidade do sistema (SILVA *et. al.*, 2003).

A partir deste entendimento, foi realizado o mapeamento de detalhe – na escala 1:10.000 – do uso e cobertura da terra para a Bacia do Córrego Barro Branco, adaptado de metodologia de Cruz *et. al.* (2007). Ele foi desenvolvido através de Processamento Digital de Imagens (PDI) das bandas espectrais azul (450-510 nm), verde (510-580 nm), vermelho (630-690 nm) e infravermelho próximo (770-895) - fusionadas com a pancromática de 0,5 m – do sensor BGRN1, à bordo do satélite Worldview-2,

adquiridas em janeiro de 2010, com a resolução espacial de 2 metros e radiométrica de 16 bits.

Como a área de estudo abrangia duas cenas do referido sensor, elas foram “mosaicadas” pela ferramenta *mosaicking* no programa ENVI 4.7, equalizando-as com base nas estatísticas na zona de sobreposição (Figura 17). Após a formação do mosaico, utilizada sem a aplicação da correção atmosférica, foi feita a delimitação da bacia e análise do uso e cobertura da terra. A validação do mapeamento de detalhe foi realizada com trabalho de campo e obtenção das coordenadas geográficas para confirmação dos tipos de uso e cobertura espacializados no mapa.

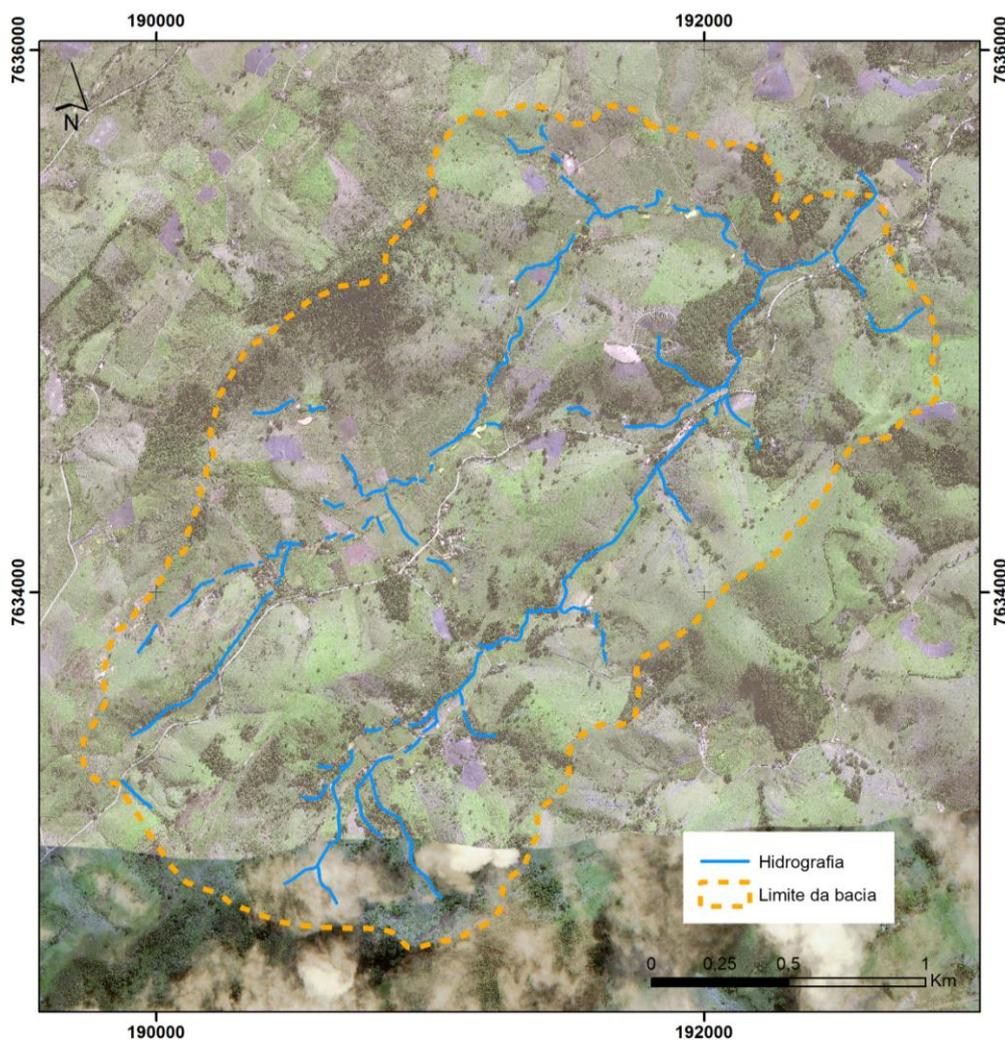


Figura 17: Mosaico da imagem WorldView-2 R(5) G(3) B(2).

Para fins de classificação, adotou-se os procedimentos ilustrados na Figura 18, que esquematiza as atividades desenvolvidas para tal mapeamento e que serão detalhadas a seguir. O *Definiens* é um sistema computacional especialista (SE) que realiza tarefas de interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto empregando estratégias de armazenamento e replicação do conhecimento por raciocínio heurístico. Nele, por meio de modelos com base em malhas (*frames*), redes semânticas hierárquicas são estabelecidas, oriundas da Análise Orientada ao Objeto (AOO), onde o objeto combina em uma única entidade sua estrutura (atributos) e seu comportamento (operações) e estabelece relações com os demais (CAMARGO, 2008).

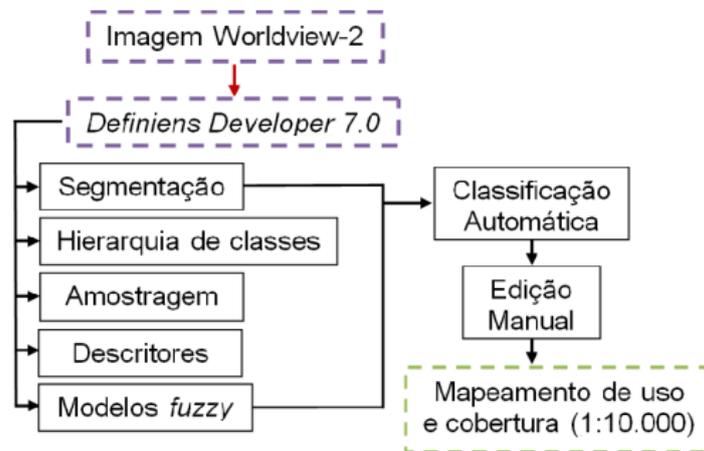


Figura 18: Fluxograma metodológico do PDI para de mapeamento de uso e cobertura da terra.

Para a obtenção dos objetos de análise, foi empregada na imagem Worldview-2, a segmentação multirresolução por algoritmo desenvolvido para extrair segmentos espectralmente homogêneos com base tanto no valor do *pixel* quanto na forma do objeto e que são definidos pelos Planos de Informação inseridos – a ambos podem ser atribuídos pesos e um parâmetro de escala, que determinará a heterogeneidade máxima permitida baseada no crescimento de regiões (DEFINIENS, 2007).

Com o intuito da análise da informação semântica contida nos objetos, foi elaborada uma classificação supervisionada por amostragem, objetivando sua generalização e reconhecimento automático, por agrupamento em classes a partir do reconhecimento da mesma estrutura de dados anteriormente selecionada. A legenda foi

estabelecida com base nos objetivos do presente estudo, levando em consideração o estabelecido pelos Manuais Técnicos em Geociências de Vegetação e de Uso da Terra do IBGE (1992 e 2006).

O algoritmo implementado *Classification* refere-se à classificação por descritores de classe, o qual permite a combinação de exigências as quais os segmentos devem atender para se tornarem membros de uma classe. Nesta etapa classificatória, as classes sintetizam o significado dos segmentos respondendo pelo agrupamento de objetos que atendem ao mesmo comportamento espectral, podendo-se inserir múltiplas condições combinadas por operadores lógicos e utilizar funções de pertinência *fuzzy* para os limiares estabelecidos (DEFINIENS, 2007).

Desta maneira, foram inseridas no *software Definiens Developer 7.0* as bandas Worldview-2 do espectro eletromagnético da radiação solar, utilizadas para a segmentação da superfície terrestre, em um primeiro nível, em superobjetos, para então terem os seus níveis de cinza modelados para as classes de ÁGUA, NUVEM, SOMBRA e OUTROS por descritores de informações derivadas das propriedades dessas imagens-objetos, tais como: tonalidade, forma, textura, padrão e contexto.

Com segmentação multirresolução seguindo a estrutura hierárquica de classificação, partiu-se para o segundo nível, onde os subobjetos foram divididos a partir da classe OUTROS em VERDE e NÃO-VERDE; e, a partir desses, na seguinte legenda final: florestas, gramíneas, arbustivo, cultivos e solo exposto, estradas, afloramento rochoso. Estas classes foram escolhidas com base nos objetivos propostos neste trabalho, assim como da adequação às resoluções da imagem, amparados pelo Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2006).

4.2.3 – Caracterização das propriedades dos solos

Os dados tabulares de solos requeridos pelo modelo SWAT são divididos em duas partes: i) parâmetros do tipo de solo; e ii) parâmetros da camada do solo. Estes dados (Tabela 04) foram obtidos através de trabalhos realizados em campo, com coleta de amostras para análise em laboratório, realizados pela Embrapa Solos. Os parâmetros do tipo de solo de cada camada de solo foram definidos da seguinte maneira:

- 1- SOL_ZMX - O valor de profundidade de raízes, ou profundidade efetiva de enraizamento, foi, via de regra, estimado em função dos horizontes coletados como

HORIZONTE DIAGNÓSTICO e estão muito próximos dos de efetiva penetração das raízes, pelo menos em sua maior parte;

- 2- ANION_EXCL - Porosidade do solo foi calculada pelo método convencional.
Porosidade % = $(D_{partícula} - D_{solo}) / D_{partícula} * 100$;
- 3- SOL_Z - É a profundidade do horizonte (layer) avaliado em mm;
- 4- SOL_BD - É o valor da densidade do solo determinada em amostra indeformada de volume conhecido;
- 5- SOL_AWC - Capacidade de retenção = $(\text{umidade a } 1/3 \text{ atm} - \text{umidade a } 15 \text{ atm}) / 100$ para mm/mm;
- 6- SOL_K - A condutividade hidráulica saturada da camada superficial é considerado igual a média dos valores estabilizados de infiltração dos testes realizados por duplo anel, enquanto que os valores de K subsuperficial são estimados com base nestes mesmos resultados;
- 7- SOL_CBN - São os valores de carbono orgânico das análises realizadas;
- 8, 9 e 10 - valores da determinação de granulometria das análises realizadas;
- 11- ROCK- Percentagem de cascalho nas amostras de fração da amostra.

Tabela 04: Parâmetros físicos dos solos da Bacia do Córrego Barra Branco.

Classes de Solos SIMPLIFICADA	Número de camadas (Nº)	SOL_ZMX (mm)	ANION_EXCL (%)	SOL_Z (mm)	SOL_BD (g/cm)	SOL_AWC (mm/mm)	SOL_K (mm/h)	SOL_CBN (%)	CLAY	SILT	SAND	ROCK
ARGISSOLO	Ap (0-18)	750	52,6	180	1,42	0,10	12	0,95	34,2	19,1	46,7	0
	Bt1(29-51)		42,4	320	1,63	0,10	< 5	0,49	54,5	14,6	30,9	0
GLEISSOLO	Ap	560	37,8	200	1,61	0,22	10	1,32	24,5	35,3	40,2	0
	Cg		37,6	180	1,66	0,21	<2	0,23	41,2	20,3	38,5	0
NEOSSOLO	Ap	150	49,0	150	1,35	0,02	>50	4,42	14,3	34,5	51,2	5

4.2.3.1 – Classificação dos grupos hidrológicos

Para permeabilidade dos solos, o modelo utiliza a classificação das características de infiltração dos solos de acordo com *U.S Natural Resource Conservation Service* (NRCS, 1986). Os solos são classificados em A, B, C ou D, sendo que a infiltração é decrescente do grupo A para o D.

No entanto, Lombardi Neto *et. al.* (1990) e Sartori *et. al.* (2005) consideram que esta classificação não contempla todas as características dos solos brasileiros. Propuseram então uma classificação para as condições brasileiras, com base nas características de cada tipo de solo e sua resistência à erosão, a saber:

Grupo Hidrológico A - Solos muito profundos (profundidade > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência à erosão; solos com textura média; solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura apresente alta macroporosidade no perfil; solos bem ou excessivamente drenados; razão textural = <1,2; Índice K = 1,25.

Grandes grupos de solos: Latossolo amarelo, Latossolo vermelho amarelo e vermelho (ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta microporosidade); Latossolo amarelo e vermelho amarelo (ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso).

Grupo Hidrológico B - Solos profundos (100 a 200 cm); solos com moderada taxa de infiltração e também moderada resistência e tolerância à erosão; solos de textura arenosa ao longo do perfil ou textura média com horizonte superficial arenoso; solos de textura argilosa ou muito argilosa, desde que a estrutura apresente boa macroporosidade no perfil; razão textural = 1,2 a 1,5; Índice K = 1,1.

Grandes grupos de solos: Latossolo amarelo e vermelho amarelo (ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa); Latossolo bruno, Nitossolo vermelho, Neossolo quartzarênico, Argissolo vermelho ou vermelho amarelo (de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/ muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta).

Grupo Hidrológico C - Solos profundos (100 a 200 cm.) ou pouco profundos (50 a 100 cm.); solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; Razão textural = >1,5; Índice K = 0,9.

Grandes grupos de solos: Argissolo pouco profundo (não apresentando mudança textural abrupta) ou Argissolo vermelho, Argissolo vermelho amarelo e Argissolo amarelo (profundos e apresentando mudança textural abrupta); Cambissolo (textura média) e Cambissolo háplico ou húmico (com características físicas semelhantes aos Latossolos); Espodossolo ferrocárbico; Neossolo flúvico.

Grupo Hidrológico D - Solos rasos (profundidade < 50cm.); solos com taxa de infiltração muito baixa, apresentando pouquíssima resistência e tolerância à erosão; solos orgânicos; razão textural = muito variável; Índice K = 0,75.

Grandes grupos de solos: Neossolo litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvissolo; Plintossolo; Solos de mangue; Afloramentos de rocha; demais Cambissolos (que não se enquadram no grupo C); Argissolo vermelho amarelo e Argissolo amarelo (ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta).

Os grupos hidrológicos representativos da bacia do Barro Branco estão descritos na Tabela 05.

Tabela 05: Classificação dos grupos hidrológicos.

Classes de Solos Simplificada	Grupo hidrológico (A,B,C,D)
ARGISSOLO	C
GLEISSOLO	D
NEOSSOLO	D

4.2.4 – *Dados e parâmetros climatológicos*

A base de dados meteorológicos utilizada na presente pesquisa engloba cinco anos de dados diários de precipitação e temperatura do ar. Os dados de radiação solar, umidade relativa do ar e a velocidade do vento são obtidos através do gerador climático WGEN. A descrição de tais parâmetros encontra-se na Tabela 06.

Tabela 06: Parâmetros requeridos para criação dos parâmetros estatísticos da estação meteorológica no modelo SWAT.

PARÂMETROS CLIMATOLÓGICOS	
WLATITUDE	Latitude da estação meteorológica (graus)
WLONGITUDE	Longitude da estação meteorológica (graus)
WELEV	Altitude da estação meteorológica (metros)
RAIN_YRS	Total de anos de dados observados que foram utilizados no cálculo do
RAIN_HHMAX	
TMPMX	Temperatura máxima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPMN	Temperatura mínima nos diferentes meses do ano (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão da máxima temperatura no mês.
TMPSTDMN	Desvio padrão da mínima temperatura no mês.
PCPMM	Média da precipitação no mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação no mês (mm.dia-1)
PCPSKW	Coefficiente Skew para a precipitação diária no mês
PR_W(1)	Probabilidade de dia úmido (com chuva) seguido de um dia seco no mês
PR_W(2)	Probabilidade de dia úmido seguido de outro dia úmido no mês
PCPD	Número médio de dias chuvosos no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima no período de 30 minutos no mês (mm)
SOLARAV	Radiação solar média diária no mês (MJ.m-2.dia-1)
DEWPT	Ponto de orvalho médio diário no mês (°C)
WNDV	Velocidade do vento médio diário no mês (m.s-1)

4.2.5 – Método da Curva Número

Desenvolvida pelo Serviço de Conservação dos Solos (*Soil Conservation Service* - SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture* – USDA), a curva de número (CN) é um parâmetro utilizado para o cálculo do *runoff* (escoamento superficial), descrevendo o tipo de solo,

sua utilização e condição de superfície no que diz respeito à potencialidade de gerar escoamento superficial.

O CN é um método baseado em dados da relação entre a intensidade de chuva, condições da superfície da terra, e volume do escoamento superficial sendo o valor de CN uma função do uso e ocupação da terra, das condições hidrológicas, do grupo hidrológico do solo e condições de umidade inicial do solo.

O valor de CN está compreendido entre 0 e 100, correspondendo a zero para uma bacia de condutividade hidráulica infinita e o cem a uma bacia totalmente impermeável. O SCS obteve curvas que correlacionam a precipitação com o escoamento de várias sub-bacias dos E.U.A. (Figura 19); para a padronização dessas curvas, números adimensionais foram estabelecidos, as chamadas Curvas de Número, ou CNs. As tabelas com os valores de CN relacionados ao uso e ocupação da terra e ao grupo hidrológico utilizados pelo modelo podem ser encontradas no manual do SWAT (2000).

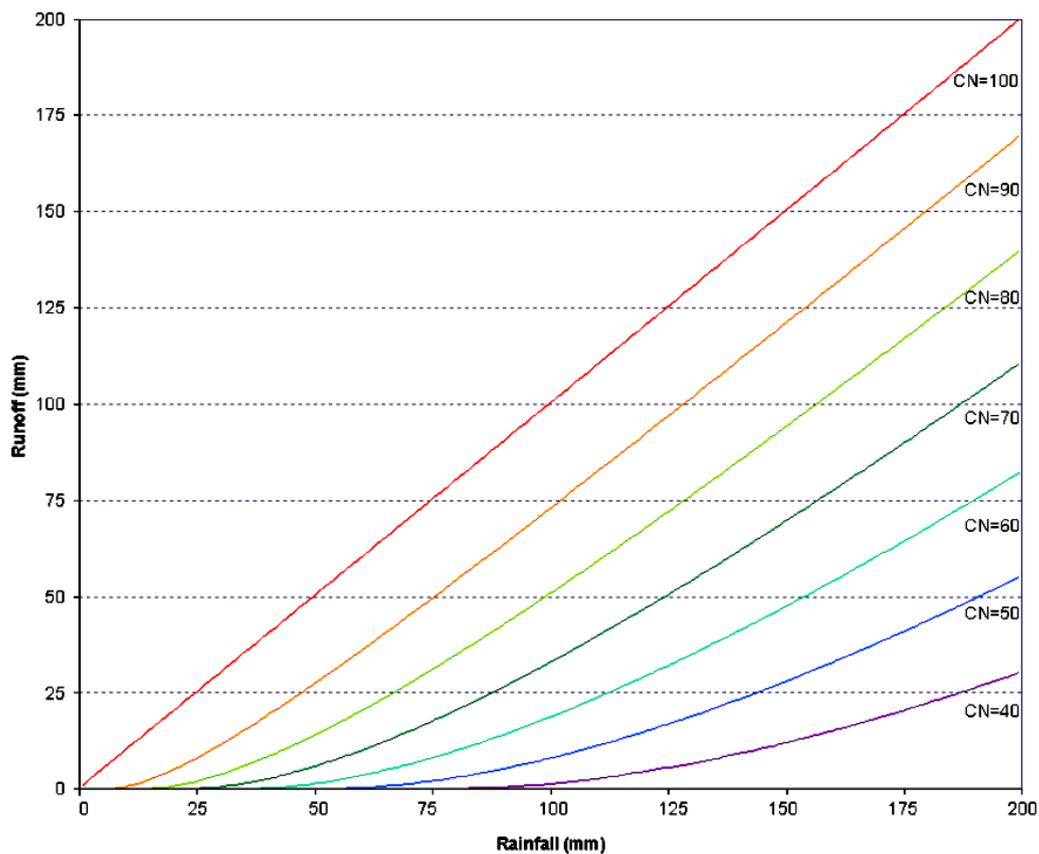


Figura 19: Relação entre a vazão e a precipitação no método SCS de Curva de Número.

(Fonte: SWAT, 2000)

4.3 - Modelagem no SWAT

O SWAT necessita de uma grande quantidade de parâmetros de entrada que possuem relação direta com as características físicas da bacia hidrográfica. Por esta ser utilizada como uma escala para operação do referido modelo hidrossedimentológico, em geral aplicam-se simulações contínuas no tempo, necessitando de informações espacializadas e dados tabulares que represente o tempo-espço no qual se deseja obter resultados. O modelo utilizado neste trabalho foi o SWAT 2009, versão também denominada de AVSWAT, que possui interface com o ArcGIS 9.3.

Os dados de entrada necessários para rodar o modelo são inseridos através de uma interface apropriada. Os planos de informação cartográficos (PIs) necessários são: o Modelo Numérico do Terreno (MNT), do qual deriva-se a grade de declividade, o mapa de solos e o uso e cobertura da terra. Assim, a aplicação do modelo ocorre sob as seguintes etapas: delimitação da bacia, sub-bacias e rede hidrográfica com base no MNT; entrada de base de dados cartográficos de solos e uso e cobertura; definição das Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs).

São então definidos os parâmetros físicos da bacia através de dados tabulados de solos e meteorológicos, para que se siga às etapas da simulação, análise de sensibilidade, calibração e enfim simulação da vazão e produção de sedimentos na bacia do Barro Branco para os diferentes cenários de mudança de uso e cobertura propostos. A calibração e validação dos valores simulados são feitos a partir do ajuste de parâmetros físico-hídricos dos solos que contribuem para a resposta hidrossedimentológica.

O SWAT adquiriu uma interface com o SIG ArcView e posteriormente com ArcGIS que facilita a entrada de dados no modelo e subdivide automaticamente a bacia em sub-bacias a partir do MNT, e então relaciona os dados de entrada a cada sub-bacia. Além disso, essa interface possibilita a exibição dos dados de saída utilizando-se de mapas, gráficos e tabelas da plataforma. Os processos de funcionamento aqui citados estão representados na Figura 20.

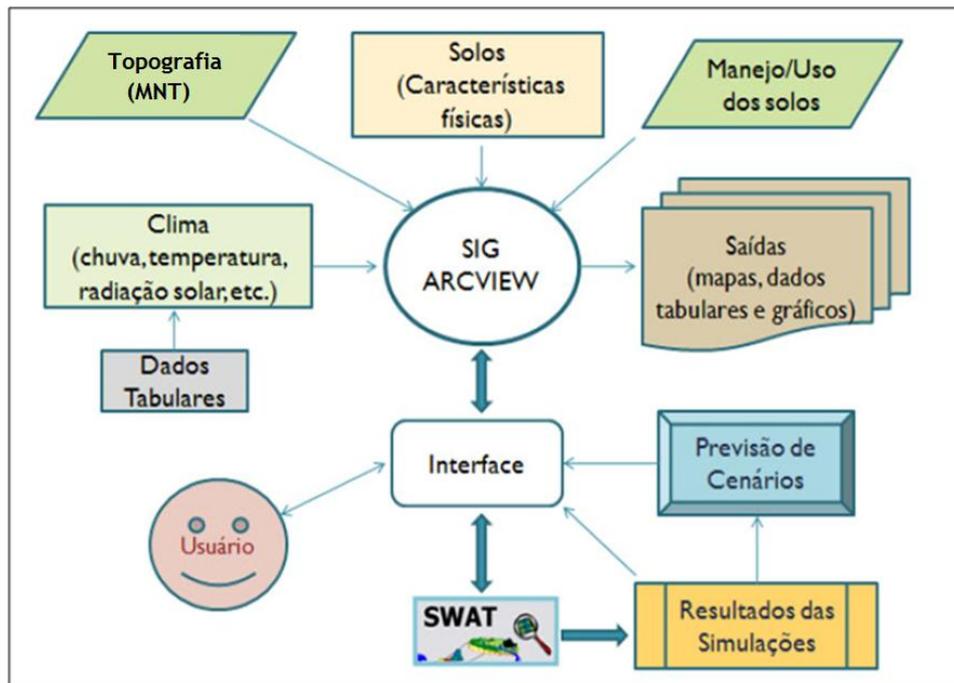


Figura 20: Base de dados requerido pelo SWAT. Modificado de Uzeika (2009).

4.3.1 – Sub-divisao da bacia hidrográfica

A delimitação da bacia em sub-bacias foi realizada definindo uma área de drenagem mínima (ADM), em hectares, a partir do MNT. Posteriormente à definição da ADM, com área de drenagem mínima de 8ha, o modelo sugere um ponto de monitoramento para cada confluência, representando o exutório de cada sub-bacia e onde espacialmente se daria a coleta dos dados de vazão e escoamento simulados. Estes pontos podem ser configurados, realocados, excluídos ou adicionados de acordo com o propósito do pesquisador.

4.3.2 - Unidades de resposta hidrológica (HRUs)

O método utilizado para a definição das unidades de resposta hidrológica (HRUs) foi a combinação dos usos e cobertura da terra, os solos e a declividade em cada sub-bacia, abrangendo suas características em comum. A Figura 21 representa de forma esquemática como o modelo cria as URH's. Para que isso ocorra, os mapas de solos, uso e cobertura devem ser inseridos na estrutura de “shape” ou “raster”. Os mapas foram inseridos na estrutura “raster” por ser a leitura padrão do modelo e por estar em concordância com a estrutura do MNT.

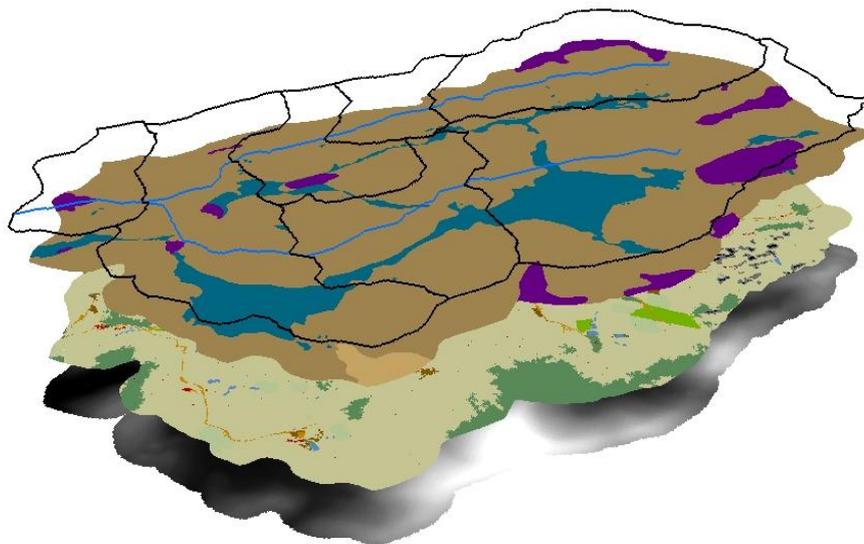


Figura 21: Planos cartográficos para gerar as URHs.

O programa oferece duas opções de distribuição de URH's: URH único ou URH múltiplos para cada sub-bacia. Para um URH único, seleciona-se a URH de igual dominância para a categoria de uso e cobertura dentro de cada sub-bacia. Para URH múltiplos, deve-se especificar o nível de sensibilidade do uso e cobertura da terra, de solos e de declividade para determinar o número específico de URH's em cada sub-bacia, sendo esta a opção utilizada.

Após a reclassificação dos planos de informações, o modelo gera um relatório com a distribuição espacial de cada classe por sub-bacias. Estes dados foram analisados para que pudesse ser adotado um valor de sensibilidade correspondente ao percentual da menor área para cada elemento espacial por sub-bacias de forma a contemplar todas as classes.

4.3.3 – Simulação

A simulação foi iniciada após a definição das URHs e nesta etapa não há grandes alterações a serem feitas, utiliza-se apenas o passo a passo do modelo. A simulação do SWAT foi realizada por meio da ferramenta “*Run SWAT*” (Figura 22a) e da janela “*Setup and Run SWAT Model Simulation*” (Figura 22b), que, após terem seus

campos configurados, tiveram acionados em sequência os comandos “*Setup SWAT Run*” e “*Run SWAT*”.

4.3.4 – *Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Calibráveis*

A análise de sensibilidade avalia quais e como os diferentes parâmetros influenciam na resposta final dos valores de vazão simulados (WHITE & CHAUBEY, 2005; CIBIN et al, 2010). A identificação destes parâmetros geralmente é usada para proceder com a calibração do modelo, que implica na modificação dos valores dos parâmetros com intuito de comparar os resultados de interesse previstos com os dados medidos até que uma função objetiva seja alcançada (WHITE & CHAUBEY, 2005).

Cada conjunto de parâmetros passível de ser manipulado atua em determinados processos hidrológicos e influencia um determinado comportamento nos valores das vazões. Os parâmetros relacionados às propriedades físicas dos solos variam na escala de perfil e possuem relação direta com a quantidade de água que infiltra e se transforma em escoamento superficial, estes são apresentados na Tabela 07, que mostra ainda aqueles selecionados para a presente área de estudo em função da análise de sensibilidade (Figura 24).

Tabela 07: Relação de parâmetros calibráveis na simulação da vazão. Em negrito os parâmetros utilizados na calibração da vazão para a bacia do Barro Branco.

Nº	Parâmetro	Definição	Unidade
1	Alpha_Bf	Constante de recessão do escoamento de base	Dias
2	Biomix	Eficiência da atividade biológica	Adimensional
3	Canmx	Interceptação máxima da vegetação	Mm
4	Ch_Cov	Fator de cobertura do canal	Adimensional
5	Ch_K2	Condutividade hidráulica na base do canal principal	mm/h
6	Ch_N2	Coefficiente de rugosidade do canal principal	m ^{-1/3} /s

7	Cn2	Curva Número	Adimensional
8	Epco	Fator de compensação para uso de água pelas plantas	Adimensional
9	Esco	Coefficiente de compensação da evaporação no solo	Adimensional
10	Gw_Delay	Tempo de recarga do aquífero	Dias
11	Gw_Revap	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	Adimensional
12	Gwqmn	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	Mm
13	Rchrg_Dp	Fração de percolação para o aquífero profundo	Adimensional
14	Revapmn	Limite de água no aquífero raso para ocorrer percolação	Mm
15	Sftmp	Temperatura para ocorrer a precipitação de neve	°C
16	Slope	Declividade	m/m
17	Ssubbsn	Comprimento da vertente	M
18	Sfmfn	Taxa mínima de derretimento de neve	mm/°C/dia
19	Sfmfx	Taxa máxima de derretimento de neve	mm/°C/dia
20	Smtmp	Temperatura base para ocorre o derretimento da neve	°C
21	Sol_Alb	Albedo do solo	Adimensional
22	Sol_Awc	Água disponível no horizonte do solo	mm/mm
23	Sol_K	Condutividade hidráulica saturada	mm/h
24	Sol_Z	Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo	Mm
25	Surlag	Atraso do escoamento superficial	Dias

26	Timp	Fator de atraso na temperatura do pacote de neve	Adimensional
27	Tlaps	Lapso de temperatura na relação temperatura/altitude	°C/km

O Fator de compensação de evaporação do solo (ESCO) leva em consideração o efeito de capilaridade do solo; seu valor varia de 0 a 1, sendo que os valores diminuem à medida que é possível extrair mais água dos níveis mais baixos do solo. O Fator de compensação de águas pelas plantas (EPCO) é relacionado ao teor de umidade das camadas superficiais do perfil do solo; quando este teor diminui, as plantas compensam com a retirada de água nas camadas mais profundas: o EPCO varia de 0,01 a 1, sendo que valores mais próximos a 1 indicam um maior uso de camadas mais profundas nessa compensação.

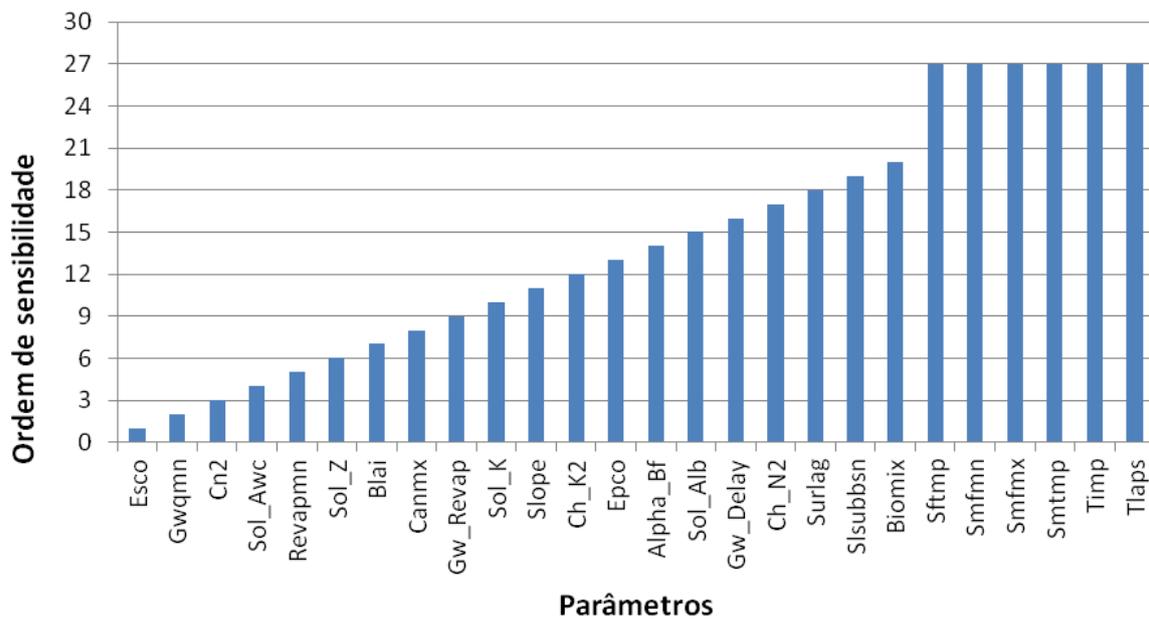


Figura 24: Análise de sensibilidade para escolha dos parâmetros de calibração.

A Condutividade hidráulica no solo saturado (SOL_K) ou a taxa de fluxo da água no solo é a medida que expressa a facilidade de movimento da água através do solo; já a Capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) representa a quantidade de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo, calculada pela subtração

entre a quantidade de água na capacidade de campo e a fração de água no ponto de murcha permanente do solo.

O Albedo do solo úmido (SOL_ALB) consiste na razão entre a quantidade de energia refletida por um corpo e a quantidade de radiação incidente, sendo importante no processo de evaporação. O valor atribuído ao albedo deve ser calculado quando o solo estiver próximo à ou na própria capacidade de campo; o BIOMIX (adimensional) é a Eficiência do revolvimento biológico, representando a redistribuição das propriedades de um solo devido à atividade biológica. O SWAT considera que o revolvimento biológico pode ocorrer até uma profundidade de 300 mm, variando de acordo com o tipo de solo.

A Profundidade total do solo (SOL_Z) e valores adimensionais da Curva Número na condição II de umidade (CN2) são utilizados para o cálculo do escoamento superficial e variam em função da permeabilidade do solo, uso da terra e condições antecedentes de umidade do solo, podendo ser modificado por alterações no manejo da terra ou por variações do ciclo natural de colheita e crescimento de lavouras.

Os parâmetros relacionados às propriedades físico-hídricas dos aquíferos raso e profundo variam em escala e influenciam os fluxos de retorno e de base, conseqüentemente, a quantidade de água que retorna aos canais. Os parâmetros Tempo de retardo do fluxo das águas subterrâneas (GW_DELAY) representa o tempo em que a água se move pelas camadas do solo até encontrar o aquífero raso e que dependerá do nível piezométrico, das propriedades hidráulicas e das formações geológicas do subsolo.

A Água do aquífero raso que retorna ao canal (GWQMIN) consiste no limite de profundidade necessário para que ocorra o fluxo de retorno das águas subterrâneas para o canal; já o Coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular (GW_REVAP) indica que nos períodos de estiagem, a franja capilar que separa a zona saturada da zona insaturada irá evaporar e, assim, na medida em que a água evapora, o aquífero reabastece a franja capilar; a água também poderá ser retirada de aquíferos por plantas com raízes profundas, principalmente quando a zona saturada estiver próxima da superfície.

A Constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF) é um indicador direto da resposta do fluxo das águas subterrâneas em função da recarga da bacia, seus valores podem variar de 0 a 1, sendo os menores valores obtidos em locais onde as

respostas às recargas são mais lentas; o parâmetro Limite da profundidade da água no aquífero raso para que ocorra a percolação para o aquífero profundo (REVAPMN) também integra o grupo de parâmetros relacionados aos fluxos da zona saturada.

Os parâmetros relacionados à propagação da água pelo canal até atingir o exutório da bacia são a Condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_K2), taxa com que o rio perde água para o subsolo (para os rios que recebem água frequentemente do escoamento de base, a condutividade hidráulica será zero) e o Coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (CH_N2) (valores que variam de acordo com os atributos físicos do canal principal), que podem ser encontrados em Chow (1959) ou Neitsch *et. al.* (2011), o qual possui uma lista com muitos valores do coeficiente de rugosidade.

Existem ainda parâmetros que interferem no volume de água interceptado como o Máximo armazenamento do dossel (CANMX), que representa a quantidade de água interceptada na copa das árvores; e o Máximo índice de área foliar potencial (BLAI), usados para quantificar o desenvolvimento foliar durante a fase de crescimento da planta.

Parâmetros que interferem nos processos de escoamento como a Declividade média da sub-bacia (SLOPE) obtido na fase de geoprocessamento do modelo, são calculados a partir do modelo digital de elevação do terreno; assim como o Comprimento médio da encosta em metros (SLSUBBSN) que deve ser medido do topo da encosta até o ponto onde o escoamento começa a se concentrar e - Coeficiente de retardo do escoamento superficial, SURLAG (adimensional).

Em grandes sub-bacias, como tempo de concentração é maior que um dia, apenas parte do escoamento superficial irá atingir o tributário principal no dia em que ele for gerado. O modelo considera o armazenamento de parte do escoamento superficial, de forma a retardar a entrada de água oriunda do escoamento superficial no canal principal. E, ainda, parâmetros que são usados nas equações relacionadas à ocorrência de neve na bacia hidrográfica, no entanto, não serão abordados nesse estudo já que não condizem com as condições climáticas da área de estudo.

4.3.5 – Calibração e validação dos resultados

A calibração permite ao usuário editar o desempenho das variáveis de entrada no modelo (SAMMONS & NEITSCH, 2000). Segundo ARNOLD *et. al.* (2000), o

primeiro passo para a calibração é dividir os valores medidos em duas séries temporais, sendo uma usada para calibração e outra para validação. Considera-se ainda um período para aquecimento do modelo, como na Figura 25.

No período de calibração, os parâmetros de entrada do modelo são variados/modificados até se obter um ajuste aceitável. Já no período de verificação (validação) do modelo, os parâmetros obtidos no período de calibração são utilizados para executar o modelo e seu ajuste é analisado. Seguindo a metodologia utilizada por alguns autores (ARNOLD *et. al.*, 2000; ADRIOLO, 2008; LOPES, 2008).

Sendo assim, no modelo, a calibração implica na modificação de parâmetros e comparação dos valores de saída de interesse com os valores observados, até que uma função objetiva seja alcançada de forma a atribuir como satisfatória a simulação (JAMES & BURGESS, 1982; WHITE & CHAUBEY, 2005). Para avaliar a validação realizada, verificando se o modelo tem a capacidade de simular dados de outros períodos ou condições diferentes das quais os parâmetros foram ajustados, foi necessário reexecutar a simulação utilizando um período de dados posterior ao calibrado.

A maior parte dos aplicativos do SWAT exige algum tipo de calibração. Os parâmetros de entrada deste modelo estão fisicamente baseados e podem variar dentro de um intervalo de incerteza realista durante a calibração, e as técnicas de análise e calibração são geralmente referidas como manual ou automatizada, e podem ser avaliadas com uma ampla gama de procedimentos gráficos e/ou estatísticos.

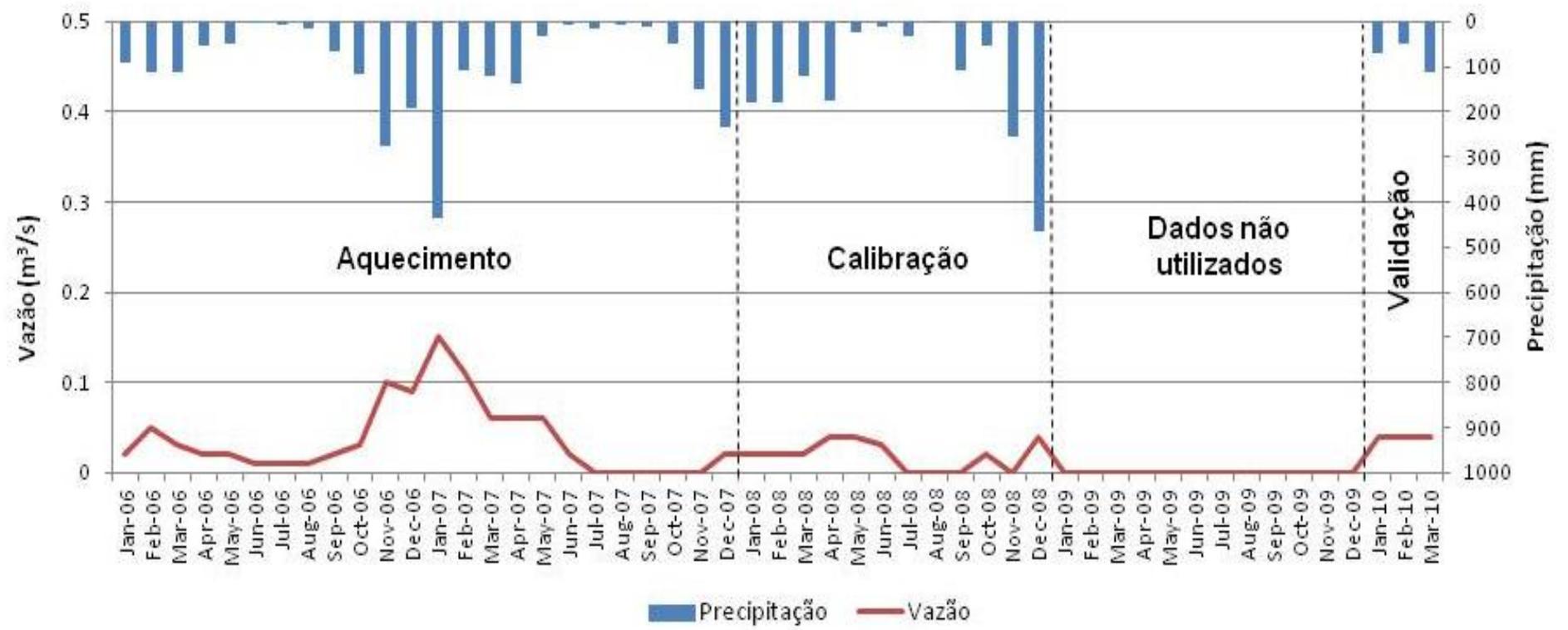


Figura 25: Série de dados de precipitação e vazão utilizados nas etapas da modelagem.

4.3.6 – Análise de desempenho do modelo

A aplicação de técnicas como análises gráficas e índices estatísticos são comumente utilizadas em projetos de simulações hidrológicas para correlações entre dados estimados e dados observados. ASCE (1993); Legates & McCabe (1999) e Moriasi *et. al.* (2007) recomendam a utilização da combinação de técnicas gráficas e estatísticas quantitativas para avaliação do desempenho do modelo.

A análise do desempenho do modelo foi realizada através de três índices estatísticos: o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NS); e o índice estatístico PBIAS, que são os mais utilizados (GASSMAN *et. al.*, 2007) nas análises de desempenho do modelo SWAT.

O coeficiente de determinação (R^2) descreve a proporção entre os dados observados e os dados estimados, variando de 0 a 1, sendo estes valores aqueles que representariam uma correlação linear negativa ou positiva perfeita (MORIASI *et. al.*, 2007). O coeficiente de eficiência Nash e Sutcliffe (NS) determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variação dos dados medidos (MORIASI, 2007) e o PBIAS mede a tendência dos fluxos simulados para ser maior ou menor do que seus homólogos observados.

De acordo com Moriasi *et. al.* (2007), valores de COE > 0,5 para NS demonstram que o modelo é capaz de simular de forma adequada os valores observados, já os valores de PBIAS apresentam o valor ideal é de 0,0; valores positivos indicam um modelo de viés em direção a subestimação, enquanto valores negativos indicam um viés em direção a superestimação. NS e PBIAS são calculados pelas Equações 2 e 3:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo Em o evento observado, Es o evento simulado, E é a média do evento observado; e n , o número de eventos.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad \text{(Equação 3)}$$

Sendo Y^{obs} o evento observado, Y^{sim} o evento simulado.

A Tabela 08 lista o intervalo dos valores e sua avaliação de acordo com Moriasi *et. al.* (2007). Embora os índices escolhidos sejam amplamente usados para avaliação de modelos hidrológicos, estas correlações estatísticas se mostram sensíveis aos valores extremos registrados pelo modelo nos picos de vazão e na relação com o fluxo de base.

Tabela 08: Intervalo dos valores dos índices estatísticos e sua classificação quanto ao desempenho do modelo.

Avaliação de desempenho	R ²	NS	PBIAS
Muito bom	0.75 a 1	0.75 a 1	< ± 10
Bom	> 0.5	0.65 a 0.75	±10 a ±15
Satisfatório	0.4 a 0.5	0.50 a 0.65	±15 a ±25
Ruim		-∞ a 0.50	> ±25

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Dados climatológicos

Na Figura 26, estão relacionados os resultados, obtidos através do monitoramento, das médias para todos os meses da série temporal (2006-2011) referentes à precipitação e vazão, e que condizem com os parâmetros de entrada requeridos pelo modelo.

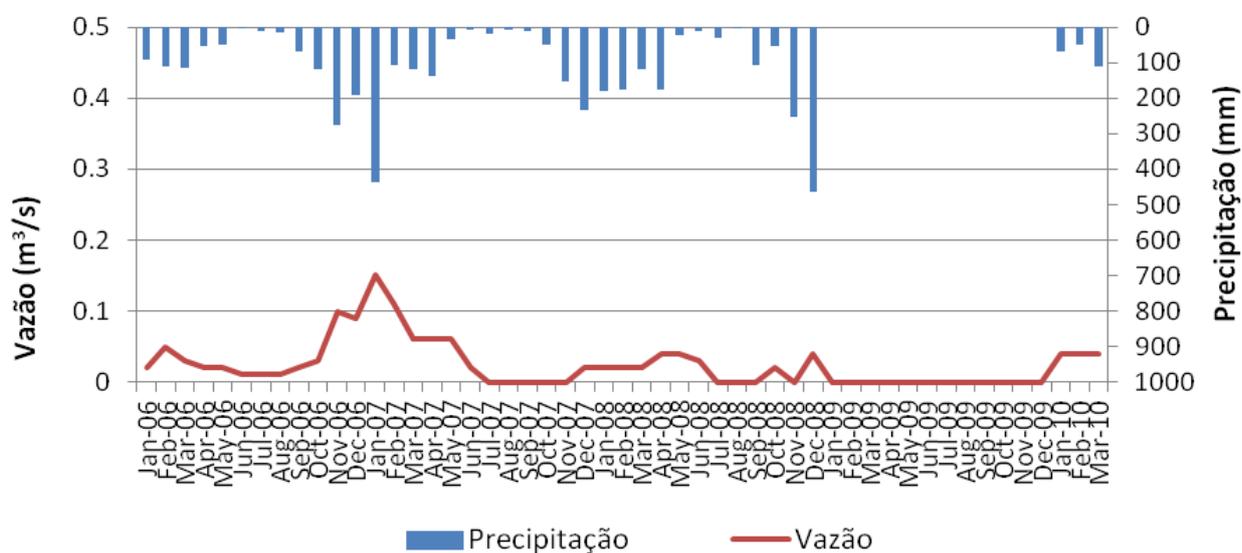


Figura 26: Dados gerados pelo WGEN.

Como resultado dos cálculos realizados para a estimativa dos parâmetros de entrada no banco de dados do gerador climático WXGEN, a Tabela 09 apresenta os resultados para a média de cada mês pra todos os anos da série temporal utilizada. Nela, os dados monitorados e inseridos no gerador climático aparecem destacados no retângulo vermelho, os demais parâmetros foram simulados.

Tabela 09: Dados climatológicos inseridos no modelo.

Estação Barro Branco	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
tmpmx	30.08	32.47	30.76	29.89	27.32	26.26	27.00	27.19	27.46	28.28	28.63	30.65
tmpmn	21.09	22.71	21.76	20.46	17.58	16.04	15.79	16.26	17.20	19.66	20.57	22.47
tmpstmx	5.62	2.62	2.39	2.52	2.44	2.74	3.20	3.32	3.37	3.89	3.94	3.36
tmpstdmn	5.04	1.36	1.69	1.75	2.22	2.19	2.80	2.74	3.01	2.31	2.26	2.87
pcpmm	192.20	103.18	187.15	99.89	25.83	18.17	16.81	12.05	56.66	98.40	225.72	303.27
pcpstd	15.93	6.92	11.95	7.98	4.05	3.08	2.21	1.65	5.26	7.90	13.33	19.25
pcpskw	5.80	2.01	3.59	4.08	9.00	6.90	5.06	5.39	3.38	2.94	2.84	3.90
pr_w(1)	0.21	0.21	0.30	0.24	0.14	0.12	0.17	0.10	0.15	0.26	0.38	0.32
pr_w(2)	0.68	0.63	0.63	0.45	0.31	0.37	0.15	0.32	0.59	0.59	0.68	0.71
pcpd	13.00	10.33	13.50	9.67	5.33	4.50	5.40	3.80	8.20	11.20	16.20	16.00
rainhmx	41.75	44	17.25	18.25	4.75	5.25	6.5	2	13.5	20.5	25.75	26
solarav	24.84	19.28	25.86	30.77	41.35	43.09	39.13	26.83	30.06	32.07	33.28	33.87
dewpt	0.74	0.7	0.73	0.74	0.74	0.73	0.73	0.68	0.68	0.71	0.74	0.73
windav	1.11	1.06	0.93	0.84	0.85	0.88	0.96	1.12	1.36	1.31	1.17	1.08

5.2 – Uso e cobertura da terra

Para este estudo, optou-se por segmentar a área baseando-se apenas nas bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, às quais foi atribuído o mesmo peso; tal escolha baseou-se em testes de inserção/exclusão das demais bandas e verificação do isolamento dos objetos pretendidos. Para atender à escala cartográfica 1:10.000, foi utilizado o parâmetro de escala – conjugação definida pelo programa de área mínima e similaridade – de 150 no primeiro nível e 50 em nível hierárquico inferior, com vistas ao maior detalhamento (Figura 27).

O passo seguinte foi a inserção de cada uma das classes e a modelagem *fuzzy* de seus descritores. Estes foram selecionados de acordo com a maior separabilidade em relação às demais classes; também foram testadas combinações diversas e as respostas das bandas do vermelho e infravermelho próximo novamente mostraram-se eficientes para aplicação na legenda proposta.

A Figura 28 exemplifica alguns dos descritores importantes na modelagem das classes de florestas, fortemente amparada pelo índice da diferença normalizada da vegetação (Figura 28a); de estradas, com a máxima diferença das bandas (Figura 28b); e da água, com o desvio padrão do intervalo espectral verde (Figura 28c).

A partir de tal modelagem, o algoritmo *Classification* generaliza os intervalos espectrais definidos em cada classe para todos os objetos gerados na etapa de segmentação, enquadrando-os na legenda. A Figura 29 exhibe parte dos resultados obtidos, em fase conclusiva do processamento digital para classificação automática, com os objetos segmentados e já classificados, e em processo de edição manual, manipulação do usuário inerente aos mais diversos processamentos automáticos para verificação e correção de possíveis erros de omissão e/ou inclusão. A etapa seguinte diz respeito a edição e finalização do *layout* do vetor (Figura 30).

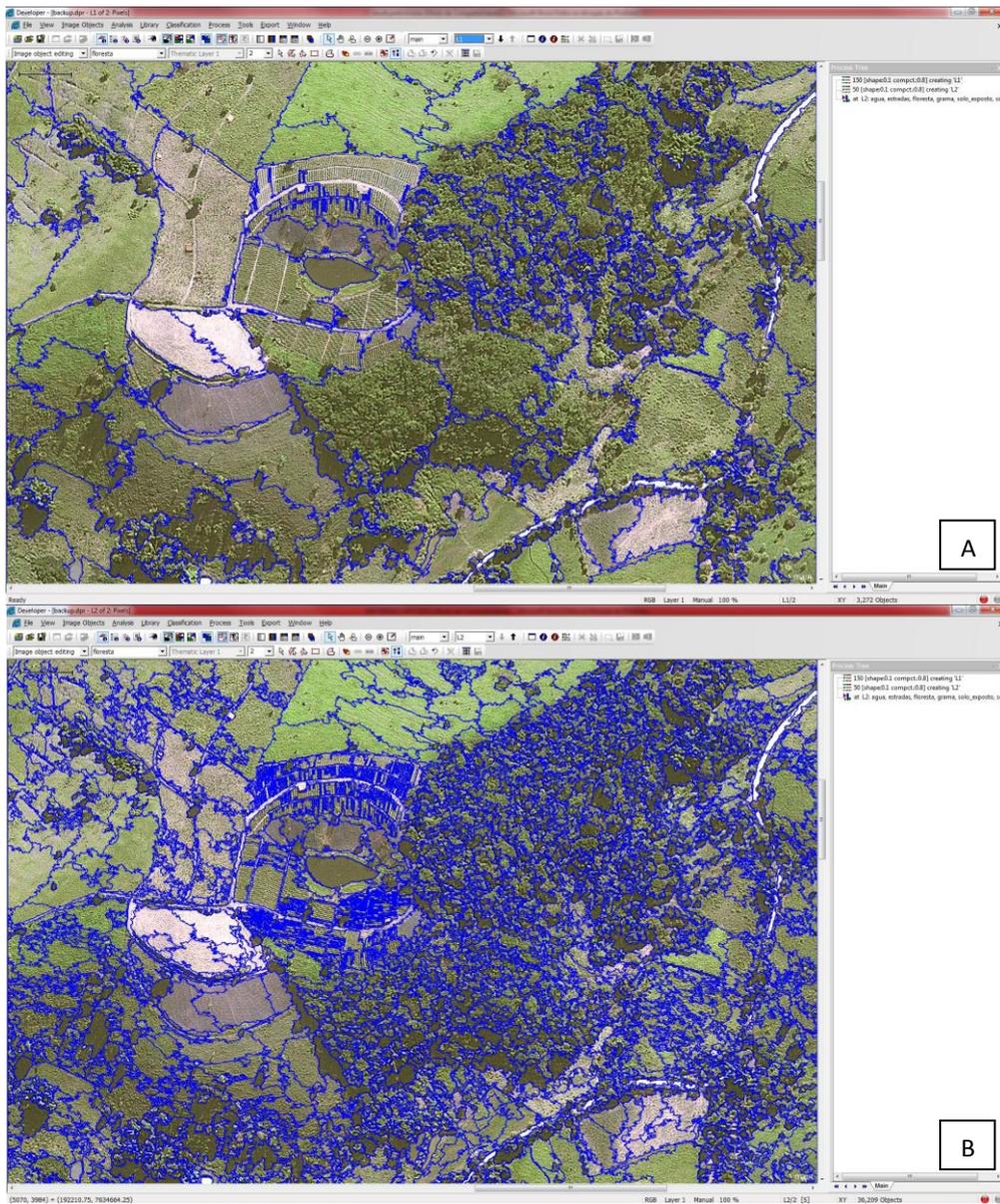


Figura 27: Segmentação multirresolução nos níveis 1 (A) e 2 (B).

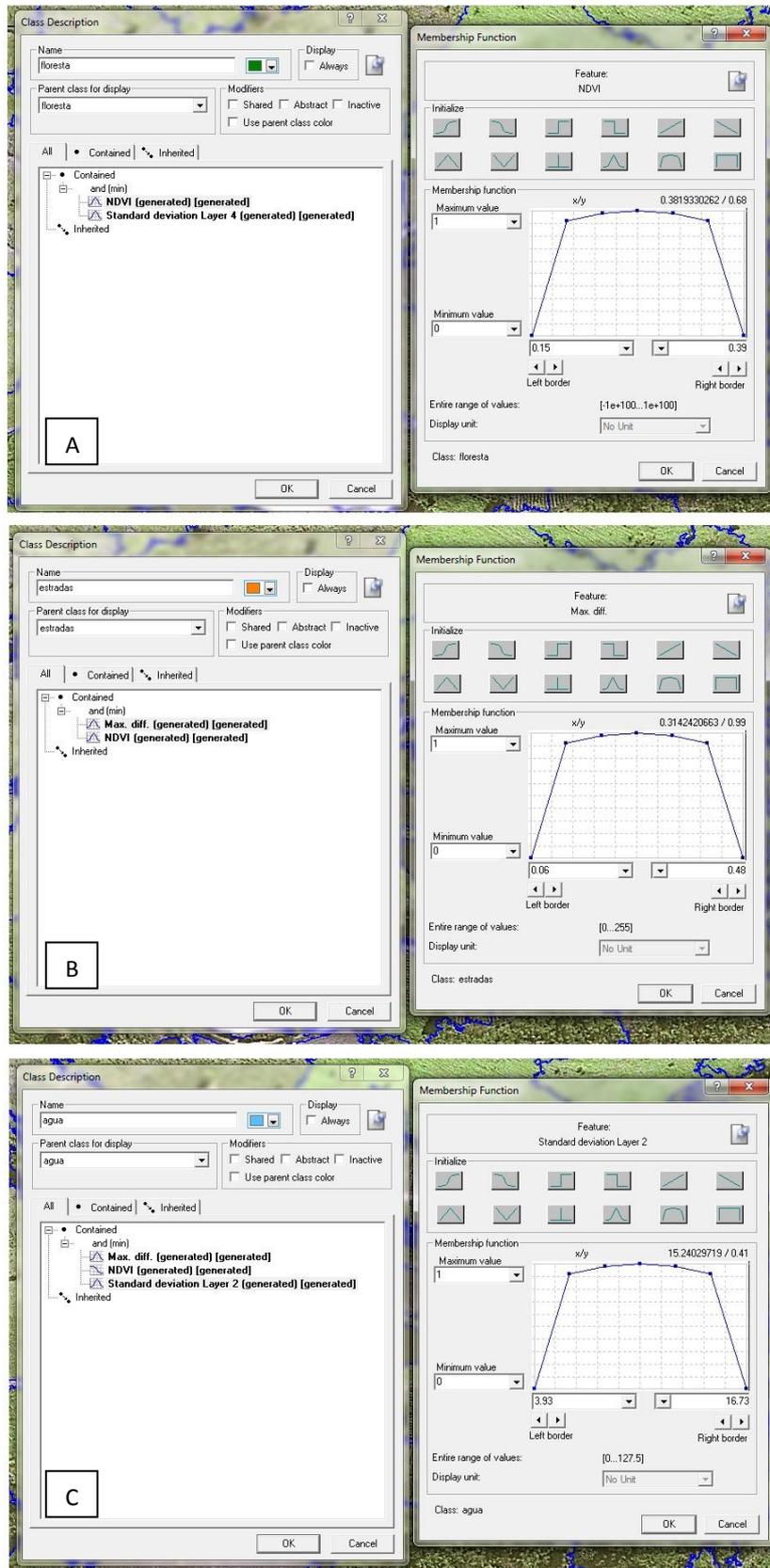


Figura 28: Descritores espectrais para as classes de florestas (A), estradas (B) e água (C).

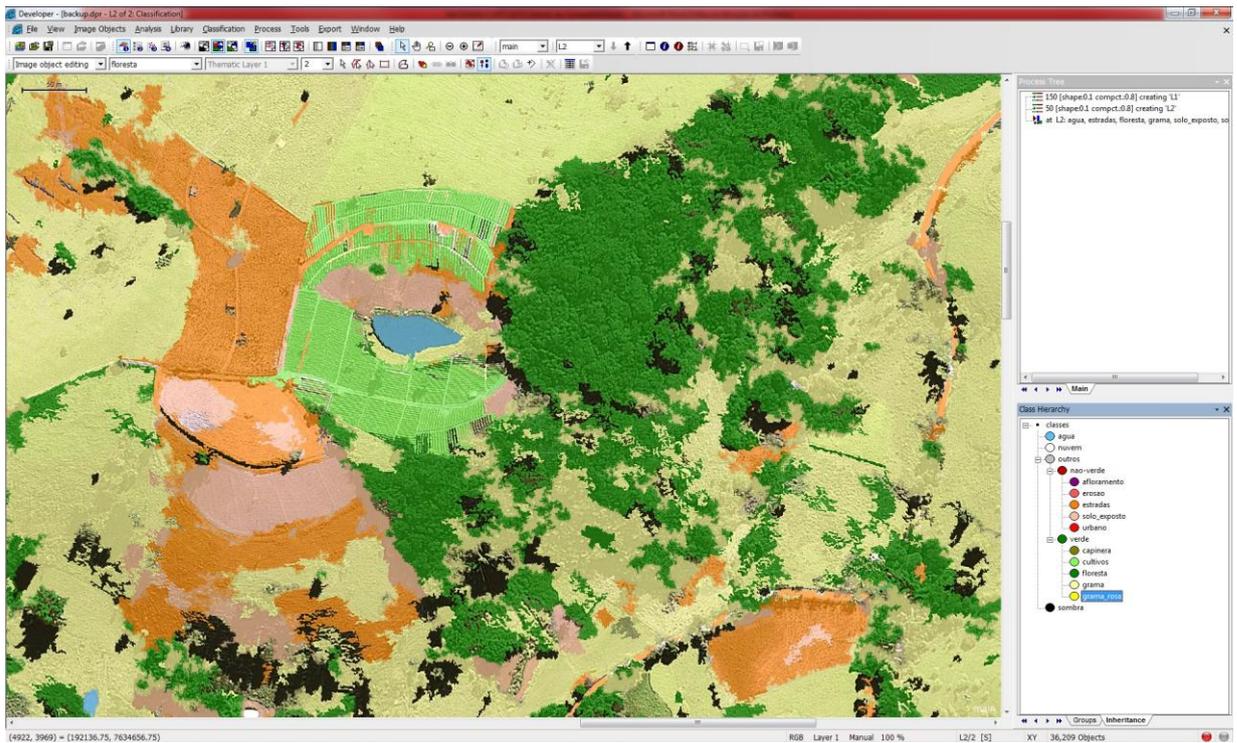


Figura 29: Resultados preliminares da classificação automática.

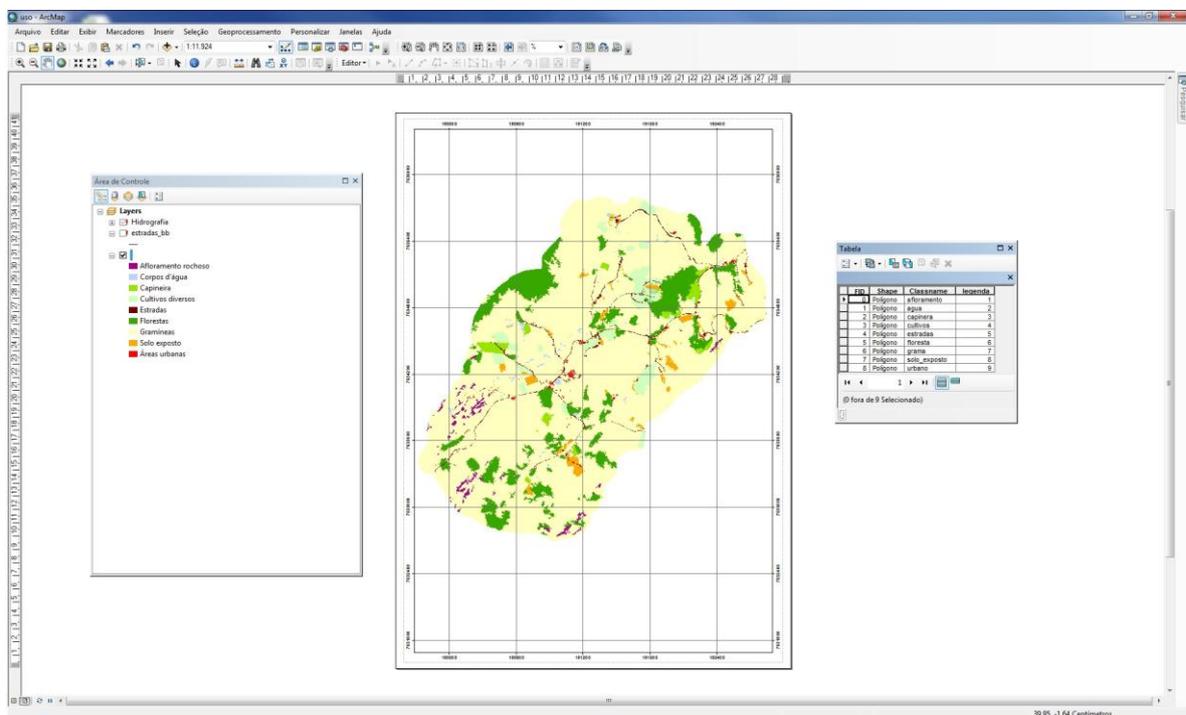


Figura 30: Edição e finalização do vetor.

Desta forma, foram encontrados os resultados expostos na Tabela 10, que evidenciaram a matriz de vegetação herbácea predominante na área, com cerca de 80% que majoritariamente apresenta o uso de pastagem extensiva, e os isolados remanescentes florestais com alto índice de fragmentação que somam pouco mais de 10% da cobertura da bacia. Pontualmente, destacam-se a vegetação em regeneração (arbustivo, 1,35%), as culturas temporárias de tomate e milho (3,41%) predominantes nas encostas e os afloramentos rochosos no alto curso (0,82%).

Tabela 10: Distribuição dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra.

Classe	Área (km²)	Área (%)
Afloramento rochoso	0,05	0,82
Água	0,03	0,48
Arbustivo	0,08	1,35
Cultivos	0,19	3,41
Estradas	0,06	1,11
Florestas	0,66	11,68
Gramíneas	4,44	79,12
Solo exposto	0,10	1,74
Áreas urbanas	0,02	0,28

5.3 – Unidades de Resposta Hidrológica da Bacia do Barro Branco

Através da base de dados de uso e cobertura da terra, tipos de solos e declividade do terreno foi possível gerar as Unidades de Resposta Hidrológica, cujos efeitos são propagados para as sub-bacias e enfim para toda a área de estudo, sendo fundamentais para o modelo definir onde há maior produção hidrossedimentológica (Figura 31).

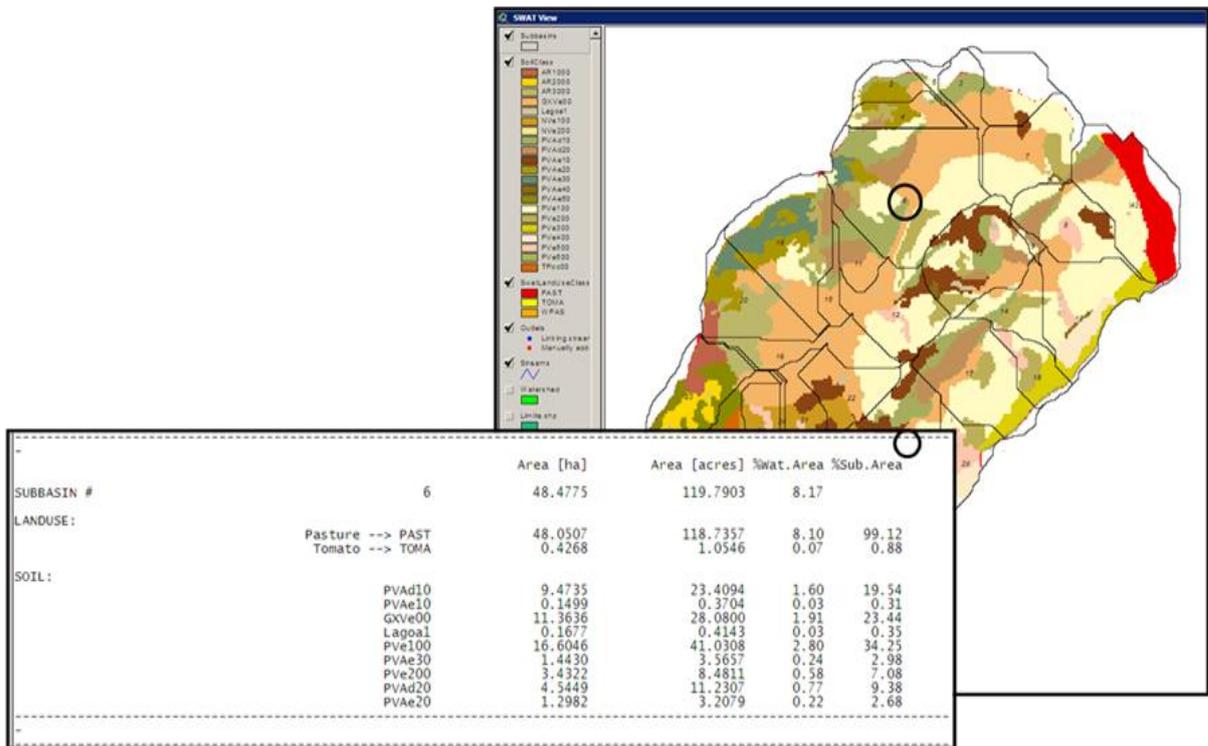


Figura 31: URH representativa dos solos, parâmetro atribuído pelo SWAT.

5.4 – Calibração

A calibração foi efetuada manualmente, através dos valores relativos aos parâmetros mais sensíveis, apresentados anteriormente no item 4.3.4. Estes parâmetros foram escolhidos baseados na literatura, nas orientações contidas no manual do modelo SWAT 2000, juntamente com a ordem de sensibilidade apresentada pelo modelo.

Os parâmetros podem ser calibrados através de duas opções: substituição do valor ou multiplicação do valor. Substituir valor significa que o valor atribuído ao parâmetro torna-se o mesmo para todo o conjunto de bacia calibrado. A multiplicação mantém a proporção, visto que cada sub-bacia, HRU ou tipo de solo, apresenta-se um valor inicial próprio para determinados parâmetros. Estes valores foram alterados até chegar-se a uma simulação que representasse o regime hidrológico da bacia.

Após a primeira simulação das vazões diárias (2006-2011), sem calibração prévia, chegou-se a resultados de saída que não condiziam com a realidade. O modelo subestimou a vazão mínima e superestimou as vazões máximas, portanto fez-se necessária a calibração dos dados. O modelo foi calibrado buscando um melhor ajuste

do escoamento de base através dos parâmetros que alteram a quantidade de água subterrânea que retorna ao canal fluvial. Os valores iniciais dos parâmetros testados e as faixas de variação dos valores estão apresentados na Tabela 11, bem como os valores ótimos dos parâmetros adotados.

Tabela 11: Intervalos, valores iniciais e valores adotados para calibração dos parâmetros.

Parâmetros	Valor Mínimo	Valor Máximo	Inicial	Ajustado
Esco	0.0	1.0	0.0	0.1
Sol_Awc	0.0	1.0	0.1	0.6
Alpha_Bf	0.0	1.0	0.05	0.1
Cn2	20.0	90.0	69.0	0.9*
Sol_K	0.0	2000	12.0	0.5*
Canmx	0.0	10.0	0.0	10.0
Slope	0.0	150	9.0	0.5*
Gwqmn	0.0	5000	0.0	3000
Gw_Revap	0.02	0.2	0.02	0.2
Revapmn	0.0	500	1.0	350

*Parâmetros multiplicados; demais parâmetros, substituídos.

A análise de sensibilidade mostrou que a metade dos parâmetros (SOL_AWC, CN2, SOL_K, SLOPE, CANMX e BLAI) interfere na geração do escoamento superficial e, conseqüentemente, nas vazões máximas da bacia. De encontro ao trabalho de Abraham *et. al.* (2007), em seu estudo em bacia hidrográfica africana, e Thampi *et. al.* (2010), em bacias indianas, observaram o CN2, o SOL_AWC e o ESCO como parâmetros mais importantes para geração do escoamento superficial. É importante reforçar a abordagem de que quanto mais sensível for considerado o parâmetro, maior importância deve ser dada a obtenção e inserção dos seus valores no modelo.

De acordo com o manual técnico do SWAT (NEITSCH *et. al.*, 2005; NEITSCH *et. al.* 2009) e técnicas de calibração fornecidos na plataforma do programa, quando as vazões máximas simuladas estão superestimadas em relação às vazões máximas observadas, significa que o modelo está representando um sistema com pouco fluxo de base e muito escoamento superficial. Para solucionar este problema, torna-se necessário aumentar a infiltração e o fluxo de retorno.

Este comportamento também pode ser relacionado quando as vazões mínimas e médias simuladas estão subestimadas em relação às observadas. Métodos de calibração com ajustes dos parâmetros que influenciam os fluxos de base, além da produção de escoamento com intuito de contornar essas disparidades, são encontradas em Neitsch *et. al.* (2005); Cibin *et. al.* (2010); Arnold *et. al.* (2000); White & Chaubey (2005).

Resultados semelhantes foram encontrados em Souza (2011), Fukunaga (2012) e Baldissera (2005) e, ao aplicarem as técnicas de calibração e ajustes de parâmetros, puderam encontrar resultados satisfatórios em suas simulações. Sendo assim, para calibrar o modelo de forma a diminuir o valor da vazão líquida simulada, aumentou-se os valores dos parâmetros GWQMN, GW_REVAP, e reduziu-se o REVAPMN, e para corrigir possíveis deslocamentos nas curvas de vazão observada e simulada – ou seja, para evitar que a resposta da vazão às chuvas máximas na simulação esteja com atraso de dias em relação à vazão medida – altera-se o fator ALPHA_BF para o máximo.

A escolha dos valores dos parâmetros relacionados ao fluxo de água de subsuperfície é de difícil determinação e pode sofrer grandes variações, pois o seu conhecimento depende de estudos hidrogeológicos mais complexos e que dificilmente estarão disponíveis para utilização nos locais requeridos. Contudo, os valores obtidos neste estudo ficaram próximos, ou na mesma ordem de grandeza que outros realizados recentemente no país.

O Fator de compensação de evaporação do solo (ESCO), que pode variar entre 0,0 e 1,0, apresentou valores iniciais iguais à zero para todos os usos da terra, porém, estes valores foram modificados de acordo com o tipo de uso e cobertura da terra, sendo atribuído o valor de 0,1 para a floresta; e 0,01 para a pastagem e cultivo de tomate. Esta primeira alteração nos parâmetros já se mostrou representativa na análise de eficiência do modelo, através do Coeficiente de Eficiência de Nash e Suthcliffe ou COE que passou de -133.8 para -80.62.

Os valores da Capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC) tiveram seus valores aumentados em grande proporção, em torno de 30%, e estes sofreram ajustes de

acordo com o tipo de uso da terra, sendo o valor referente ao cultivo de tomate multiplicado por 8.0; o valor referente a floresta multiplicado por 6.0 e o valor referente a pastagem multiplicado por 4.0. Considera-se aqui que ação antrópica aumenta a capacidade de água disponível no solo através da irrigação nas áreas de cultivo do tomate.

Comparando a Constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF) aos demais estudos, os valores não ficaram tão próximos, mas permaneceram dentro da mesma ordem de grandeza. Para o ALPHA_BF (0 – 1) foi utilizado o valor de 0,01 para a bacia do Barro Branco, tendo Salles (2012) adotado o valor de 0,01 e Pinto (2011), 0,012, no seu trabalho em bacia da Serra da Mantiqueira.

O parâmetro de Curva Número de umidade (CN2) teve seus valores reduzidos somente em 10%, evidenciando que os tipos de uso e cobertura da terra selecionados para simbolizar a BIMR, a partir do banco de dados do SWAT, apesar de serem balizados em testes realizados em paisagens norte-americanas, foram representativos para a bacia do Barro Branco.

O valor de SOL_K (0 – 2.000) não sofreu grandes alterações relativas, passando este de 12,0 para 6,0, buscando assim manter uma proximidade com os valores obtidos na análise dos parâmetros dos solos. As alterações dos valores de CN2, SOL_K e SOL_AWC interferiram para o aumento da infiltração de água e seu armazenamento no solo, tendo como consequência a diminuição do escoamento superficial.

Somou-se a esses fatores, o valor do Máximo armazenamento do dossel (CANMAX), que passou a ser de 10 mm, aumentando as abstrações iniciais da bacia e agindo no mesmo sentido dos três parâmetros anteriores. Entretanto, o valor de 10 mm para o armazenamento máximo do dossel pode ser considerado alto para a bacia do Barro Branco, visto que o uso da terra é representado por pastagens com baixas capacidades de interceptação.

Ao considerar a variação do valor da Água do aquífero profundo que retorna ao canal (GWQMN) de 0 a 5.000, o valor de 3.000 ficou aproximadamente 30% abaixo do utilizado por Baldissera (2005), em bacia hidrográfica no estado do Mato Grosso, que adotou o valor máximo permitido para esse parâmetro.

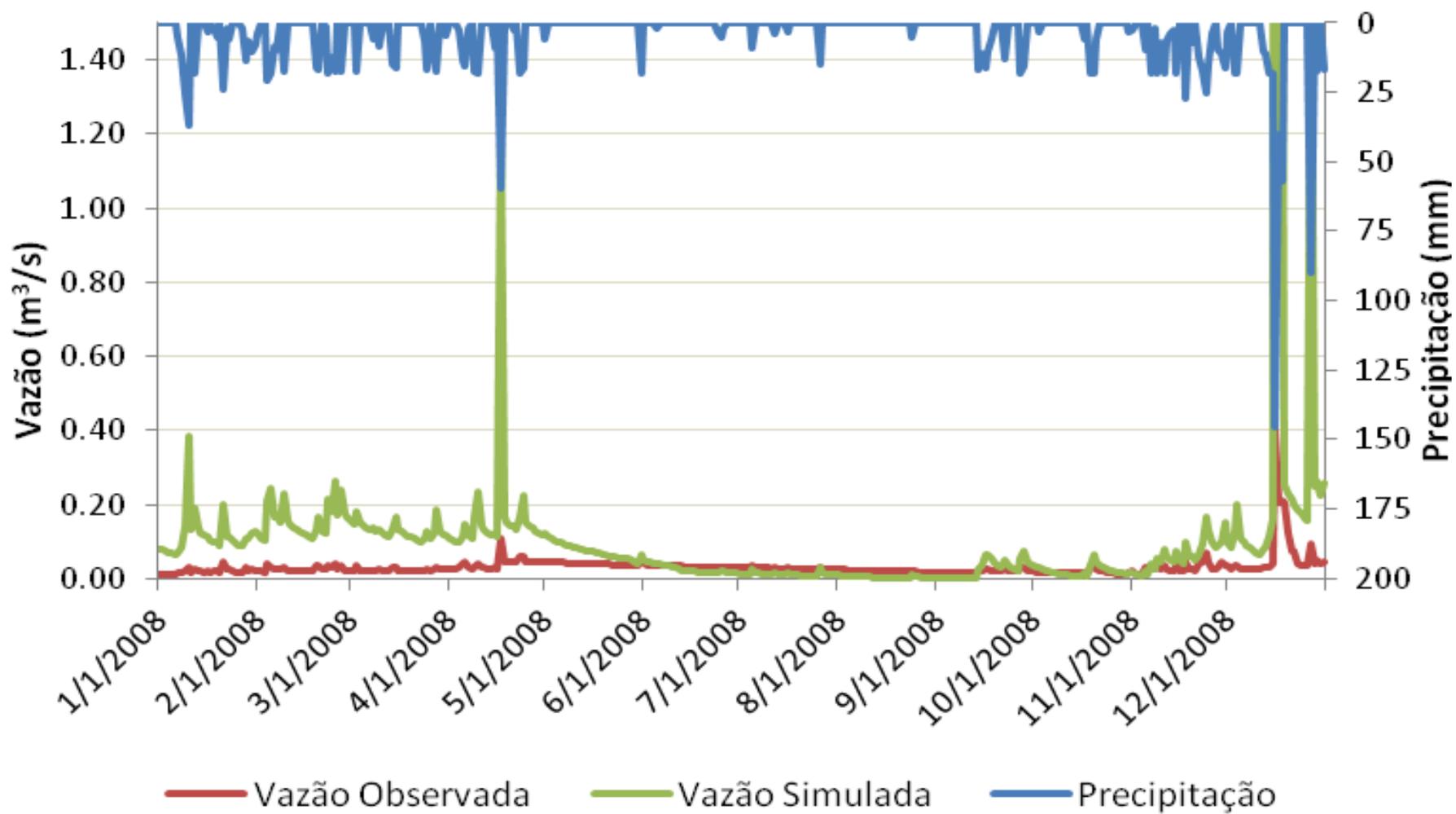
Já para o Coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular (GW_REVAP), cujo valor pode variar de 0,02 até 0,2, foi utilizado o de 0,2, o mesmo valor utilizado por Baldissera (2005) e Sales (2012), que também adotaram o valor máximo de 0,2. Porém, a alteração deste parâmetro após as modificações dos

parâmetros anteriores não foi significativa para a eficiência do modelo. O mesmo ocorreu com o Limite de água no aquífero raso para ocorrer percolação (REVAPMN), que teve seu valor inicial 1,0 substituído para 350, porém sem alterações na eficiência do modelo.

O bom resultado obtido com as modificações dos valores dos parâmetros pode ser observado no hidrograma da vazão medida e no da vazão estimada, nas Figuras 32 e 33, respectivamente. Neles, é possível verificar que os valores medidos e estimados possuem comportamento semelhante, principalmente nas vazões de pico de menor intensidade. Já para as vazões de pico de maiores intensidades, o modelo não teve comportamento semelhante, requerendo melhor ajuste para essas situações, assim como para o fluxo de base que permaneceu subestimado.

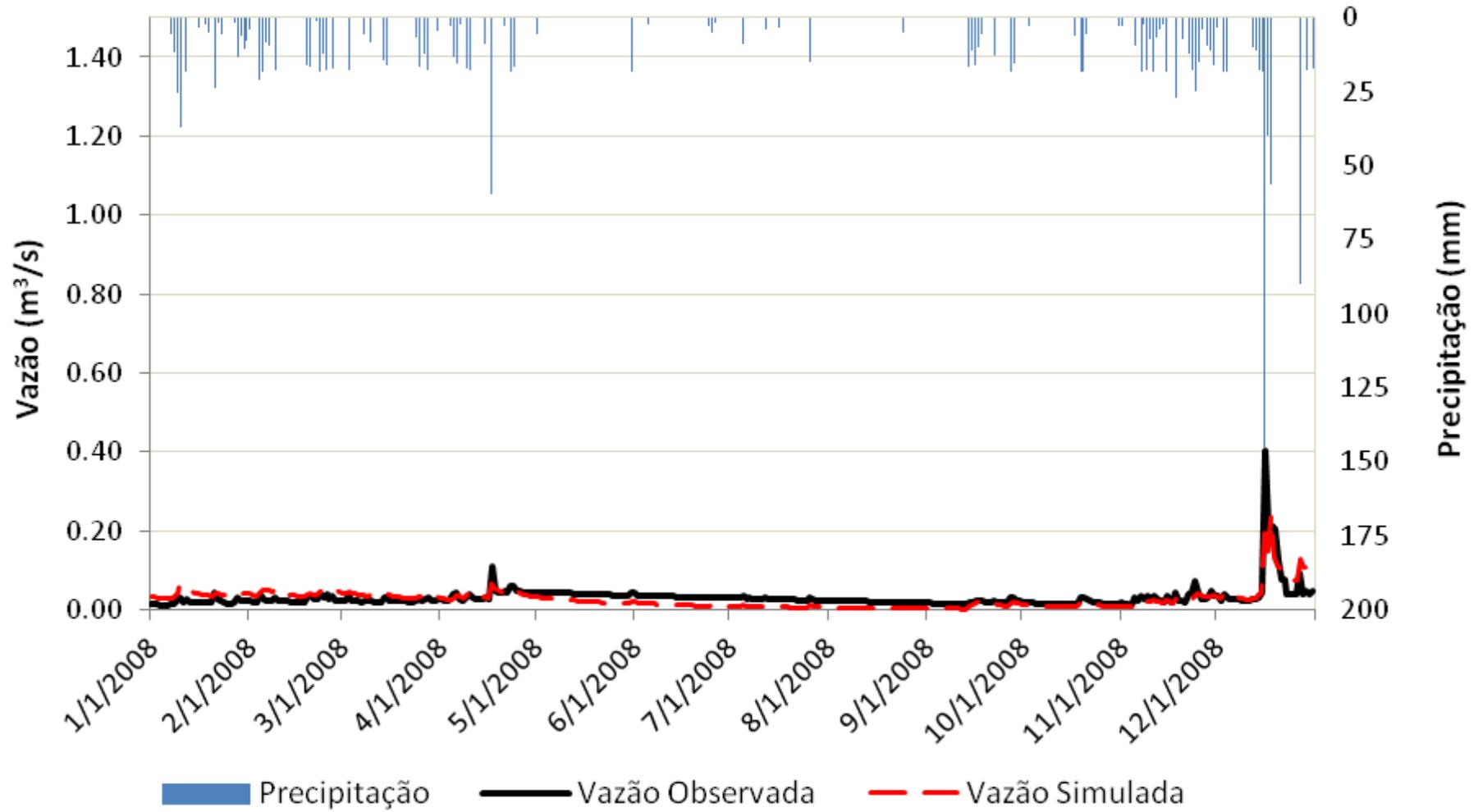
Comparando os hidrogramas, antes e após a calibração, é possível perceber uma inversão com relação às estimativas de picos de vazões. Antes da calibração, os picos nas vazões eram superestimados, enquanto que, após a calibração, o modelo passou a subestimá-las. Esta alteração de comportamento pode ser explicada principalmente pela alteração nos valores do CN2, SOL_AWC e SOL_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo, em detrimento do escoamento superficial.

Para os valores médios de vazão, houve grande melhora nos resultados com a calibração: antes dessa operação, foi estimada uma vazão média de 38,6 m³/s, e, posteriormente, o valor foi de 9,73m³/s, mais próximo ao valor da vazão monitorada de 11,14 m³/s. Pode-se observar que há uma diminuição na superestimação dos valores máximos de vazão, ou seja, uma melhora nos resultados da vazão simulada, e os mínimos que chegavam a zero obtiveram uma melhora mínima, mas que não pode ser notada no gráfico.



NS: -133.8

Figura 32: Gráfico de precipitação e vazão (sem calibração).



NS:0.75

Figura 33: Gráfico de precipitação e vazão após calibração.

Nota-se que, após o ajuste dos dados, o COE atinge valores que indicam um bom ajuste para quase todos os pontos comparados na série de vazão simulada em relação à medida, pois de acordo com Machado (2002) um COE variando entre 0,70 a 0,80 demonstra que a calibração dos dados foi satisfatória. Na Figura 34, é possível verificar maior linearidade entre os valores estimados e observados após a calibração dos parâmetros, por meio do gráfico de dispersão.

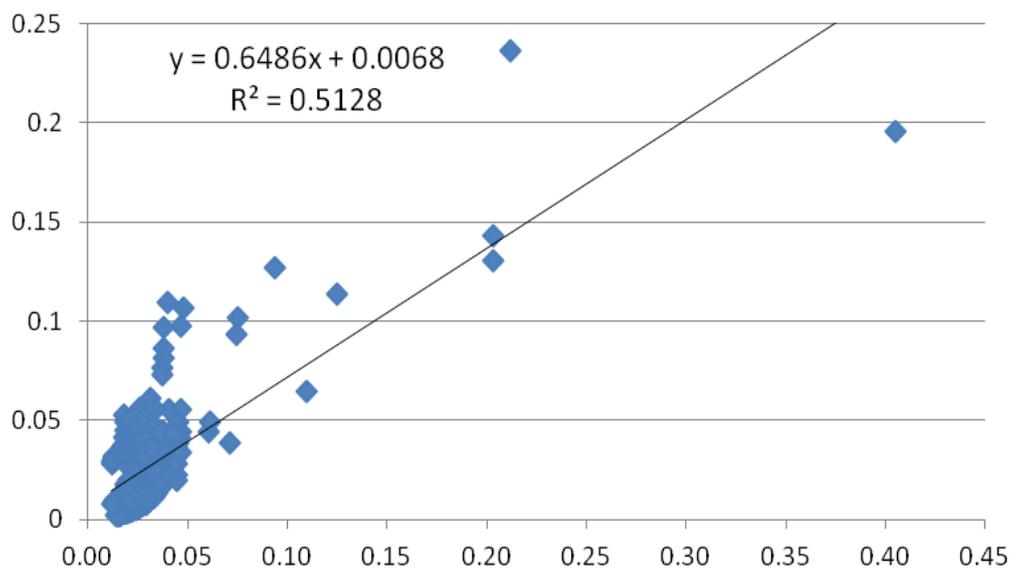


Figura 34: Diagrama de dispersão entre a vazão diária observada e simulada.

5.5 – Validação

A validação do modelo foi realizada com base nos dados hidrológicos referentes aos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2010. Essa etapa do modelo verifica se este tem a capacidade de simular dados de outros períodos ou condições diferentes das quais os parâmetros foram ajustados. Para que esta etapa seja concluída, é necessário incluir os novos parâmetros referentes ao primeiro trimestre de 2010 e, assim, efetuar uma nova simulação no SWAT. Após esta simulação é efetuada a validação do modelo, com base nos parâmetros que já foram ajustados para calibração (Tabela 12).

Tabela 12: Parâmetros e valores adotados para calibração e validação dos parâmetros.

Parâmetros	Ajustado
Esco	0.1
Sol_Awc	0.6
Alpha_Bf	0.1
Cn2	0.9*
Sol_K	0.5*
Canmx	10.0
Slope	0.5*
Gwqmn	3000
Gw_Revap	0.2
Revapmn	350

*Parâmetros multiplicados; demais parâmetros, substituídos.

A resposta desta validação é exibida na Figura 35 e 36, onde nota-se que alguns parâmetros precisam ser ajustados de acordo com a variabilidade temporal dos dados visto que a validação foi efetuada com apenas três meses de dados. Outro fator

importante a ser destacado é a permanência de picos na vazão e a lenta resposta a alguns eventos de precipitação. Porém, os coeficientes de eficiência permaneceram bons e responderam positivamente as alterações nos parâmetros no período de calibração e validação, como mostra a Tabela 13, onde se observa a melhora nos valores dos índices estatísticos obtidos na avaliação da calibração e validação do modelo.

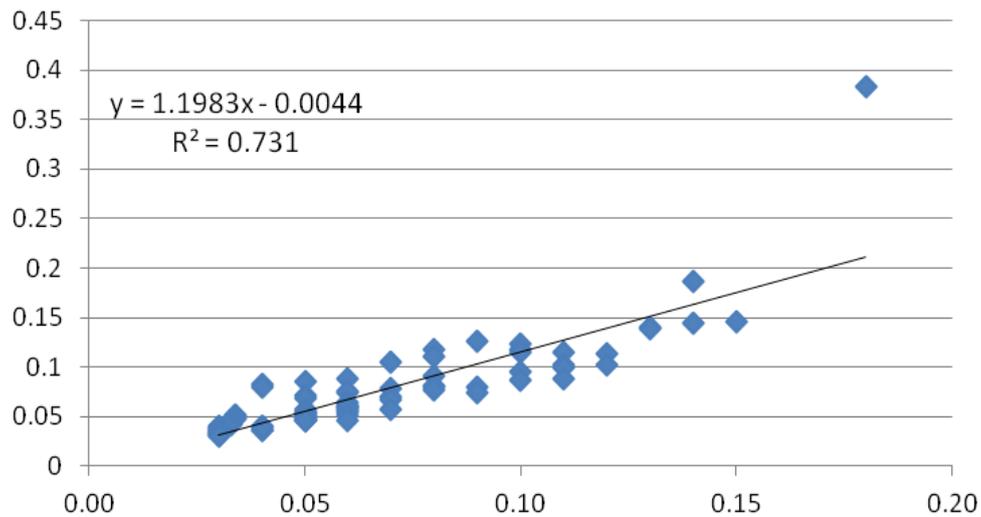
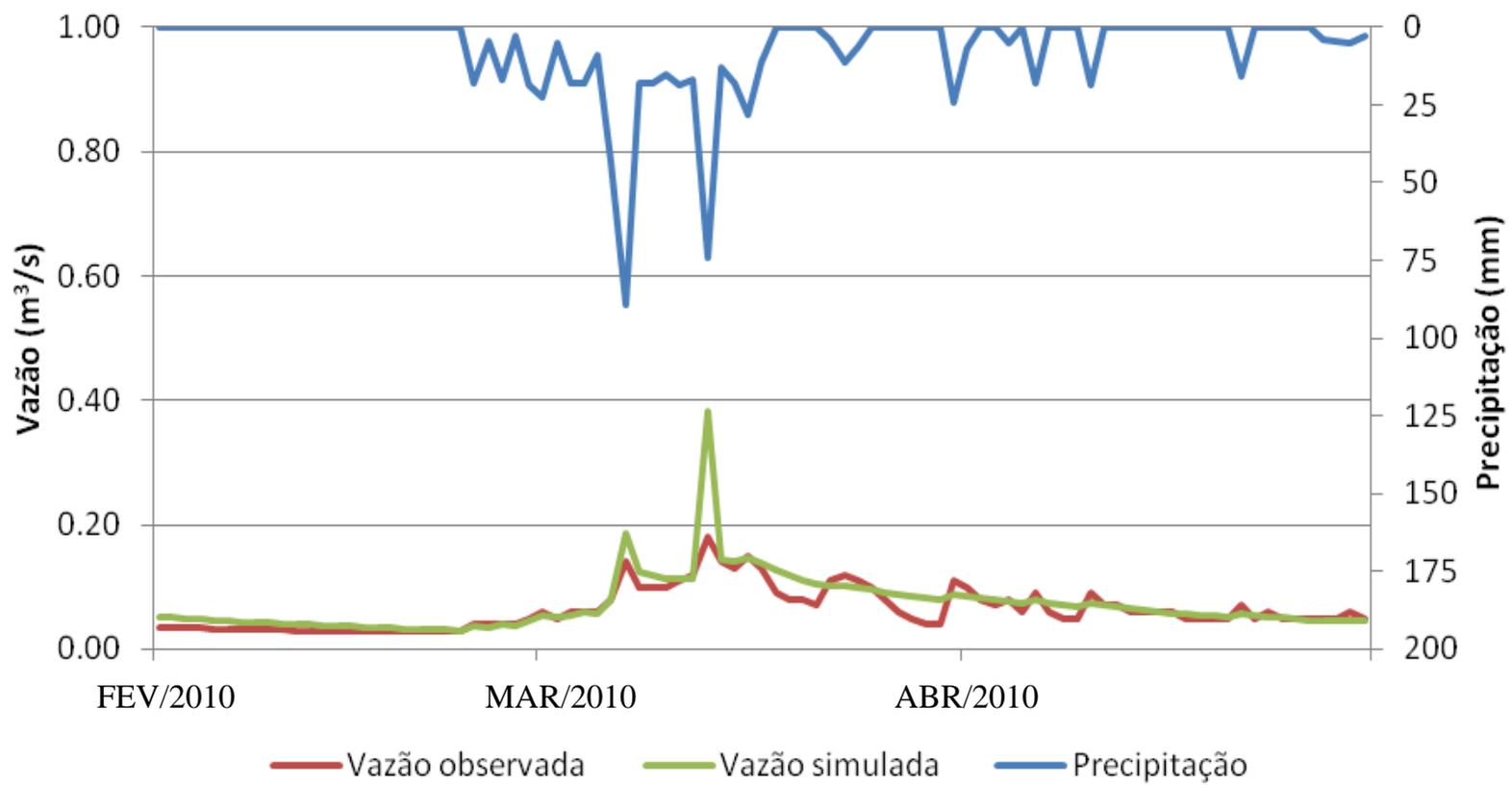


Figura 35: Diagrama de dispersão entre a vazão diária observada e validada.

Tabela 13: Índices estatísticos obtidos na avaliação da calibração e validação do modelo.

	N ²	R ²	PBIAS
Sem calibração	-133.8	0.07	-246.5
Com calibração	0.75	0.51	12.7
Validação	0.56	0.73	-13.02



NS: 0.56

Figura 36: Validação da vazão após a calibração do modelo.

6. CONCLUSÕES

O modelo SWAT, na versão SWAT2009, foi avaliado e apresentou viabilidade de aplicação em condições brasileiras, o que vai ao encontro da literatura preexistente. A grande variedade de informações necessárias para a utilização do modelo, neste caso, pôde ser viabilizada, embora não estivessem prontamente disponíveis. Portanto, a montagem do banco de dados necessário à simulação do modelo torna-se a fase trabalhosa, principalmente quando utilizado pela primeira vez em determinada região.

Assim, o nível de detalhamento exigido pelo modelo para caracterização de bacias hidrográficas muitas vezes vai contra a realidade brasileira de disponibilização de dados, e grande quantidade deles precisam ser modelados; e, além disso, apesar das séries de dados monitorados serem curtas, o modelo obteve uma resposta satisfatória.

As estimativas das vazões por sub-bacias se dão a partir de um componente de escoamento superficial, baseado em uma função de resposta da vazão local no volume de água excedente e um componente subsuperficial que pode ser simulado por um modelo linear de armazenamento, onde as características físicas do solo são de grande importância na estimativa do escoamento subsuperficial e no retorno da água subterrânea ao canal do rio.

A limitação do modelo SWAT para pequenas bacias foi verificada devido à perda de sensibilidade na resposta da bacia, pois o modelo gera dados de saída no intervalo diário, e exige grande número de variáveis para calibração. Foi observado, em consequência disso, que o modelo torna-se sensível aos parâmetros referentes aos solos, fazendo com que, em um primeiro momento, toda a quantidade de água disponibilizada à bacia fosse convertida em escoamento superficial.

Contudo, assim que os parâmetros que condicionavam a infiltração foram calibrados, a vazão simulada aproximou-se da observada significativamente. E, embora não existam estudos que amparem a intervenção com maior segurança nos parâmetros que controlam os fluxos de retorno da zona saturada, o modelo respondeu bem ao valor adotado – consultado em pesquisas aplicadas no Brasil – assim como parâmetros de solos, mesmo com características físicas da área de estudo sendo distintas dos ditos trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. B.; FIDALGO, E. C. C. **Mapeamento do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio São Domingos** *In* WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUÍFEROS - EMBRAPA SOLOS. Rio de Janeiro. 2006. Anais... Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ABU EL NARS, A.; ARNOLD, J. G.; FEYEN, J.; BERLAMONT, J. *Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model*. Hydrological Processes 19, 2005. pp.573 – 587.

ABRAHAM L. Z.; ROEHRIG, J.; CHEKOL, D. A. *Calibration and validation of SWAT Hydrologic model for Meki Watershed, Ethiopia*. Conference on International Agricultural Research for Development. University of Kassel-Witzenhausen and University of Göttingen. Tropentag. 2007.

ADRIOLO, M. V. **Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos** *In* Anais do VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: [http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_\(2008\)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf](http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/artigos_congresso/Andriolo_(2008)_Calibra%C3%A7%C3%A3o_modelo_SWAT_sedimentos.pdf). Acessado em 17 nov. 2013.

ARMAS, E. D. **Biogeodinâmica de herbicidas utilizados em cana-de-açúcar (Saccharum spp.) na sub-bacia do rio Corumbataí**. Tese (Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas) Universidade de São Paulo — Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006. 186 p.

ARNOLD, J. G. *et al.* **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin**. Journal of Hydrology, v. 227, n. 1–4, p. 21-40, 2000.

ARNOLD, J. G. *et al.* **Large area hydrologic modeling and assessment** - Part I, Model development. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. **Integration of a basin-scale water quality model with GIS**. Water Resources Bulletin, 30(3): 1995. pp. 453-462.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN, R.; KING, K. W.; GRIGGS, R. H.. **SWAT - Soil and Water Assessment Tool**. USDA, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 1994.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; NICKS, A. D.; SAMMONS, N. B. **A basin scale simulation model for soil and water resources management**. Texas: A&M Univ. Press, College Station, 1990. 115p.

ASCE. **Criteria for evaluation of watershed models**. J. Irrigation Drainage Eng, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993.

BACCHI, O. O. S., REICHARDT K., SPAROVEK G. **Sediment spatial distribution evaluated by three methods and its relation to some soil properties**. Soil Till Res 69:117–125, 2003.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. Tese (Doutorado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, 2005.

BARRETO, A. B. C.; MONSORES, A. L. M.; LEAL, A. S.; PIMENTEL, J. **Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2000.

BELYAEV, V. R.; WALLBRINK, P. J.; GOLOSOV, V. N. *et al.* ***A comparison of methods for evaluating soil redistribution*** in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia. *Geomorphology*, 65(3): 173-193, 2005.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A. ***Physically-Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology***. *Hydrol. Sci. Bull.*, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BHERING, S. B.; PEREIRA, N. P.; MACEDO, J. R.; CHAGAS, C. S.; SILVA, E. F. da; PRADO, R. B.; NETO, N. C. S. **Caracterização edafoambiental das microbacias de Cambiocó e Santa Maria no município de São José do Ubá, região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro para fins de planejamento conservacionista** *In* CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Anais: solos, sustentabilidade e qualidade ambiental. Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

BOARDMAN, J.; POESEN, J. ***Soil erosion in Europe: major processes, causes and consequences*** *In* BOARDMAN, J.; POESEN, J. (Eds.) *Soil Erosion in Europe*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BROOKS, K. N.; FOLLIOTT, P. F.; GREGERSEN, H. M.; THAMES, J. L. ***Hydrology and the management of watersheds***. Ames: Iowa State University Press, 1991. 392p.

BURROUGH, P. A. ***Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment***. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12. New York: Oxford Science Publications, 1986.

CALDERANO FILHO, B.; CHAGAS, C. S.; PRADO, R. B., PEREZ, D. V.; GONÇALVES, A. O.; SOUZA, J. S. **Levantamento semidetalhado dos solos da microbacia do Barro Branco**, no município de São José de Úba, região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. Boletim de Pesquisa, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. 2006.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Orgs.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>>.

CAMARGO, F. F. **Análise orientada ao objeto aplicada a mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra**. São José dos Campos: Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, 2008.

CAMPBELL, D. H; TURK, J. T.; SPAHR, N. E. *Planning document of Water, Energy, and Biogeochemical-Budget* (WEBB) Research Project, Loch Vale Watershed, Rocky Mountain National Park, Colorado: U.S. Geological Survey Open-File Report 92-628. 1992.

CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. Singapore: McGraw-Hill - Civil Engineering Series, 1959.

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

CIBIN, R.; SUDHEER, K. P.; CHAUBEY, I. *Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model*. Hydrological Processes 24: 1133-1148, 2010. DOI: 10.1002/hyp.7568.

COELHO NETTO, A. L. **Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia** In GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. cap. 3, p. 93-148.

CRUZ, C. B.; VICENS, R. S.; SEABRA, V. S.; REIS, R. B.; FABER, O. A.; RICHTER, M.; ARNAUT, P. K.; ARAÚJO, M. **Classificação orientada a objetos no mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, na escala 1:250.000**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis: INPE, 2007.

DANTAS, M. E. **Mapa de favorabilidade hidrogeológica do Rio de Janeiro**. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: CPRM; Niteroi: DRM-RJ, 2001.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A. I. M.; SILVA, C. R.; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J. F.; CALDERANO, S. B.; CARVALHO FILHO, A. de. **Diagnóstico geoambiental do Estado do Rio de Janeiro** In CPRM - Serviço Geológico do Brasil: Projeto Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CPRM, 2001. CD-ROM. Cap. 11. Escala 1:500.000.

DANTAS, M. E. **Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro**. Escala 1:500.000. Rio de Janeiro: CPRM; Niterói: DRM-RJ. 2000. 60 p.

DEFINIENS. *Definiens Developer 7: Reference Book*. Munich: Definiens (The Imaging Intelligence Company), 2007. 197 p.

DUMANSKI, J.; HUFFMAN, E. *A study of relationships between soil survey data and agricultural land use using information theory*. Can J Soil Sci 67: 1981. pp. 95-102.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water in environmental planning*. New York: W. H. Freeman and Company, 1978.

ECKHARDT, K.; FOHRER, N; FREDE, H. G. *Automatic model calibration*. Hydrol. Proc. 19(3): 2005. pp. 651-658.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa Solos: Rio de Janeiro, 2006. 2.ed.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. **Mapa de Declividade**. In WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUÍFEROS. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

FETTER, C. W. *Applied hydrogeology*. New York: Micmillan Publishing, 1988.

FOHRER, K.; ECKHARDT, K.; HAVERKAMP, S.; FREDE, H. G. *Applying the SWAT model as a decision support tool for land use concepts in peripheral regions in Germany*. 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University and USDA-ARS National soil Erosion Research Laboratory. p. 24-29, 1999.

FOSTER, G. R. *User requirements - USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. Draft 6.2. (NSERL Report, 1). West Lafayette, 1987. 46 p.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal so Espírito Santo, Jerônimo Monteiro. 2012. 98 f.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York: John Wiley and Sons, 2000. 479 p.

GASSMAN, W. P.; REYES, M. R.; GREEN, C .H.; ARNOLD, J. G. *SWAT peer – reviewed literature: A review*. Zurich: Proceedings of the 3rd International SWAT Conference, 2005.

GEPARMBH. **Relatório 1 do Projeto Gestão Participativa da Bacia do Rio São Domingos** In Edital CT-HIDRO/FINEP-MCT 02/2002, 2003.

GONÇALVES, A. O.; FIDALGO, E. C. C.; BASTOS, C. L. **Caracterização climática do município de São José de Ubá, Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 95, 2006. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/publicacao.html>.

GOVENDE, M.; EVERSON, C. S. *Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model*. Hydrol. Process. 19: 2005. pp. 683-692.

GREEN, C.H.; VAN GRIENSVEN, A. *Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds*. Environmental Modelling & Software. 23, Issue 4, 2008. 422-434.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995, 472p.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. (eds.) *Models in geography*. London: Methuen, 1967.

HEILBRON, M.; DUARTE, B. P.; NOGUEIRA, J. R.; ALMEIDA, J. C. H.; TUPINAMBÁ, M.; GERALDES, M. C.; GUIA, C.; MIRANDA, A. W. A.; FILHO, R. S. S.; MEDEIROS, F. F. F.; MANSUR, K. **Geologia da bacia do rio São Domingos, São José de Ubá, Rio de Janeiro** In SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, Rio de Janeiro: DRM-RJ, 2005.

HEWLETT, J. D. *Principles of Forest Hydrology*. 2. ed. Georgia: The University of Georgia Press, 1982.

HORNBERGER, G. M. *et al. Elements of physical hydrology*. Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1988.

IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 2^a ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

INSTITUTO GEOLÓGICO E MINEIRO. **Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro**. 2001. Disponível em: http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm. Acessado em: outubro de 2013.

JAMES, L. D. E; BURGESS, S. J. *Selection, calibration and testing of Hydrologic Models* In HAAN *et al* (Eds.). Michigan: Hydrologic Modeling of Small Watersheds, 1982.

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

KNISEL, W. G. *CREAMS. A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. Washington: USDA Conservation, 1980. 89p.

KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. J. **Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas** *In* Curso de Extensão: O Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Eng. Florestal - UFPR, 1999. p. 111-118.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

LEGATES, D. R.; MCCABE J. R. *Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. *Water Resour. Res.*, 35, 1, 233–241, 1999.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Edusp, 2005. 335p.

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1986. 242p.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.

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

LUMBRERAS, J. F. **Relações solo-paisagem no noroeste do estado do Rio de Janeiro: subsídios ao planejamento de uso sustentável em áreas de relevo**

acidentado do bioma Mata Atlântica. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008. 305 f.

LUMBRERAS, J. F.; NAIME, U. J.; CARVALHO FILHO, A. **Zoneamento agroecológico do Estado do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. Escala 1:250.000.

LUMBRERAS, J. F.; CARVALHO FILHO, A.; NAIME, U. J.; AMARAL F. C. S.; WITTERN, K. P.; SHINZATO, E.; DANTAS, M. E.; PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; OLIVEIRA, R. P.; AGLIO, M. L. D.; CHAFFIN, C. E. **Mapa do zoneamento agroecológico do Estado do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003b. Escala 1:250.000. Disponível em: <<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/sigweb.html>> Acesso em: 5 jun. 2013.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo/SP, 2002.

MANNING, J. C. *Applied Principles of Hydrology.* New York: Macmillan Publishing Company, 1992.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrosedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no Noroeste Fluminense.** Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/RJ, 2008.

MINOTI, R. T. **Abordagens qualitativa e quantitativa de microbacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior-SP.** São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006. 231p. (Tese de Doutorado)

MONTGOMERY, D. R. *Soil erosion and agricultural sustainability*. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 104, p. 13, 268-13, 272, 2007.

MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion e Conservation*. Longman, 1995.

MORIASI, D. N.; STARKS, P. J. *Effects of the resolution of soil dataset on SWAT2005 streamflow calibration parameters and simulation accuracy*. Research Section, 2005 Soil And Water Assessment Tool - Report. Journal of Soil and Water Conservation, v. 65, n. 2, p. 63(16), 2010.

MORIASI, D. N. *et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transaction of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. *River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles*. J. Hydrol. 10, 282-290, 1970.

NEITSCH, S. L, ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B. *Soil and Water Assessment Tool: input/output file documentation* version 2009. Texas: Texas A&M University, v. 365, p. 662, 2011.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD J. G.; KINIRY J. R.; SRINIVASAN R, J.; WILLIAMS, R.. *Soil and Water Assessment Tool input/output documentation version 2009*. 2009. Disponível em <http://swatmodel.tamu.edu/documentation>.

NEITSCH, S. L. *et al. Soil and water assessment tool: theoretical documentation* - version 2005. Texas - USA: SERVICE., G.-S.A.W.R.L.-A.R., v. p. 525p., 2005.

NEVES, F. F. **Análise prospectiva das áreas de risco à erosão na microbacia hidrográfica do Rio Bonito (SP), potencialmente poluidoras por dejetos de granjas.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. 153p.

NRCS - Natural Resources Conservation Service. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Washington: Technical Release No. 55. USDA. D.C, 1986.

OLIVEIRA, M. Q. C. **Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes e sua repercussão na zona costeira.** Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia/Ba. 1999.

ORTEGA, A. G.; FIDALGO, E. C. C.; BASTOS, C. L.; ABREU, M. B. **Caracterização climática da Bacia do Rio São Domingos.** In: WORKSHOP DE INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES OBTIDAS NO ÂMBITO DO PROJETO PRODETAB AQUIFEROS. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

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

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG.** Lavras: UFLA, 2011. 225p. Tese Doutorado.

PRADO, T. G. B. **Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiaí-Mirim.** Dissertação de Mestrado. Instituto Agronômico, Universidade de Campinas, Campinas, 2005.

PRODETAB Aquíferos. Projeto Embrapa Solos: DRAIBE, S. M (Org.). Rio de Janeiro: 2003.

RAWLS, W. J.; FOSTER, G. R. *USDA – Water Erosion Prediction Project.* 1987. pp. 702-707.

REICHARDT, K. **Água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987.

ROSENTHAL, W. D.; SRINIVASAN, R., ARNOLD, J. G. *Alternative river management using a linked GIS-hydrology model.* Transactions of the ASAE, 38(3): 783–790, 1995.

SALLES, L. A. **Calibração e Validação do Modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do Ribeirão Pibiripau.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Florestal da UnB, 2012.

SAMMONS, N.; NEITSCH, S. L. **Until interface for SWAT2000: user guide.** Washington: GUAR, 2000. 14 p.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica.** Tese de Doutorado. Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SARTORI, A. L. N.; GENOVEZ, A. M. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa de chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**, parte 1: classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SELBY, M. J. *Hillslope materials and processes*. 2ª edição. Oxford: Oxford University Press, 1993.

SILVA, A. M.; SCHULTZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 140p.

SILVA, T.M. **A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geografia) - Depto. Geografia/IGEO-UFRJ, 2002. 265 p.

SILVEIRA, M. P. **Aplicação do biomonitoramento para avaliação da qualidade da água em rios**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 68p.

SINGH, V. P. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Colorado: Water Resources Publications, 1995.

SOUZA, R. M. **Estimativa de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região Sul – Brasileira, com aplicação do Modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, (2011). 124p. Disponível em “http://www.lhg.ufpr.br/arquivos/dissertacao/Dissertacao_Rodrigo_2011.pdf”

SOUZA, M. J. M.; WHITE, R. E.; MALCOLM, B. *Applying AVS2000 to predict runoff and phosphorus movement from an agricultural catchment to support the*

modeling of chlorophyll. 2nd International SWAT Conference. TWRI Technical Report 266. Baria/Italy. 2003.

SRINIVASAN, R., *et al.* *Large area hydrologic modeling and assessment* - part II: Model application. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, p. 91-101, 1998.

SRINIVASAN, R. *et al.* *Simulation of hydrology and erosion in a Texas watershed using SWAT* In JOHNSON, A. I.; FERNANDEZ, A. (Eds.) Hydrology in the humid tropic environment. Proceedings of the international symposium. [Louvain], International Association of Hydrological Sciences, 1998, p.175-183.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. *Integration of the basin-scale water quality model with GIS*. Water Resources Bulletin, v. 30, n. 03, p. 453-462, 1994.

STROOSNIJDER, L. *Measurement of erosion: Is it possible?* Catena 64, 2-3 - ISSN 0341-8162 - p. 162-173, 2005.

SWAT - Soil and Water Assessment Tool. *User's manual*. Version 2009. NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R., WILLIAMS DRAFT, J. R. April, 2001. Disponível em: <http://swatmodel.tamu.edu/>. Acesso em fevereiro/2013.

THAMPI, S. G.; RANEESH, K. Y.; SURYA, T. V. *Influence of scale on swat model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics*. Water Resour Manage v. 24, p. 4567 – 4578, 2010.

TEDESCHI, L. O. *Assessment of the adequacy of mathematical models*. Agricultural Systems, v. 89, n. 2–3, p. 225-247, 2006.

THORNTHWAITE, C. W.; MATER, J. R. **The water balance**. Publ. Climatol. Dresel Inst. Technol (8), 1-104. 1955.

TIM, U. S.; JOLLY, R. *Evaluating Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrad Geographhic Information Systems and Hidrology/Water Quality Model*. Journal in Environmental Quality, v. 23, p. 25-35, 1994.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. **Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões – MG**. Revista Árvore, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 859-857, set./out. 2006.

TÔSTO, S. G.; BRANDÃO, E. S.; COSTA, J. R.; COPPEDE, N. U. **Características socioeconômicas da região noroeste fluminense com ênfase no Município de São José de Ubá**. Documentos/Embrapa solos, 66: 2004. 60 p.

TRIMBLE, S.W.; MENDEL, A. C. *The cow as a geomorphic agent—a critical review*. *Geomorphology*, 13 (1995), pp. 233–253.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia - ciência e aplicação**. 3^a ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade ABRH, 1997. 943 p.

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

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. Tese (Doutorado em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ RS. 2009.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. *Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT model*. Journal of the American Water Resources Association, v. 41, n. 5, p. 1077-1089, 2005.

WISCHMEIR, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning* (Agriculture Handbook 537). Washington: USDA, 1978. 58 p.

WILLIAMS, J. R., *et al.* *A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity*. Transaction of the ASAE, v. 27, n. 1, p. 129-144, 1984.

WILLIAMS, J. R. A.; NICKS, A. D.; ARNOLD, J. G. *Simulator for water resources in rural basins*. Journal of Hydraulic Engineering, v. 111, n. 6, p. 970-976, 1985.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons. 2000. 479p.

ZARONI, M. J. **Estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas por meio do modelo de erosão USLE e do índice de transferência de sedimentos – SDR**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.