

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

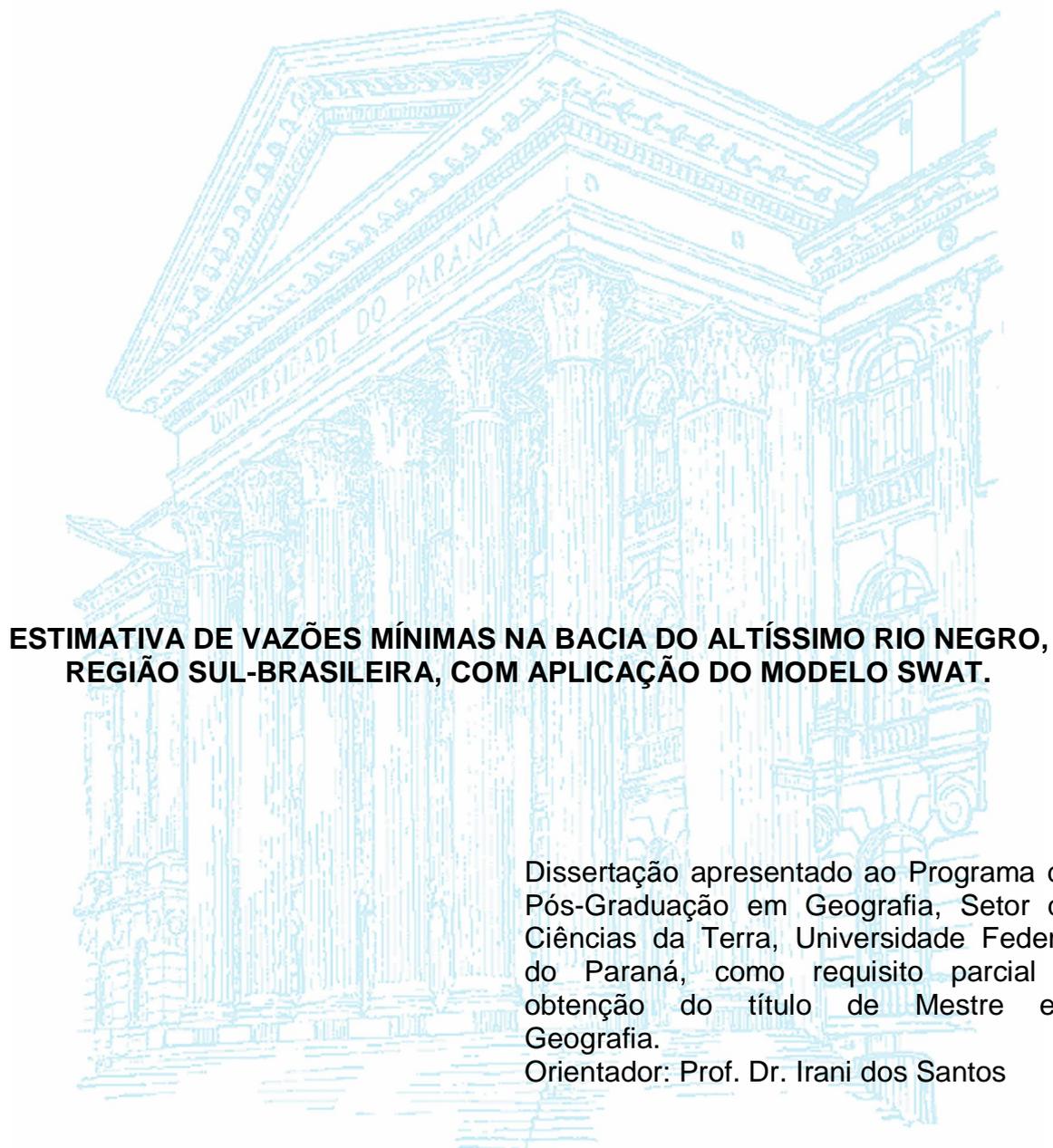
RODRIGO MARCOS DE SOUZA

**ESTIMATIVA DE VAZÕES MÍNIMAS NA BACIA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO,
REGIÃO SUL-BRASILEIRA, COM APLICAÇÃO DO MODELO SWAT.**

Dissertação de Mestrado

CURITIBA
2011

RODRIGO MARCOS DE SOUZA



**ESTIMATIVA DE VAZÕES MÍNIMAS NA BACIA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO,
REGIÃO SUL-BRASILEIRA, COM APLICAÇÃO DO MODELO SWAT.**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Irani dos Santos

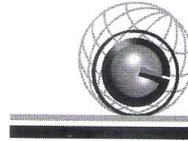
**CURITIBA
2011**

Souza, Rodrigo Marcos de
Estimativa de vazões mínimas na Bacia do Altíssimo Rio Negro,
Região Sul-Brasileira, com aplicação do modelo SWAT / Rodrigo
Marcos de Souza. – Curitiba, 2011.
122 f. : il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.
Orientador: Irani dos Santos

1. Bacias hidrográficas - Vazante. I. Santos, Irani dos. II. Título.

CDD 551.483



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **Rodrigo Marcos de Souza**, intitulada: "**Estimativa de vazões mínimas na bacia do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do Modelo SWAT**" para obtenção do grau de **Mestre** em Geografia, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa **Paisagem e Análise Ambiental**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação.

Curitiba, 03 de março de 2011.

Nome e assinatura da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Irani dos Santos (Orientador)

Prof. Dr. Heinz Dieter Fill - UFPR

Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos – UFPR

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela oportunidade de estar realizando este trabalho.

A Gisele, pela companhia nos bons e maus momentos neste período, sempre com palavras de incentivo.

Ao Professor Dr. Irani dos Santos, pela orientação, dicas e conselhos para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Masato Kobiyama, pelo auxílio nos projetos de pesquisa.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Hidrogeomorfologia da Universidade Federal do Paraná (LHG/UFPR).

Aos amigos Adinan S. Assunção, Alex F Garcia, Cristiano A. da Silva, Diego Medroni, Fabiano S. Martins, Fernando Jacinto, Fernando Schmiguel, Gustavo H. Bordim, Jéferson Tramontin, João M. A. Moreira, Julia M. C. Krupeizaki, Patrícia Baliski, Paulo R. Rodachinski, Ronaldo Pescador, pela companhia e muitas alegrias nestes anos de convívio.

Ao eterno e saudoso amigo Luiz Alberto de Oliveira Negraes, pelos diversos momentos alegres.

A Fabio Sagara, pelo auxílio ofertado.

A CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior), pela oferta da bolsa.

Ao Instituto Tecnológico SIMEPAR, pela disponibilização de dados para a realização deste trabalho.

À FINEP (Financiadora de estudos e projetos), CT-HIDRO (Fundo Setorial de Recursos Hídricos) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento de projetos de pesquisa que forneceram subsídios a esta pesquisa.

RESUMO

A vazão mínima pode ser definida como o fluxo de água de um rio presente em épocas mais secas. O seu regime de escoamento é resultado de processos complexos que ocorrem na escala da bacia hidrográfica. A sua estimativa, portanto, é uma tarefa difícil e geralmente apresenta erros significativos. A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para estimar vazões em bacias não medidas ou para melhorar informações já existentes em bacias medidas. Os objetivos deste trabalho são avaliar a estimativa de vazões mínimas e a regionalização de vazões na bacia do Altíssimo Rio Negro, com a aplicação do modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*). A bacia possui uma área de drenagem de 788 km², está localizada ao norte do estado de Santa Catarina e ao sul do estado do Paraná, entre as latitudes 25°55'73"S e 26°14'17"S; e entre as longitudes 48°56'34"W e 49°23'12"W. A região é caracterizada pela Floresta Ombrófila Mista, reflorestamento de pinus, e agricultura e pecuária em pequenas propriedades rurais. O SWAT é um modelo matemático de domínio público desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* e incorpora grande parte dos avanços obtidos em modelos anteriores. As simulações foram realizadas em intervalos de tempo diário, no período de 01/01/1984 a 30/11/2010. Para avaliar a regionalização hidrológica efetuada pelo modelo, foram realizadas duas campanhas de medição a campo em dez sub-bacias com área de drenagem inferior a 50 km². Os resultados indicam que o modelo, no que concerne à simulação de vazões mínimas, considera os elementos que afetam diretamente o regime hidrológico destas vazões. Também verificou-se que o SWAT reproduz adequadamente as vazões para a bacia como um todo, porém, apresenta limitações para reproduzir a variabilidade espacial das vazões nas sub-bacias.

Palavras-chave: Vazões mínimas, regionalização de vazões, modelo SWAT.

ABSTRACT

Low flows can be defined as the river's water flow present in drought. Its flow regime is the result of complex processes that occur in the watershed scale. Its estimate is, therefore, a difficult task and usually presents significant errors. Hydrologic regionalization is a technique used to estimate streamflow in ungauged catchments or to improve existing information on gauged catchments. The goals of this study are the evaluate of low flows and the regionalization of streamflows in the Upper Negro River Watershed, with application of the SWAT model (Soil & Water Assessment Tool). This watershed has 788 km² of drainage area and is located north of the Santa Catarina state and south of the Paraná state, between latitudes 25 ° 55'73"S and 26 ° 14'17 "S and between longitudes 48 ° 56 ' 34 "W and 49 ° 23'12" W. The region is characterized by the Subtropical Rain Forest, pine reforestation, agriculture and livestock on small farms. SWAT is a mathematical model in the public domain, developed in 1996 in the USA by Agricultural Research Service and by the Texas A&M University and incorporates large part of the advances obtained in previous models. The simulations were performed at daily intervals during the period of 01/01/1984 to 30/11/2010. To evaluate the hydrologic regionalization by the model, two field measurement campaigns were held in ten sub-basins with less than 50 km² of drainage area. The results indicate that the model, regarding the simulation of low flows, consider the elements that directly affect the hydrological regime of these flows. Also it was found that the SWAT reproduces accurately the flow for the basin as a whole, however, has limitations to reproduce the spatial variability of streamflow in sub-basins.

Key-words: Low flows, Hydrologic regionalization, SWAT Model

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Relação entre monitoramento, modelagem e entendimento do sistema...	13
Figura 2 – Bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro	14
Figura 3 – Etapas do método de regionalização Écogeográfico	33
Figura 4 – Fluxograma do modelo SWAT	48
Figura 5 – Divisão da bacia, canais principais e pontos medidos	67
Figura 6 – Geologia da bacia do Altíssimo Rio Negro	70
Figura 7 – Declividade da bacia do Altíssimo Rio Negro.....	71
Figura 8 – Modelo digital de terreno da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro ..	72
Figura 9 – Solos da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.....	74
Figura 10 – Uso do solo da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.....	78
Figura 11 – Localização das estações pluviométricas utilizadas.....	80
Figura 12 – Curva duplo-acumulativa da estação de Fragosos (02649018)	81
Figura 13 – Curva duplo-acumulativa da estação Rio da Várzea (02549003)	82
Figura 14 – Curva duplo-acumulativa da estação Campo Alegre (02649057)	82
Figura 15 – Curva duplo-acumulativa da estação Vossoroca (02549008)	83
Figura 16 – Equipe do LHG realizando medições em leito irregular	84
Figura 17 – Equipe do LHG realizando medições em rio com controle.....	84
Figura 18 – Hidrograma do período de calibração 01/01/1994 a 31/12/2002.....	88
Figura 19 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/1984 a 31/12/1992	91
Figura 20 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/1993 a 31/12/2001	92
Figura 21 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/2002 a 31/11/2010	93
Figura 22 – Curvas de permanência das vazões observadas e simuladas.....	94
Figura 23 – Dispersão entre vazões observadas e simuladas	95
Figura 24 – Vazão q95 simulada em cada sub-bacia.....	96
Figura 25 – Variabilidade da vazão q95 conforme a área de drenagem	98
Figura 26 – Volume média anual de precipitação das estações pluviométricas.....	99
Figura 27 – Modelo de regressão entre proporção de pastagens e q95 simuladas	101
Figura 28 – Modelo de regressão com diversos elementos	102
Figura 29 – Análise de resíduos da regressão com diversos elementos	102
Figura 30 – Modelo de regressão com usos do solo.....	103

Figura 31 – Análise de resíduos do modelo de regressão com usos do solo.....	104
Figura 32 – Modelo de regressão com tipos de solo.....	105
Figura 33 – Análise de resíduos do modelo de regressão com solos	105
Figura 34 – Localização das sub-bacias medidas.....	107
Figura 35 – Comparativo entre vazões medidas e simuladas no dia 08/07/2010 ...	108
Figura 36 – Comparativo entre vazões medidas e simuladas no dia 31/08/2010 ...	109
Figura 37 – Vazões medidas e simuladas no dia 08/07/2010	110
Figura 38 – Vazões medidas e simuladas no dia 31/08/2010	110
Figura 39 – Modelo de regressão das medições de 08/07/2010, com área de drenagem e precipitação média	111
Figura 40 – Resíduos da regressão com área de drenagem e precipitação média para medições de 08/07/2010	111
Figura 41 – Modelo de regressão das medições de 31/08/2010, com área de drenagem e precipitação média	112
Figura 42 – Resíduos da regressão com área de drenagem e precipitação média para medições de 31/08/2010	112
Figura 43 – Modelo de regressão com diversos elementos – medições de 08/07/2010	113
Figura 44 – Modelo de regressão com diversos elementos – medições de 31/08/2010	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de Q_{mp} , Q50, Q95 e $Q_{7,10}$ regionalizadas	27
Tabela 2 – Resultados da regionalização pelo método tradicional e de Chaves <i>et al.</i> (2002)	30
Tabela 3 – Parâmetros calibráveis no modelo SWAT	62
Tabela 4 – Área de contribuição de cada sub-bacia	67
Tabela 5 – Informações do banco de dados de solos	75
Tabela 6 – Valores para classificação do solo em grupos hidrológicos	75
Tabela 7 – Grupo hidrológico dos solos da bacia do Altíssimo Rio Negro	77
Tabela 8 – Ocorrência de tipos e usos do solo antes e depois da discretização dos HRUs.....	78
Tabela 9 – Parâmetros calibrados automaticamente	88
Tabela 10 – Descrição e valores dos parâmetros utilizados	89
Tabela 11 – Comparativo entre vazões observadas e simuladas	90
Tabela 12 – Vazões q95 simuladas e características das sub-bacias definidas pelo modelo SWAT	97
Tabela 13 – Matriz de correlação entre q95 simulada e elementos da bacia.....	100
Tabela 14 – Vazões medidas e vazões simuladas.....	107

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVO GERAL.....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 VAZÕES MÍNIMAS.....	16
2.1.1 Natureza e características das vazões mínimas	17
2.1.2 Aumento ou diminuição no volume de vazões mínimas.....	19
2.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	20
2.2.1 Regionalização de variáveis, funções e parâmetros	23
2.2.2 Metodologias de regionalizações de vazões	25
2.2.2.1 Método de regionalização de vazões por regressão	26
2.2.2.2 Regionalização de vazões por interpolação em um ambiente SIG	27
2.2.2.3 Regionalização através de características fisiográficas	31
2.2.2.4 Regionalização de vazões mínimas	34
2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO	38
2.3.1 Modelos Hidrológicos	41
2.3.1.1 Classificação e tipologia dos modelos hidrológicos.....	43
2.3.2 Modelo SWAT	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO SWAT.....	48
3.1.1 Escoamento Superficial.....	49
3.1.2 Taxa de Escoamento de Pico.....	50
3.1.3 Tempo de Concentração.....	51
3.1.4 Retardo do Escoamento Superficial	53
3.1.5 Escoamento Lateral.....	53
3.1.6 Armazenamento no Dossel	54
3.1.7 Evapotranspiração Potencial.....	55
3.1.8 Água No Solo	55
3.1.8.1 Percolação.....	56
3.1.8.2 Água Subterrânea	57
3.1.8.3 Recarga do Aquífero	58

3.1.8.4	Escoamento de Base	58
3.1.8.5	Capilaridade	59
3.1.8.6	Percolação para o Aquífero Profundo	59
3.1.9	Propagação no reservatório	60
3.1.10	Propagação no canal.....	61
3.2	PARÂMETROS CALIBRÁVEIS NO MODELO SWAT	62
3.3	DIVISÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO	65
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	69
3.5	DADOS ESPACIAIS.....	72
3.6	DADOS HIDROLÓGICOS.....	79
3.7	MEDIÇÕES	83
3.8	CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	85
4	RESULTADOS	87
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT	87
4.2	RESULTADOS ESPACIAIS E ESTATÍSTICOS	95
4.3	ANÁLISE DAS MEDIÇÕES.....	106
5	CONCLUSÕES	115
	REFERÊNCIAS	117

1. INTRODUÇÃO

A problemática da degradação ambiental tornou-se um assunto freqüente desde o século passado. A forma de relação predatória com a qual o homem utilizou e continua utilizando os recursos naturais resultou em impactos negativos sobre a natureza.

Neste contexto, Santos (2001) cita que as distribuições espaciais e temporais dos recursos hídricos e a conseqüente mudança no regime de produção e transporte de sedimentos de uma bacia hidrográfica vêm se tornando mais heterogênea devido à ação antrópica intensa e sem um planejamento adequado, prejudicando assim os sistemas naturais e a própria sociedade.

Este problema acabou por exigir da sociedade diversos esforços para mitigar os impactos antrópicos. Segundo Machado (2002), uma investigação em um sistema real, como a bacia hidrográfica, envolvendo medições de todas as variáveis que influenciam a sua dinâmica é uma tarefa árdua, sendo até mesmo impossível em determinadas ocasiões, pois o longo prazo exigido e os custos de medições e monitoramento são grandes empecilhos para tal tarefa. Devido a este fato, modelos estão sendo cada vez mais utilizados para estudos de bacias hidrográficas.

As vazões mínimas são utilizadas como referencial para a concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos, sendo alvo de preocupações de diversos órgãos governamentais e de pesquisadores sobre a disponibilidade hídrica. A estimativa da disponibilidade hídrica requer informações de monitoramento nem sempre disponíveis nas escalas de espaço e tempo adequadas.

Assim, geralmente as informações de disponibilidade hídrica são obtidas nos locais de interesse, utilizando-se técnicas de regionalização hidrológica. Para Tucci (2002) a regionalização é a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. A informação pode ser na forma de variável, função ou parâmetro, sendo que o modelo escolhido para este trabalho realiza a regionalização por parâmetro.

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo matemático de domínio público desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* e incorpora grande parte dos avanços obtidos em modelos anteriores. O modelo tem por objetivo prever o efeito das ações de uso

e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. É distribuído, ou seja, tem as suas variáveis e parâmetros dependendo do espaço e do tempo. A principal qualidade deste tipo de modelo, conforme Tucci (1998) é a capacidade em representar melhor a variação espacial do sistema sendo que o SWAT realiza a simulação de vazões considerando, além das séries temporais, diversos fatores espaciais, como relevo, hidrografia, uso do solo, tipo do solo.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar a estimativa de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região Sul Brasileira, através da aplicação do modelo SWAT.

Para cumprir o objetivo proposto, este trabalho foi estruturado da seguinte forma: o capítulo dois traz a revisão bibliográfica da pesquisa, com discussões sobre conceitos e os mecanismos de geração de vazões mínimas, regionalização de vazões e modelos de simulação e hidrológicos.

Na seqüência do estudo, o capítulo três refere-se aos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa. São apresentadas as características da área de estudo, o equacionamento do modelo SWAT, os dados necessários para a modelagem e informações das campanhas de medição realizadas em campo.

Os resultados da pesquisa são discutidos no capítulo quatro e as conclusões oriundas do trabalho são mostradas no capítulo cinco.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em virtude da demanda crescente e do uso irracional de recursos hídricos, chegando ao ponto de comprometer totalmente determinadas fontes de abastecimento, as questões sobre disponibilidade hídrica estão no âmago das preocupações de pesquisadores, governantes e usuários de recursos hídricos.

Uma discussão sobre disponibilidade hídrica obrigatoriamente passa a envolver questões sobre volumes de vazão. Desta forma, destaca-se o estudo e entendimento das vazões mínimas.

Para Silveira e Silveira (2001) o conhecimento das vazões mínimas de uma bacia é elemento básico em estudos de disponibilidade hídrica e preservação ambiental por estarem vinculados a períodos críticos de oferta de água e apesar de

sua natureza ser conhecida, seu estudo é dificultado pela complexidade dos processos hidrológicos e da bacia hidrográfica.

A importância do estudo das vazões mínimas justifica-se pelo fato de que tais vazões são utilizadas como referências para a concessão de outorga de uso e direito dos recursos hídricos. A outorga é um instrumento legal que dá direito ao uso de certa quantidade de água por determinado período de tempo e tem por objetivo o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo direito de acesso.

Realizar medições de todas as variáveis que influenciam o regime de vazões de uma bacia hidrográfica é uma tarefa, na prática impossível, devido ao tempo e recursos exigidos. Desta forma, para melhorar a compreensão da dinâmica de uma bacia hidrográfica, além do monitoramento, faz-se uso de modelos hidrológicos. A figura 1 mostra a integração entre monitoramento, modelagem e entendimento do sistema.

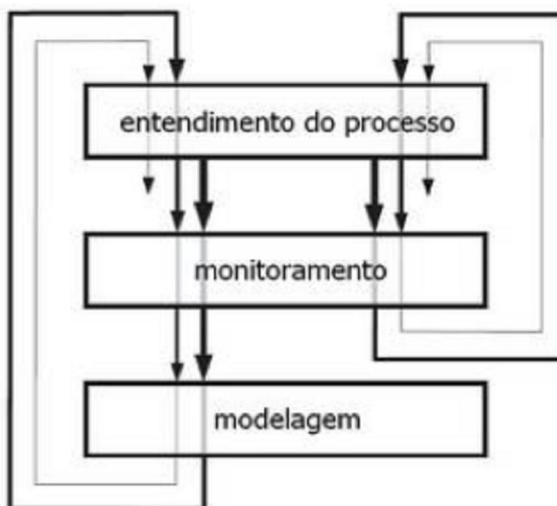


Figura 1 – Relação entre monitoramento, modelagem e entendimento do sistema.

Fonte: Grayson e Blosch (2000)

Definiu-se a área à montante da estação hidrossedimentométrica de Fragosos como sendo a bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro (Figura2).

A bacia possui uma área de 788 km² e está localizada na divisa dos estados do Paraná e de Santa Catarina, entre as latitudes 25°55'73''S e 26°14'17''S; e entre as longitudes 48°56'34''W e 49°23'12''W. A área é objeto de estudos em rede, desde o ano de 2006, envolvendo a Universidade Federal do Paraná, através do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG/UFPR) e a Universidade Federal de Santa

Catarina, por meio do Laboratório de Hidrologia, dispoñdo assim de dados meteorológicos e hidrológicos necessários para esta pesquisa.

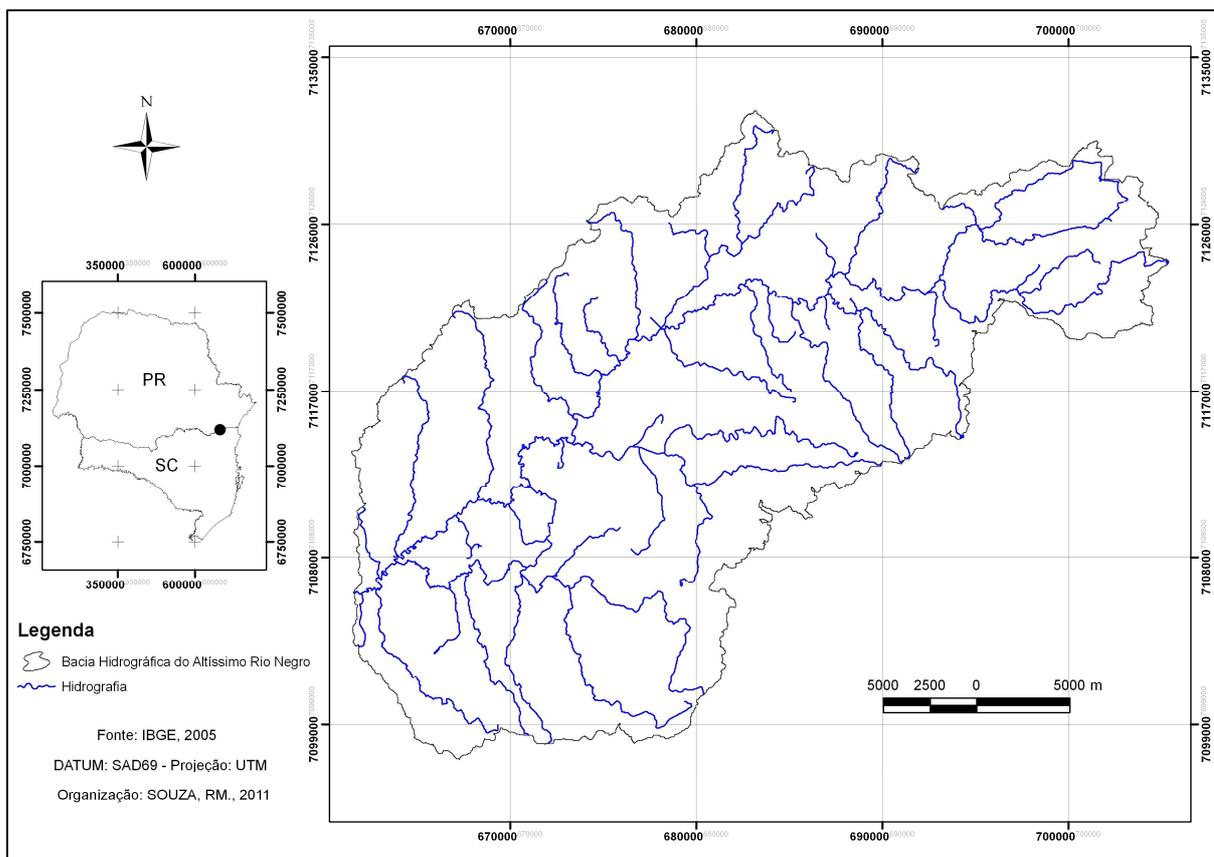


Figura 2 – Bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro

A motivação principal para realizar um estudo com este contexto é oriunda de resultados encontrados por Souza (2008), os quais mostraram que vazões simuladas pelo modelo SWAT apresentaram elevada variabilidade espacial, principalmente nas bacias com área de drenagem inferior a 100km². No que concerne à regionalização, procura-se avaliar se a utilização do SWAT pode contribuir para estudos nesta linha.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a estimativa de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira, com a aplicação do modelo SWAT.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Simular as vazões diárias com o modelo SWAT;
- Discutir o comportamento espacial das vazões mínimas simuladas, e;
- Avaliar, através de medições realizadas em campo, a eficácia do modelo na regionalização de vazões nas sub-bacias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica abordando os conceitos de vazões mínimas, seus mecanismos de geração, regionalização de vazões e modelos de simulação e hidrológicos.

2.1 VAZÕES MÍNIMAS

Apesar de ser um assunto tratado de forma recorrente na literatura, a abordagem do conceito de vazão mínima não se traduz em uma definição universal, mas sim apresenta uma diversidade de aproximações ao tema.

Conforme Sant'ana *et al.* (1989), em um hidrograma, as vazões mínimas correspondem aos trechos que apresentam uma diminuição lenta do escoamento, este regido pela contribuição subterrânea.

Segundo Tucci (2002) as vazões mínimas ou de estiagem, são as vazões que, em uma determinada série histórica, apresentam os menores valores da referida série ou que não atendem às necessidades das demandas. O próprio autor considera esta definição subjetiva, em virtude da vazão de estiagem não se caracterizar a partir de um valor da série histórica e um rio, no período de cheias, pode não atender a demanda da área que abastece.

Em ELETROBRÁS (1985) consta que a vazão mínima é caracterizada pela sua duração e frequência. A distribuição desta variável hidrológica é utilizada para estudar a capacidade natural dos cursos d'água e a necessidade de regularização artificial.

Para Silveira e Silveira (2001), vazões mínimas são as vazões que ocorrem nos períodos de estiagem devido ao esgotamento de reservas do subsolo que afloram nas fontes e nos talwegues dos cursos da água. Além desta conceituação, os autores escrevem que para caracterizar a vazão mínima, é necessário estabelecer critérios para identificá-las e assim utilizá-las em projetos, sendo as definições realizadas com enfoque estatístico, hidrológico e ecológico.

No enfoque estatístico, segundo Silveira e Silveira (2001), as vazões mínimas são consideradas como variáveis aleatórias, nas quais se aplicam técnicas

estatísticas para avaliar a probabilidade de ocorrência. A vazão mínima estatística é determinada pelo seu valor, duração e probabilidade de ocorrência. O valor corresponde à média da vazão de estiagem na duração considerada e a probabilidade de ocorrência é fornecida pela distribuição estatística que melhor se ajusta a esta variável. A vazão Q7,10, vazão de 7 dias de duração e com 10 anos de tempo de retorno, é um exemplo desta abordagem.

A vazão mínima definida com enfoque hidrológico é a vazão definida a partir da curva de permanência das vazões. A curva de permanência fornece a porcentagem de tempo que uma determinada vazão é igualada ou superada em um determinado período histórico. Conforme Silveira e Silveira (2001), a vazão com 95% de permanência, conhecida como Q95, pode ser um índice representativo de vazão mínima.

As vazões mínimas ecológicas ou de preservação ambiental, são as vazões mínimas que garantem a sobrevivência dos ecossistemas. A sua definição passa por um estudo multidisciplinar ecohidrológico, onde os dados fluviométricos devem ser estudados em conjunto com a evolução dos ecossistemas que dependem do regime hidrológico do rio (SILVEIRA E SILVEIRA, 2001).

Nota-se que as definições e conceituações referentes às vazões não são uniformes e diferem de acordo com o enfoque da pesquisa, aproximando-se então da definição de Smakhtin (2001), para o qual o termo vazões mínimas pode ter significados diferentes, de acordo com o interesse do estudo.

Entendendo vazão mínima como o fluxo de um rio que ocorre em épocas mais secas do ambiente em questão, este estudo adota o conceito de vazão de enfoque hidrológico definida por Silveira e Silveira (2001), ou seja, a vazão Q95, definida a partir da curva de permanência. Esta definição de vazão mínima é a mesma utilizada no Estado do Paraná para gestão de recursos hídricos.

2.1.1 Natureza e características das vazões mínimas

Conforme Smakhtin (2001), a origem das vazões mínimas, são as descargas de águas subterrâneas, de lagos, pântanos ou do derretimento de geleiras. A magnitude anual destas vazões, a variabilidade de sua vazão e a taxa de esgotamento na ausência de chuvas, a duração de seus eventos, a participação

relativa destas vazões no hidrograma, são algumas das características tratadas pela hidrologia no estudo das vazões mínimas.

Em um momento no qual a disponibilidade hídrica está ameaçada, o conhecimento sobre as vazões mínimas torna-se essencial para assegurar a correta oferta de água para suprir a crescente demanda. As vazões de referência para outorga de direito de uso de recursos hídricos são definidas tendo como base vazões mínimas. São exemplos de vazão de referência a Q7,10 (vazão de 7 dias de duração e com 10 anos de tempo de retorno) e a Q95 da curva de permanência (parcela do tempo no qual uma vazão é igualada ou superada).

Desta forma, o conhecimento da magnitude e da frequência das vazões mínimas é importante para o planejamento de recursos hídricos, manutenção da quantidade e da qualidade da água para irrigação, recreação e conservação da vida de animais (SMAKHTIN, 2001). Para Silveira e Silveira (2001) o conhecimento das vazões mínimas de uma bacia hidrográfica é elemento básico em estudos de disponibilidade hídrica e preservação ambiental por estar vinculado a períodos críticos de oferta de água.

Funkhouser et al. (2008) citam que as características das vazões mínimas afetam a sua utilização pelos seres humanos e informações detalhadas sobre suas características são essenciais para o gerenciamento de uma bacia hidrográfica. Seu regime de escoamento depende da interação da topografia, da geologia, do clima e do uso da terra, ou seja, está diretamente relacionado com as propriedades fisiográficas da bacia hidrográfica, sendo que em muitas situações, a área de contribuição é o fator predominante para explicar a magnitude das vazões mínimas, com substancial influência das precipitações, do grupo hidrológico do solo, da cobertura vegetal, da declividade da bacia e do uso do solo.

Na mesma linha de raciocínio, Smakhtin (2001) afirma que os fatores naturais que influenciam o comportamento das vazões mínimas, seja para perda ou ganho, incluem a distribuição e as propriedades de infiltração dos solos, as características hidráulicas e extensão de aquíferos, a taxa e a frequência de recarga do aquífero, a evapotranspiração da bacia, a distribuição da vegetação, a topografia e o clima.

Apesar do aumento significativo de pesquisas sobre vazões mínimas nas últimas décadas, a compreensão de seus mecanismos geradores específicos e a relevância de diferentes processos de ganhos e de perdas na vazão perante a

variedade de condições climáticas, topográficas e geológicas continua a ser bastante limitada. Provavelmente, este fato deve-se aos limitados estudos experimentais referentes a vazões mínimas (SMAKHTIN, 2001).

Atualmente, os impactos antrópicos sobre os ambientes naturais são cada vez maiores, sendo a água o bem natural que mais sofre com os impactos gerados pelo homem. Segundo Smakhtin (2001) devido à variedade de impactos antrópicos sobre as vazões, o regime de vazões mínimas de diversas bacias foi significativamente alterado. Em algumas situações, as vazões mínimas foram efetivamente retiradas dos rios, devido a captações, ou artificialmente geradas a partir de fluxos de retorno de irrigação e descargas de reservatórios. Para o autor, um problema no estudo de vazões mínimas é que mesmo diante dos impactos antrópicos sobre as bacias, a maioria das pesquisas investiga as relações entre as características das vazões mínimas e as condições naturais da bacia, deixando a ação antrópica fora do estudo.

2.1.2 Aumento ou diminuição no volume de vazões mínimas

Smakhtin (2001) realizou uma extensa revisão sobre vazões mínimas. Em seu trabalho, destacam-se os processos responsáveis pelo aumento ou diminuição de vazões mínimas. As discussões apresentadas a seguir são oriundas desta revisão

Para o referido autor, a vazão de um rio é resultado de complexos processos naturais que operam na bacia hidrográfica. As bacias hidrográficas podem ser entendidas como uma série de reservatórios interligados, onde cada um possui seus componentes de recarga, armazenamento e descarga. A recarga é dependente da precipitação, enquanto o armazenamento e a descarga são funções complexas que são dependentes das características fisiográficas da bacia.

Em diversas situações, os aumentos naturais de volume de vazões mínimas nos períodos de seca são oriundos do lançamento de águas subterrâneas armazenadas. Este processo ocorre no cruzamento de um rio com um aquífero. Para que as vazões mínimas sejam sustentáveis, algumas condições são necessárias, a saber:

- O aquífero deve ser recarregado sazonalmente com quantidades adequadas de água;
- A lâmina de água do aquífero deve ser rasa o suficiente para ser cortada pelo rio, e;
- A dimensão do aquífero e suas propriedades hidráulicas devem ser suficientes para manter a vazão nos períodos de seca

Além do ganho proveniente das águas subterrâneas, o aumento do volume de vazões mínimas pode ser derivado de superfícies localizadas próximas à fundos de vale ou do próprio canal, onde os solos estão permanentemente úmidos. Estas áreas concentram a água da chuva durante e após os eventos de precipitação, caracterizando-se então como um reservatório. Percebe-se que os mecanismos de geração de vazões mínimas são afetados, de forma significativa, pela geologia e geomorfologia da bacia.

As vazões mínimas também podem ser mantidas por lagos que possuam conexão hidráulica direta com o rio. A literatura que trata dos efeitos dos lagos sobre o regime das vazões mínimas, até o presente, mostra-se limitada.

No que concerne aos fatores que contribuem para a diminuição da vazão nos períodos de seca, destacam-se:

- Evaporação direta da água do rio e de zonas úmidas;
- Perdas por evaporação nas áreas de infiltração;
- Perdas referentes a solos secos em margens de córregos, e;
- Especificamente em regiões muitas frias, têm-se a atuação do *permafrost*.

A literatura referente a estudos experimentais de vazões mínimas e os seus vários mecanismos de geração é limitada, e qualquer estudo que enfoque estes mecanismos deve fazer parte de planos de gerenciamento de recursos hídricos.

2.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Conhecer o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, frente à atual demanda crescente de recursos hídricos, é fator preponderante para avaliação da disponibilidade hídrica. O monitoramento seria uma forma para o início de um estudo e o conseqüente conhecimento de uma bacia. Fioreze et al. (2008) afirmam

que para a determinação da correta disponibilidade hídrica, faz-se necessário um monitoramento contínuo e a realização de estudos complementares, como o acesso a série histórica de vazões.

Ocorre que no Brasil, segundo Santos (2009), existe o predomínio de monitoramento de bacias com área de drenagem superior a 100 km², existindo uma lacuna para bacias com áreas menores. Para Silva Junior *et al.* (2003) esta característica da rede de monitoramento brasileira deve-se aos seguintes motivos:

- Aproveitamento energético, portanto o monitoramento é efetuado para grandes bacias, com áreas de drenagem maiores do que 2000 km²;
- Os custos de monitoramento de pequenas bacias são altos, e;
- Existe uma dificuldade em cobrir toda a extensão do território brasileiro.

Então, devido à ausência generalizada de monitoramento para pequenas bacias hidrográficas e a ocorrência de vazios na rede de monitoramento em médias e grandes bacias hidrográficas do Brasil, existe a necessidade da busca por alternativas que permitam o conhecimento do comportamento hidrológico em bacias não monitoradas. Destaca-se então a regionalização hidrológica.

Para Fill (1987), a regionalização hidrológica, em um sentido mais amplo, pode ser entendida como qualquer processo de transferência de informações das estações pluviométricas e fluviométricas para outros locais com ou sem observações próprias. As transferências podem ser realizadas para séries de vazões, precipitações ou características relevantes destas variáveis, como a média, variância, máximos e mínimos, equações e parâmetros. Em uma definição mais restrita, regionalização hidrológica pode entendida somente como a transferência de equações ou parâmetros,

Além de suprir de informações uma bacia não monitorada, a regionalização também tem por objetivo melhorar a qualidade da informação hidrológica de bacias já monitoradas.

Entende-se aqui, a regionalização hidrológica como o conjunto de técnicas de transferência de informações hidrológicas oriundas de uma bacia monitorada para outra bacia, monitorada ou não, tendo como requisito que a regionalização seja efetuada dentro de uma região com comportamento hidrológico semelhante. A semelhança do comportamento hidrológico é fruto de características fisiográficas específicas da região.

Conforme Silva Junior *et al* (2003), entidades federais e estaduais realizam a regionalização hidrológica para espacializar informações necessárias para tomadas de decisões, na concessão de outorgas de recursos hídricos e no controle ambiental. Para ELETROBRÁS (1985) os estudos de regionalização visam:

- Estimar variáveis e/ou parâmetros hidrológicos em locais sem dados;
- Aumentar as amostras pontuais e em consequência, melhorar as estimativas das variáveis;
- Verificar a consistência das séries hidrológicas, e;
- Identificar a falta de postos de observação e séries históricas.

Segundo Diniz (2008), o uso da regionalização é complexo, nunca está finalizada ou totalmente confiável, entretanto, não significa que não pode ser usada. O referido autor cita que princípios e lógicas desenvolvidas por diversas disciplinas relacionadas com a hidrologia são utilizadas no processo de regionalização.

Baena *et al.* (2004), afirmam que nos estudos de regionalização, devem-se considerar as características físicas e climáticas da bacia que mais influenciam a distribuição espacial da vazão e que sejam de fácil medição. Sousa (2009) defende o uso de sistemas computacionais em estudos de regionalização hidrológica, considerando que estes estudos envolvem procedimentos matemáticos e estatísticos aplicados às séries de vazões e características físicas e climáticas da bacia hidrográfica.

Para Sousa (2009) na realização de um estudo de regionalização, deve-se definir uma região hidrologicamente homogênea, na qual as características físicas e climáticas têm variações mínimas e sua delimitação depende da metodologia de regionalização escolhida. Para uma mesma área, de acordo com a variável de interesse, pode-se então definir diferentes regiões hidrologicamente homogêneas, visto que os processos responsáveis no comportamento das vazões máximas são diferentes daqueles que atuam nas vazões mínimas.

Riggs (1990) aponta algumas condições que limitam uma relação regional, a saber:

- Série com poucos dados ou pouco representativa;
- Número de estações pluviométricas / fluviométricas insuficientes para toda a bacia;
- Alterações nas estações de medições ou interrupções nas medições;

- Precipitação na bacia sujeita a efeitos orográficos;
- Rios que correm por regiões com características físico-climáticas diferentes;
- Irregularidade na distribuição das chuvas, principalmente em regiões semi-áridas, com efeitos ponderados ao longo da bacia;
- Diferenças geológicas na bacia, e;
- Dificuldade na seleção de variáveis explicativas.

Assim como diversos estudos hidrológicos, a regionalização apresentará bons resultados de acordo com a qualidade da série de dados. Desta forma, os dados de vazão de uma bacia devem ser de boa qualidade e relativamente livre de distúrbios antrópicos (como implantação de reservatórios, captação ou descarga de água) a menos que os distúrbios sejam abordados de forma clara pelos modelos de regionalização, o que é raro. Além disso, a duração da série deve ser longa o suficiente para capturar a variabilidade natural do sistema e minimizar a influência de erros de amostragem na estatística da vazão de interesse. A regionalização de variáveis hidrológicas que demonstram tendência significativa ao longo do tempo deve ser utilizada com cuidado. A garantia da qualidade da série de dados irá influenciar fortemente os resultados do estudo (WMO, World Meteorological Organization, 2008)

Para Silva Júnior *et al* (2003), apesar de a regionalização ser uma ferramenta útil para o conhecimento hidrológico espacial, existem limitações significativas à extrapolação de seus resultados, principalmente para bacias de menor porte. Assim, a regionalização não substitui a informação, apenas busca uma melhor alternativa perante as incertezas existentes.

Conforme Tucci (2002), a informação a ser transferida no processo de regionalização pode ser na forma de variável, função ou parâmetro.

2.2.1 Regionalização de variáveis, funções e parâmetros.

A regionalização de parâmetros ou variáveis hidrológicas tem a finalidade de extrair o máximo de informação dos dados pontuais disponíveis, extrapolando-os

especialmente dentro de um contexto temporal, sendo que as variáveis mais importantes são as vazões e as precipitações (ELETROBRÁS, 1985).

Tucci (2002) afirma que a determinação dos parâmetros se dá pela relação das características físicas das bacias. O referido autor apresenta possíveis variáveis explicativas para a variável a ser regionalizada, a saber:

- Vazão mínima: área da bacia e densidade de drenagem;
- Vazão média: área da bacia e precipitação, e;
- Vazão máxima de cheia: área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio.

Conforme Naghettini e Pinto (2007) e Tucci (2002), as variáveis hidrológicas descrevem as variações temporais e espaciais dos fenômenos do ciclo hidrológico e identificam o comportamento de um processo ou fenômeno. São exemplos de variáveis hidrológicas, a vazão média, vazão mínima, precipitação média, entre outras. Segundo Tucci (2002) pode-se realizar a regionalização de variáveis quando uma variável pode ser determinada numa região com base em relações estabelecidas através dos dados pontuais existentes.

Tucci e Clarke (2001) escrevem que a regionalização de uma variável envolve a sua determinação em locais diferentes dentro de uma mesma região. A região geralmente é definida por limites geográficos que caracterizam sua variação dentro da mesma ou pela definição oriunda do estudo. A regionalização segue as seguintes etapas:

1. Definição dos limites da área de estudo;
2. Definição das variáveis dependentes e explicativas da regionalização;
3. Seleção dos dados das variáveis, e;
4. Funções regionais: relações regionais e definição das regiões homogêneas.

A função hidrológica representa a relação entre uma variável hidrológica e uma ou mais variáveis explicativas ou estatísticas, como curva de permanência ou relação entre áreas impermeáveis e densidade habitacional (TUCCI, 2002). Pode-se realizar a regionalização de funções quando uma função hidrológica pode ser determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes.

A regionalização de uma função ou variável é estabelecida considerando um dos seguintes critérios:

- Estabelecimento da relação empírica entre valores da função e características conhecidas, especialmente, do sistema hidrológico, e;

- Estabelecimento da função com base nos valores do item anterior ou de relações adimensionais.

No que concerne aos parâmetros, Hundecha Hirpa (2005) escreve que os parâmetros de um modelo definem as características da bacia, com o número variando de modelo para modelo.

A regionalização de parâmetros decorre da utilização de modelos hidrológicos ou de uma função. Abdulla e Lettemaier (1997) citam que a regionalização de parâmetros de modelos chuva-vazão não é uma tarefa fácil. Existem problemas na calibração dos modelos, interdependência de parâmetros e dificuldades de encontrar uma boa relação regional, com alguns parâmetros não se relacionando com as características da bacia. As maiores dificuldades encontradas surgem na aplicação de modelos em grandes bacias quando calibrados para pequenas bacias, assim como o inverso. Deve-se então ter um cuidado especial com a escala quando efetuar-se uma regionalização de parâmetros.

Conforme Lacerda Júnior (2002) a escala é um fator importante em estudo de modelagem hidrológica, com o efeito de escala podendo afetar os parâmetros físicos, em virtude da heterogeneidade do clima e do solo, com as variáveis hidrológicas comportando-se de maneiras distintas de acordo com a escala da bacia. O referido autor realizou um estudo sobre a influência da escala da bacia nos valores dos parâmetros do modelo distribuído NAVMO, em bacias na região semi-árida da Paraíba, com resultados mostrando que alguns parâmetros do modelo variam com a escala.

2.2.2. Metodologias de regionalização de vazões.

Em virtude de sua importância e uso recorrente em estudos hidrológicos, a regionalização de vazões é objeto de estudo em diversos trabalhos, levando então ao surgimento de inúmeras metodologias. Destacam-se a seguir três métodos de regionalização: por regressão, interpolação em um ambiente SIG e o método Écogeográfico. Respectivamente, estes métodos trabalham com regressões regionais, interpolação e extrapolação de vazões e regionalização efetuada considerando características fisiográficas das bacias.

2.2.2.1 Método de regionalização de vazões por regressão

Segundo Rodriguez (2008), este método é realizado com a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das áreas de contribuição das estações fluviométricas para cada região homogênea. Assim, devido ao comportamento hidrológico semelhante das regiões definidas, pode-se transferir informações de um local para outro, desde que ambos estejam dentro de uma mesma região homogênea. A metodologia para regionalização de vazões, proposta pela ELETROBRÁS (1985), baseia-se neste método.

A aplicação do método tradicional enfrenta algumas limitações, como a correta disponibilidade de um número mínimo de estações para aplicação do modelo de regressão e a não utilização de estações influenciadas por reservatórios a montante. Esta última restrição é muito freqüente na região semi-árida, onde os rios são intermitentes. Como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras possui escassez de informações, a precisão e o uso deste método de regionalização pode se tornar não recomendável RODRIGUEZ (2008).

Porém, mesmo diante de limitações, este método é usado com muita freqüência. Fioreze *et al* (2008) avaliaram o desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, no estado de Goiás. As características físicas empregadas nas equações de regionalização foram a área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem, coeficiente de compacidade e declividade do álveo (razão entre a diferença total de elevação do leito pela extensão horizontal do curso d'água). Utilizaram-se dois tipos de equações, uma considerando zonas homogêneas dentro da bacia e outra considerando a área da bacia como um todo. Os resultados mostraram que a equação que delimita zonas homogêneas apresentou desempenho superior.

Agra *et al* (2003) compararam resultados obtidos para séries históricas e curva de permanência de três metodologias: vazão específica, equações de regionalização e coeficiente de escoamento regional (calculado pela razão entre o volume escoado e o volume precipitado). As metodologias foram calibradas em uma

estação com área de drenagem de 1829 km² e posteriormente os resultados foram aplicados em uma bacia menor, com área de 1250 km². Foram geradas curvas de permanência com os valores obtidos através das três metodologias, sendo que o método da vazão específica apresentou melhores resultados, com R² de 0,99 para a curva toda e R² 0,98 para o intervalo entre Q50 e Q95. Porém, considerando somente esse intervalo, a equação de regionalização apresentou desempenho semelhante, com R² de 0,98. Os autores verificaram que a precipitação é uma variável sensível nos resultados de regionalização para pequenas bacias.

Pedrollo e Germano (1999) regionalizaram as vazões médias de longo período (Q_{mlp}), Q50, Q95 e $Q_{7,10}$, através do ajuste de equações de regressão, utilizando dados de quinze estações, exceto para a $Q_{7,10}$, que foi ajustada com dados de treze estações. Utilizaram-se como variáveis a área de drenagem da bacia, a precipitação média dos totais anuais dos postos de influência mais próximos a cada estação e três parâmetros ajustáveis em cada equação. Segundo os autores, na ausência de dados de precipitação, os quais apresentaram pequena melhora nos resultados quando utilizados, pode-se utilizar somente a área da bacia e dois parâmetros ajustáveis. O erro padrão (EP), que mede a dispersão das estimativas em torno das observações e o coeficiente de determinação - R² - encontrados para as regionalizações são mostrados na tabela 1.

TABELA 1 – RESULTADOS DE Q_{mlp} , Q50, Q95 e $Q_{7,10}$ REGIONALIZADAS

	Q_{mlp}		Q50		Q95		$Q_{7,10}$	
	1	2	1	2	1	2	1	2
EP (m³/s)	0,93	1,25	2,69	2,58	1,96	1,92	1,41	1,32
R² (%)	99,7	99,4	96,8	96,6	87,5	87,2	83,9	82,8

FONTE: PEDROLLO E GERMANO (1999)

NOTA: 1 – equação com precipitação; 2 – equação sem precipitação

2.2.2.2 Regionalização de vazões por interpolação em um ambiente SIG.

Segundo Chaves *et al.* (2002), o método tradicional de regionalização de vazões, com a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e regressões regionais, apresenta limitações significativas quando não se dispõe de uma

quantidade de dados satisfatória. Perante a realidade de escassez de monitoramento no país, a utilização do método tradicional pode apresentar pouca precisão. Diante deste panorama, um método alternativo, o qual utiliza técnicas de interpolação e extrapolação em um ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), foi proposto pelos autores.

Devido ao advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), a espacialização de variáveis hidrológicas tornou-se uma tarefa mais fácil, explorando-se de forma mais acentuada as informações existentes, seja a montante ou a jusante do local de interesse. Com automatização, através de uma linguagem de programação macro, esta ferramenta torna-se ainda mais poderosa (CHAVES *et al*, 2002).

Desta forma, o objetivo de Chaves *et al* (2002), é propor uma metodologia simples e robusta para a regionalização de vazões mínimas em bacias hidrográficas com série de dados limitada, utilizando técnicas de interpolação em um ambiente SIG.

Analisando a rede de drenagem da bacia em estudo e da distribuição da rede hidrométrica, de acordo com a metodologia proposta, os canais podem ser classificados conforme os seguintes casos:

- 1º caso: o ponto de interesse está localizado a montante de um ponto com vazão conhecida, sendo então aplicado para regiões de cabeceira, onde existem dados somente a jusante. Neste caso utiliza-se a seguinte equação:

$$Q_y = (A_y / A_x) Q_x \quad (1)$$

onde: Q_y é a vazão mínima de referência em um ponto da bacia, Q_x é a vazão de referência em um posto fluviométrico próximo e A_y e A_x são as áreas de drenagem relativas ao ponto de vazão desconhecida e ao posto próximo, respectivamente.

A hipótese de Chaves *et al.* (2002) é que a vazão do ponto y será proporcional à razão entre as áreas a montante de x e y . Se os pontos x e y estiverem próximos, então a robustez da equação será elevada, além da alta probabilidade dos pontos estarem na mesma região hidrológica.

- 2º caso: ponto de interesse localizado entre dois pontos com vazão conhecida. Neste caso, há uma interpolação entre as vazões conhecidas dos dois pontos, conforme a equação 2:

$$Q_z = A_z \left[\left(\rho_x Q_x / A_x + \rho_y Q_y / A_y \right) \right] \quad (2)$$

onde A_x , A_y e A_z são as áreas de drenagem, respectivamente, dos pontos x, y e z, Q_x , Q_y e Q_z (m^3/s) são as vazões mínimas de referência relativas, respectivamente, aos pontos x, y e z, e ρ_x e ρ_y são os pesos relativos a x e y, dados pela equação a seguir:

$$\rho_x = d_y / (d_x + d_y) \text{ e } \rho_y = d_x / (d_x + d_y) \quad (3)$$

onde d_x (Km) é a distância x e z e d_y (Km) é a distância entre y e z, medidas ao longo do canal. As distâncias d_x e d_y medidas ao longo do canal, são calculada de forma fácil pelo SIG, após programação em linguagem macro. No caso de z estar mais próximo de um dos pontos, hipoteticamente o x, este ponto irá influenciar mais do que o outro, portanto $\rho_x > \rho_y$. Caso z esteja localizado exatamente no meio de x e y, os pesos de ρ_x e ρ_y serão iguais.

Para Chaves *et al* (2002), a utilização das variáveis distância e área de drenagem na interpolação da vazão, garante robustez à equação e também incorpora vantagens da lógica *fuzzy*, pela razão das distâncias inversas, evitando possíveis discontinuidades no cálculo de Q_z .

Igualmente ao caso 1, a espacialização da vazão neste caso utiliza as informações hidrológicas das estações vizinhas, podendo assim o ponto z estar na mesma região hidrológica de x e y.

- 3º caso: ponto de interesse localizado à jusante de um ponto com vazão conhecida. Este caso geralmente ocorre próximo ao exutório da bacia. A equação a ser utilizada é a mesma do caso 1.
- 4º caso: ponto de interesse localizado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior. Chaves *et al* (2002) afirma que este caso é necessário para generalizar o método. Neste caso, o ponto com vazão desconhecida situa-se em um canal de ordem i, que contribui para um

canal de ordem superior, cuja confluência esteja entre dois pontos com vazão conhecida, x e y .

Este caso é uma combinação dos casos 1 e 2, sendo a vazão do ponto desejado diretamente proporcional às áreas de drenagem e inversamente proporcional as distâncias relativas aos postos. O procedimento a ser aplicado é o seguinte:

- Utiliza-se o caso 2 entre os postos x e y , calculando-se a vazão no ponto de confluência do canal de ordem i (z')
- Calcula-se a vazão de referência do ponto de interesse z , utilizando a vazão calculada em z' , aplicando-se o mesmo procedimento do caso 1.

Conforme Chaves *et al.* (2002), com este caso, contemplam-se as situações de interpolação e extrapolação da informação hidrológica da bacia em estudo.

A metodologia foi aplicada na bacia do Rio Itapicuru (36.440 km²), a qual apresenta uma diversidade geológica, pedológica, climática e de uso do solo. A referida bacia possui uma baixa densidade de postos fluviométricos, com somente onze pontos com dados confiáveis, e já foi alvo de uma regionalização hidrológica pelo método de regressão.

Escolheram-se cinco pontos de interesse na bacia, comparando-se os valores da vazão Q90 regionalizada com dados observados. A qualidade da regionalização foi avaliada através do erro relativo entre o valor observado e o calculado e pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970). Os resultados mostraram que tanto pela avaliação do erro médio e do coeficiente de Nash, a metodologia proposta por Chaves *et. Al* (2002) apresentou melhores resultados, conforme tabela abaixo:

TABELA 2 - RESULTADOS DA REGIONALIZAÇÃO PELO MÉTODO TRADICIONAL E CHAVES *ET. AL*

	Erro relativo	Nash-Sutcliffe
Metodologia por regressão	289,7	0,73
Metodologia proposta	45,1	0,88

FONTE: CHAVES *ET. AL* (2002)

Para Chaves *et al* (2002) os melhores resultados da metodologia podem ser atribuídos a maior robustez do método, visto que as interpolações de vazões utilizam informações das estações mais próximas, não sofrendo então o efeito das heterogeneidades de grandes bacias. O desempenho inferior do método por

regressão pode ser atribuído a utilização somente da variável área de drenagem e aos poucos dados utilizados. Desta forma, o método proposto tem melhores resultados para aplicações em bacias hidrográficas com poucos dados hidrológicos.

Em termos gerais, pode-se afirmar que o método proposto por Chaves *et al* (2002) não difere significativamente dos métodos tradicionais de interpolação, assim como as variáveis utilizadas. A maior contribuição deste método é a realização da interpolação no ambiente SIG.

2.2.2.3 Regionalização através de características fisiográficas

De acordo com Assani *et al.* (2006), apesar do desenvolvimento de diversos métodos de regionalização, existem diferenças nas abordagens utilizadas entre hidrólogos e entre especialistas de outros campos do conhecimento, como ecologistas e geógrafos físicos. As divergências estão nos métodos de agrupamento das estações em regiões hidrológicamente homogêneas, na escolha das variáveis hidrológicas, nas leis estatísticas utilizadas para estimar valores de vazão em áreas não medidas ou parcialmente medidas, na escala temporal de análise da vazão e na finalidade da regionalização.

A abordagem da regionalização por regiões homogêneas não contempla as preocupações de geógrafos e ecologistas pelos seguintes fatores:

- A escolha das variáveis hidrológicas utilizadas nos processo de regionalização hidrológica é subjetiva e não é baseada em conceitos científicos que a justifique. Esta subjetividade não reflete a variabilidade espacial das características fisiográficas que influenciam a vazão;
- Devido à escolha subjetiva, são ignoradas característica da vazão que estão contempladas no conceito de regime de vazão natural, introduzido em estudos de ecologia aquática. Este conceito prega que a vazão de um rio pode ser decomposta em várias características, cada uma desempenhando um papel ecológico fundamental e específico na dinâmica de ecossistemas fluviais. É importante ressaltar que este conceito difere da vazão natural entendida pela hidrologia, a qual são as vazões sem nenhuma influência antrópica. Portanto, nota-se uma diferença entre os conceitos.

- Não considera todas as escalas temporais. A regionalização geralmente é limitada à vazão desejada no estudo. Porém, ela não explica as diferenças dos regimes hidrológicos, as quais são complexas devido à interação de vários fatores, e;
- O objetivo da regionalização é limitado a estimativa de vazão, nem sempre satisfazendo os anseios de especialistas de outras áreas. Este objetivo pouco contribui para a gestão ecológica e de recursos hídricos, além de não prever os impactos antrópicos ou das alterações climáticas sobre as vazões.

Perante estas limitações, Assani *et al* (2006) escrevem que ecologistas propuseram um método de regionalização com base no conceito de vazão natural dos estudos de ecologia aquática, chamada de abordagem ecológica, a qual difere da abordagem anterior nos seguintes aspectos:

- A escolha das variáveis é objetiva e a regionalização considera as cinco características básicas da vazão: magnitude, frequência, duração, período de ocorrência e variabilidade;
- Considera todas as escalas temporais;
- O objetivo da regionalização é explicar as diferenças na estruturação e composição biológica de ecossistemas fluviais.

Porém, Assani *et al* (2006) consideram que nesta abordagem, mesmo com a utilização de diversas variáveis, as quais podem variar de autor para autor, não se contempla todas as características da vazão, conforme o conceito de regime de vazão natural da ecologia aquática, deixando a aplicação deste conceito incompleta. Além desta limitação, a análise simultânea de todas as escalas de tempo não permite considerar todas as características da vazão e os fatores ambientais que as influenciam são ignorados. Assim, com o objetivo de superar estas limitações, os autores propuseram uma nova abordagem para a regionalização hidrológica, também baseada no conceito de regime de vazão natural da ecologia aquática. A abordagem é chamada de Écogeográfica e difere da abordagem ecológica em três aspectos, a saber:

- O método é baseado na utilização de características da vazão e não de variáveis hidrológicas. A escolha é justificada devido ao fato que existe um número infinito de variáveis para definir as cinco características fundamentais da vazão. Como o número de variáveis é enorme, torna-se impossível incluir todas no processo de

regionalização, ao contrário das características básicas, que são limitadas a cinco (magnitude, frequência, duração, período de ocorrência e variabilidade). Aqui se contempla o conceito de regime de vazão natural da ecologia aquática;

- O objetivo do método Écogeográfico é determinar os fatores fisiográficos e climáticos que explicam a variabilidade espacial das características fundamentais da vazão visando garantir a gestão sustentável dos recursos hídricos em um planeta em mudança. Desta forma, necessita-se determinar, por exemplo, as características de vazão que são diretamente influenciadas pela cobertura florestal ou pela temperatura do ar, com o propósito de prever possíveis impactos oriundo de desmatamento ou mudanças climáticas sobre os recursos hídricos. Para cumprir estes objetivos, Assani *et al.* (2006) propõem a análise, individual, das escalas temporais diárias, mensais e anuais que influenciam os fatores fisiográficos e climáticos citados. Tal análise auxilia na explicação da variabilidade espacial dos fenômenos;
- A análise individual das escalas temporais permite definir todas as características de vazão relacionadas a cada escala. Desta forma, a abordagem Écogeográfica permite a implantação do conceito de regime de vazão natural da ecologia aquática na regionalização.

A aplicação desta metodologia ocorre em quatro etapas, conforme a figura 3.

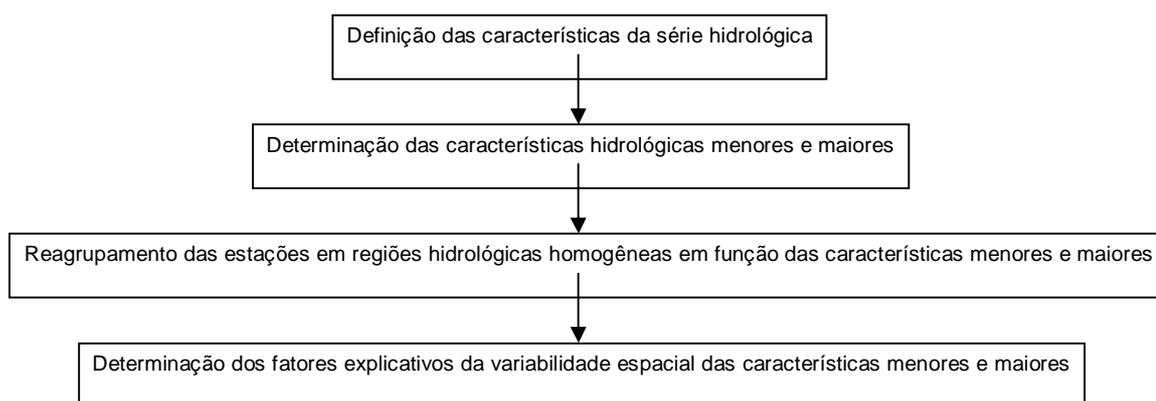


Figura 3 – Etapas do método de regionalização Écogeográfico. Fonte: Assani et al (2006)

Segundo Assani *et al* (2006), uma característica de vazão é um componente intrínseco ou um parâmetro que caracteriza a vazão de um rio, enquanto a “variável ou índice hidrológico” é uma variável estatística utilizada na definição da característica da vazão. Cita-se como exemplo frequência, que é uma característica da vazão. Ela pode ser definida através de uma série de variáveis ou índices

hidrológicos, como taxas de retorno 100, 20 ou 2 anos. O número de características da vazão é limitado, enquanto as variáveis hidrológicas podem ser ilimitadas.

Apesar da importância de todas as características da vazão na dinâmica dos ecossistemas, algumas podem ser mais importantes do que outras. Determinadas características, por exemplo, podem refletir melhor a influência da fisiografia da bacia, surgindo então a necessidade de classificação em características menores e maiores. Na abordagem Écogeográfica, a classificação é baseada no peso (variável explicativa) de cada característica, através da análise de componentes principais. (ASSANI *et al*, 2006).

Visando minimizar o efeito da subjetividade no processo de reagrupamento das estações em regiões hidrológicas homogêneas, Assani et al (2006) propuseram o reagrupamento conforme a sua pontuação nos componentes principais.

No que concerne à determinação dos fatores que explicam as características espaciais da vazão, Assani et al (2006) propõem a utilização simultânea do método de correlação simples e do método de correlações canônicas.

2.2.2.4 Regionalização de vazões mínimas

Devido à complexidade dos fatores que influenciam o regime de escoamento da vazão mínima, a WMO (2008) publicou um manual sobre estimativa e previsão de vazões mínimas. No referido trabalho, os métodos de estimativa de vazões mínimas podem ser divididos em três grupos. O primeiro grupo consiste em métodos empíricos, com a utilização de simples equações matemáticas. As equações desenvolvidas não têm representação física explícita, relações causais (que são incorporadas em modelos determinísticos ou matemáticos) nem um erro aproximado.

O segundo grupo é baseado em modelos estatísticos. A estimativa de vazão em locais sem medição é realizada com auxílio de técnicas de regressão múltipla. Esta técnica ganhou amplo uso na hidrologia.

O terceiro grupo abrange os modelos chuva-vazão. Eles descrevem as interações entre a estrutura da bacia, as precipitações, as perdas de água pelos processos evaporativos e as vazões, representando os processos hidrológicos através de equações matemáticas. As respostas destes modelos são controladas

por parâmetros. Para a aplicação em bacias sem medição, os parâmetros do modelo são derivados de medições ou através de relações entre os parâmetros do modelo e a física da bacia.

Apesar da crescente utilização de modelos hidrológicos na hidrologia, a regionalização de vazões mínimas é efetuada, em sua grande maioria, através de modelos estatísticos, conforme o segundo grupo apresentado pela WMO (2008).

Trabalhando com equações de regressão, Risley et al. (2008), em um trabalho realizado para o USGS (U.S. Geological Survey), estimaram a duração do escoamento e a frequência das vazões mínimas em rios do Oregon/EUA, com o desenvolvimento de equações de regressão. O coeficiente de determinação R^2 para a vazão Q95 foi de 0,91 e para a vazão $Q_{7,10}$ foi de 0,92.

Fill e Rohn (2002), regionalizaram a vazão $Q_{7,10}$ através da aplicação de um modelo de regressão múltipla, na bacia do Alto Ribeira. As variáveis explicativas utilizadas no estudo foram a área de drenagem, densidade de drenagem, número médio de dias consecutivos sem chuvas e precipitação média anual. Foram utilizados dados diários de dez estações, com área de drenagem inferior a 5000 km² e série de dados superior a dez anos. O resultado do coeficiente de determinação obtido foi de 0,97.

Os dois exemplos citados acima obtiveram resultados adequados. Porém, em virtude da dificuldade de estimar vazões mínimas, outros trabalhos chegaram a resultados inadequados, conforme mostrado nos trabalhos de Charlise et al. (2003) e Sugai et al (1998).

Charlise et al. (2003) discutiram um método de regionalização para estimativa de vazões mínimas para bacias do Himalaia, no Nepal. Utilizaram-se dados de 37 bacias, com áreas de drenagem variando de 6,2 e 2,986 km², com série de dados de 11 a 25 anos, abrangendo o período de 1970 a 1995. O método utilizado é uma análise de regressão linear e multivariada, utilizando como características da bacia a precipitação anual, elevação média da bacia, localização do exutório e a vazão Q95.

A vazão Q95, segundo Charlise et al. (2003), é influenciada substancialmente pelos solos e geologia das bacias. Desta forma, o modelo de regressão criado considerou os grupos hidrogeológicos da bacia. A avaliação do desempenho foi realizada pelo R^2 , sendo obtido o valor de 0,45.

Sugai *et al.* (1998) realizou um estudo de regionalização de vazões mínimas (Q10,7, Q95 e Q99) no Estado do Paraná, utilizando dados de treze estações fluviométricas. O objetivo foi avaliar as técnicas de regionalização por regressão, utilizada para as vazões Q10,7, e através da curva de permanência, para as vazões Q95 e Q99. Utilizou-se um modelo hidrológico (HG-77) desenvolvido pelo CEHPAR (Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza). Utilizou-se de duas técnicas para regionalizar a curva de permanência da vazão Q95. Na primeira, adota-se um único modelo teórico para todas as estações. A segunda técnica, de modelo teórico de melhor ajuste, utiliza modelos diferentes para as estações. Os resultados mostraram que as estimativas regionais de Q10,7 apresentaram erros entre 12% e 66 %, subestimando as vazões locais. A vazão Q95, estimada a partir do único modelo teórico, apresentou erros entre 3% e 75%, e estimada a partir do modelo de melhor ajuste, teve erros de 16% a 100%. As estimativas da vazão Q99 também apresentaram erros elevados. Para a primeira técnica, os erros ficaram entre 6% a 95% e entre 6% a 100% para a segunda técnica. Verifica-se que a estimativa de vazões mínimas, através das técnicas de regionalização utilizadas por Sugai et al (1998), apresenta uma série de incertezas.

Segundo Laaha e Blösch (2005) em estudos de vazão mínima, recomenda-se uma série com no mínimo vinte anos de dados, devido ao efeito da variabilidade climática. Ocorre que dificilmente estes dados estão disponíveis. Desta forma, os autores compararam métodos de regionalização para estimativa de vazões mínimas perante uma série limitada de dados. Os métodos avaliados foram embasados em uma técnica chamada de ajuste climático, que consiste em três etapas, sendo que em determinado momento utilizou técnicas de regressão.

- Seleção dos locais com dados disponíveis que serão utilizados no processo de regionalização, chamada de doadora;
- Cálculo das características de vazão mínima para cada doadora, por meio de técnicas de aumento da série de dados, e;
- Combinação dos valores associados a cada doador para obtenção de uma estimativa de longo prazo para cada local estudado.

O estudo foi realizado em 132 bacias localizadas na Áustria, com áreas de drenagem variando de 09 a 479 km². Os dados utilizados eram diários, de 1977 a 1996, sem perdas por captação, por zonas cársticas ou por armazenamento. Para

aplicação do método, foram selecionadas bacias que não possuem medições próximas a montante.

A técnica foi aplicada considerando-se os seguintes casos:

- Locais sem doadores: nesta situação, o cálculo das características da vazão mínima para séries curtas é realizado sem o ajuste para a variabilidade climática;
- Trecho a jusante: este caso utiliza a estação mais próxima, localizada no mesmo rio que a bacia alvo da regionalização. Como a bacia doadora e a bacia alvo estão próximas, espera-se uma similaridade climática e hidrológica entre ambas;
- Similaridade de bacias: a seleção das bacias doadoras é realizada de acordo com a similaridade fisiográfica das bacias. A hipótese neste caso é que os processos hidrológicos estão relacionados diretamente com as características fisiográficas das bacias, então, as vazões de bacias com similaridades fisiográficas devem sofrer efeitos semelhantes no que diz respeito à variabilidade climática. Neste caso, utiliza técnicas de regressão para classificar as características físicas mais relevantes das bacias;
- Correlação das vazões anuais: primeiramente identificam-se locais que podem ser úteis, com base na proximidade espacial. A segunda etapa filtra a primeira seleção com base nas correlações das vazões mínimas entre as bacias doadoras e as bacias alvo, e;
- Aumento da série de vazões: depois da identificação das bacias doadoras, a segunda etapa do ajuste climático consiste no cálculo dos valores das características de vazão para o local que será alvo da regionalização, a partir de informações oriundas das bacias doadoras.

Comparou-se a vazão Q95 observada com a vazão Q95 prevista, com a utilização de séries de 01, 03, 05, 10 e 15 anos. Os resultados encontrados por Laaha e Blösch (2005) mostram que o método de trecho a jusante foi o que apresentou melhores resultados, com o método de similaridade de bacias ficando com o segundo melhor desempenho. Os autores verificaram que existe uma tendência, em todos os casos, de diminuição dos erros com o aumento da série. Para estimativas de vazão mínimas para períodos menores do que cinco anos, o método de ajuste climático mostrou-se adequado e o erro da estimativa diminuiu com o aumento da descarga Q95.

Castiglioni et al (2009), realizaram um estudo para previsão do índice de vazão mínima em bacias não monitoradas, através de uma interpolação baseada na fisiografia. O método foi aplicado em uma ampla região central na Itália, em 51 bacias, onde um bom número de descritores geomorfoclimáticos está disponível. A partir da série diária de vazões disponíveis, estimou-se empiricamente três índices de vazão mínima, entre elas a Q95 e Q_{7,10}. Utilizaram-se técnicas determinísticas de interpolação espacial, como o polígono de Thiessen e o inverso da distância ponderada e técnicas de interpolação geoestatísticas.

Os descritores fisiográfico utilizados no estudo foram: área de drenagem, comprimento do canal principal, porcentagem de área permeável, elevação máxima, média e mínima, elevação média relativa e tempo de concentração. Segundo Castiglioni et al (2009), os resultados alcançados mostraram que a interpolação baseada na fisiografia é viável e constitui uma abordagem eficiente para a regionalização de vazões mínimas.

2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO

Em senso comum, um modelo traz a idéia de uma representação ideal, perfeita, sem problemas e limitações. Porém, um modelo é tão somente uma representação, uma imagem a ser transmitida e eleita como ideal. Através de uma leitura mais crítica, pode-se entender as limitações de um modelo, seja ele matemático, hidrológico, de escala, fotográfico, entre outros.

Assim, para Chorley e Haggett (1975) modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Todos os modelos necessitam de constante aperfeiçoamento, perante o surgimento de novas informações ou perspectivas da realidade.

Conforme Christofletti (1999) um modelo é qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador, possibilitando a reconstrução da realidade, a previsão de um comportamento, uma transformação ou uma evolução. Não é a realidade que está representada, mas sim a nossa visão e a maneira como percebemos e compreendemos esta realidade.

Segundo Mendes e Cirilo (2001), um modelo pode ser uma teoria, uma lei, uma hipótese ou idéia estruturada, assim como uma equação, uma função, uma relação ou síntese de dados. Os modelos podem ser espaciais, temporais ou espaço-temporais. Podem ser entendidos como representações da realidade, generalizando e simplificando aspectos ou como uma abstração da realidade. Tem-se como objetivo entender o sistema e prever situações futuras, com o intuito de direcionar ações decisórias.

Baldissera (2002) cita que um modelo pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas, com base nos dados observados na realidade. Tucci (1998) define modelo como uma representação do comportamento de um sistema.

De acordo com Mendes e Cirilo (2001) para representar a realidade, algumas características do ambiente são reformuladas, sendo simplificadas. Após esse processo, são extraídas conclusões que podem ser reaplicadas na realidade, a fim de melhor compreendê-la e gerenciá-la. É necessário enfatizar que o desenvolvimento de modelos e o raciocínio são inseparáveis e que a utilização desta ferramenta requer uma vigilância constante, pois os resultados ali apresentados podem trazer uma visão da realidade excessivamente formalizada e previsões inadequadas em virtude da estruturação equivocada dos dados.

Todos os modelos são aproximações da realidade, não representando no todo o sistema em estudo. Apesar deste problema, modelos são ferramentas essenciais no estudo e entendimento das interações dos processos físicos. Construindo um modelo que leve em conta as características essenciais da área de estudo e situações já ocorridas sendo reproduzidas com eficácia, temos a possibilidade de simular novos eventos, novos cenários, ou seja, podemos trabalhar com previsões. Além da vantagem da simulação de vários cenários, alia-se a esse fato o baixo custo da modelagem (MENDES e CIRILO, 2001).

Desta forma, Christofletti (1999) escreve que a modelagem pode ser considerada como um instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica. Assim, a modelagem visa atender requisitos envolvidos em diretrizes metodológicas da pesquisa científica. A justificativa é que a construção de modelos ambientais representa a expressão de uma hipótese científica, a qual necessita ser avaliada sobre o sistema ambiental foco do estudo. Tal avaliação é um teste de hipóteses. Então, a construção de modelos pode ser considerada como

sendo procedimento inerente à pesquisa científica e a sua elaboração deve ser realizada acompanhando os critérios e normas da metodologia científica. Christofolletti (1999) lista as principais características e funções dos modelos, a saber:

- Seletividade: a construção de modelos implica em uma atitude altamente seletiva quanto às informações, onde os ruídos e sinais menos importantes são eliminados para permitir que se observe algo do âmago das coisas. De acordo com Chorley e Haggett (1975) os modelos podem ser considerados como aproximações seletivas que, pela eliminação dos detalhes acidentais, permitem salientar alguns aspectos fundamentais importantes ou interessantes do mundo real sob forma generalizada. Esta seletividade significa que os modelos possuem graus variáveis de probabilidade e amplitude limitada de condições sobre as quais se aplicam;
- Estruturação: os aspectos selecionados da realidade são explorados através de suas conexões. Existe um padrão de integração entre os componentes diferenciados, considerando as suas características morfológicas e funcionais. Assim, o modelo procura representar as relações propiciadas na dinâmica dos processos, ou na correlação das variáveis;
- Enunciativo: a estruturação mostra a existência de um determinado padrão, onde os fenômenos são considerados em termos de relação sistêmica;
- Simplicidade: A estruturação do modelo, considerando a seletividade das variáveis, indica que a realidade é representada de forma aproximada. Na sua operação, o modelo deve ser de fácil manuseio e compreensão por parte dos usuários, mas sem detrimento de ser representativo das implicações que possa ter e da complexidade necessária para representar com precisão o sistema em estudo;
- Análogos: os modelos são análogos, mostrando a realidade de uma forma simplificada e aproximada, e;
- Reaplicabilidade: o modelo não é apenas uma descrição de um caso, mas sim permite a sua utilização para outros casos da mesma categoria.

Segundo Christofolletti (1999) a maior limitação dos modelos pode ser atribuída a avaliação de sua acuidade ou o ajuste de suas previsões. Outro problema é o estabelecimento de valores aos parâmetros de um modelo e a sua correta relação com o mundo físico. Esta relação é importante, pois é a base para a

transferência de um modelo da área para a qual foi criado/calibrado para outra área, ou seja, o processo de regionalização.

É importante observar que os modelos, em hipótese alguma, podem substituir as observações de campo e os experimentos de laboratório, mas pode colaborar para o entendimento do sistema em estudo. Desta forma, possuem grande potencial para pesquisas na área de Geociências, Geografia Física e na análise ambiental, como instrumento para previsões e também como ferramenta para teoria e compreensão. Mesmo diante de suas limitações, com a contínua aplicação as dificuldades de sua implantação vão sendo gradativamente superadas (CHRISTOFOLETTI, 1999).

2.3.1 Modelos Hidrológicos

De acordo com Tucci (1998) a hidrologia aborda os fenômenos complexos do ciclo hidrológico. Os processos, como a precipitação, evaporação, infiltração e o escoamento em rios, são dependentes de uma série de fatores, o que acaba dificultando análises quantitativas e qualitativas.

Conforme Raudkivi (1979) o principal problema da hidrologia aplicada é a determinação das vazões de um rio, a qual sofre influência, entre outros, das precipitações, temperatura, vento e parâmetros da bacia hidrográfica. Os processos que ligam as chuvas as vazões são em sua essência determinísticos, comandados por leis físicas que são, em parte, conhecidas. Porém as condições de entorno complexas, como da fisiografia, fazem com que soluções baseadas na aplicação direta das leis físicas sejam praticamente impossíveis. Como consequência, os hidrólogos desenvolveram modelos de bacias hidrográficas. Estes modelos são utilizados para uma extensa lista de objetivos, tais como para prever a frequência de eventos, fazer previsões de curto prazo, extensão de séries, previsão do comportamento hidrológico da bacia, previsão dos efeitos de mudanças físicas na bacia e a otimização do planejamento e procedimentos operacionais de projetos de recursos hídricos.

Segundo Tucci (1998), o modelo hidrológico é uma das ferramentas que o homem desenvolveu, com o objetivo de entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. O modelo não

deve ser um objetivo da pesquisa, mas sim uma ferramenta para se atingir o objetivo proposto. Mesmo sendo possível medir as variáveis hidrológicas de interesse do pesquisador, a utilização de modelos permite antecipar-se a determinadas situações - como alteração do uso do solo, urbanização de uma bacia e enchentes - para que medidas preventivas possam ser tomadas,

Para Singh (1995) um modelo hidrológico é uma coleção de modelos que correspondem a componentes diferentes do ciclo hidrológico

Segundo Beven (2001) a maior razão para o uso de modelos hidrológicos deve-se as limitações nas técnicas de medição. Devido a estas limitações, o homem ainda não é capaz de medir tudo o que lhe interessa no sistema hidrológico. Portanto, são necessários meios de extrapolação de dados medidos no tempo e espaço, particularmente para bacias não monitoradas e no futuro para avaliar o impacto de mudanças no ciclo hidrológico. Assim, modelos de diferentes tipos fornecem meios para extrapolação quantitativa ou previsão que podem ser úteis na tomada de decisões.

Neste contexto, conforme Raudkivi (1979), como os dados medidos não são homogêneos, passíveis de erros diversos e limitações, e a sua utilidade para prever um comportamento futuro é limitada, os hidrológicos, então, para melhorar o entendimento da bacia hidrográfica, utilizam a modelagem hidrológica.

A utilização de modelos para análise de uma situação específica de um projeto, pode levar o pesquisador a ficar mais próximo da realidade física, resultando numa solução mais econômica e segura. É importante ressaltar que o julgamento do processo físico é indispensável ao pesquisador em qualquer fase da utilização do modelo (TUCCI, 1998).

As limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos (TUCCI, 1988). Outras limitações surgem devido ao desconhecimento do comportamento espacial de parâmetros e da não linearidade dos processos hidrológicos.

2.3.1.1 Classificação e tipologia dos modelos hidrológicos

De acordo com Rennó e Soares (2000), os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Eles podem ser classificados em estocásticos ou determinísticos, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem e em empíricos ou conceituais, conforme o tipo de relações entre essas variáveis. Também são classificados em discretos ou contínuos, de acordo com a forma de representação dos dados; concentrados ou distribuídos, perante a existência ou não de relações espaciais.

WATTS (1996, citado por Mateus, 2006) classificou os modelos conforme sua estrutura, forma de representação das características espaciais e temporais do sistema hidrológico com base na natureza dos dados de entrada.

Para Silva (2005), os modelos podem ser classificados, entre outras formas, de acordo com a representação do sistema, a distribuição espacial das variáveis e parâmetros, a distribuição temporal das variáveis e parâmetros, o grau de conhecimento e entendimento do sistema e pelo comportamento das variáveis ao longo do tempo. O referido autor saliente que a classificação não é excludente, assim um modelo pode possuir diferentes classificações para cada discretização do fenômeno, variável ou parâmetro. Considerando esta classificação, são mostradas abaixo as características dos tipos de modelos em cada classe.

No que concerne à representação do sistema, os modelos podem ser físicos, análogos ou matemáticos.

Os modelos físicos representam o sistema através de uma reprodução em uma escala reduzida, como modelos reduzidos de obras hidráulicas, ou construídos na mesma escala do objeto de estudo, a exemplo de protótipos de teste. Os modelos análogos valem-se da analogia das equações referentes a diferentes fenômenos, para modelar o sistema mais conveniente, o processo desejado. Modelos matemáticos representam a natureza do sistema através de equações matemáticas (SILVA, 2005, TUCCI, 1998).

No que diz respeito à distribuição espacial das variáveis e parâmetros os modelos podem ser classificados em concentrados ou distribuídos.

Conforme Rennó e Soares (2000), Tucci (1988) e Singh (1995), um modelo concentrado representa a bacia como um todo, sem possibilidade de divisão.

Geralmente são expressos por equações diferenciais ordinárias e não consideram a variabilidade espacial dos processos, dados de entrada, condições do entorno e características geométricas da bacia, com as variáveis de entrada e saída sendo representativas de toda a área da bacia, considerando somente o tempo como variável independente.

Modelos distribuídos têm por característica representar a heterogeneidade dos fatores que influenciam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Assim, estes modelos consideram a variabilidade espacial e temporal dos elementos de uma bacia hidrográfica. No entanto, na prática, a falta de dados de campo ou experimentais (laboratório) pode impedir a formulação deste tipo de modelo. A qualidade do modelo distribuído é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade espacial do sistema, sujeito as condições também variáveis da entrada, como a precipitação. Um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais ao de um modelo concentrado, quanto ao ajuste dos valores simulados aos observados, no entanto, somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema. (RENNÓ e SOARES, 2000; TUCCI, 1988; SINGH, 1995).

Conforme a distribuição temporal das variáveis e parâmetros, os modelos podem ser classificados em estáticos ou permanentes e dinâmicos ou transitórios.

Um modelo é estático ou permanente quando as variações temporais não são consideradas e é dinâmico ou transitório quando existem variações na escala temporal (SILVA, 2005).

Os modelos dinâmicos podem ainda ser classificados em discretos e contínuos. Conforme Tucci (1998) um modelo é discreto quando as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos. Um modelo contínuo considera a continuidade dos fenômenos no tempo.

Perante o grau de conhecimento e entendimento do sistema, os modelos podem ser classificados em fisicamente baseados, empíricos e conceituais.

Os modelos de base física tentam explicar com rigor os processos físicos do sistema, baseados em funções que consideram as teorias ou leis físicas fundamentais (SILVA, 2005; MATEUS 2006).

Modelos empíricos, também conhecidos como caixa-preta, são aqueles onde se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções sem relação alguma com os processos físicos (TUCCI, 1998).

Para Mulligan (1967), os modelos conceituais representam aproximadamente a física dos processos hidrológicos. Apesar desta limitação, de acordo com Rennó e Soares (2000), estes modelos geralmente são mais complexos que os empíricos, pois procuram descrever todos os processos que envolvem o fenômeno estudado, mesmo usando muitas vezes relações empíricas entre variáveis. Mateus (2006) cita que estes modelos representam de forma limitada os processos físicos que ocorrem na escala da bacia, fundamentado, sobretudo na compreensão do funcionamento do sistema.

Diante do comportamento das variáveis ao longo do tempo, os modelos podem ser determinísticos ou estocásticos.

Os modelos determinísticos não consideram a probabilidade na sua formulação, gerando sempre uma mesma saída para um mesmo valor de entrada (RENNÓ e SOAREAS, 2000; TUCCI, 1998).

Um modelo é estocástico se a saída do modelo é uma variável aleatória e, portanto, possui uma distribuição probabilística, enfatizando a dependência do tempo e do espaço das variáveis hidrológicas no modelo (RAUDKIVI, 1979).

2.3.2 Modelo SWAT

Neste trabalho, será utilizado o *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL* – SWAT, um modelo matemático de domínio público, desenvolvido a partir de 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*.

A escolha do modelo deve-se aos resultados obtidos anteriormente por Souza (2008) e o entendimento de que este modelo pode ser explorado para pesquisas como a proposta neste trabalho.

Conforme NEITSCH et al. (2002), o SWAT em seu desenvolvimento foi incorporando várias características contidas em modelos anteriores. O modelo tem por objetivo prever o efeito das ações de uso e manejo do solo sobre os recursos hídricos, produção de sedimentos, produção de nutrientes e pesticidas, sendo aplicado em pequenas e grandes bacias. A modelagem pode ser efetuada em intervalos de tempo sub-diários, diários, mensais e anuais. O SWAT é um modelo chuva-vazão contínuo, não desenvolvido para simulações de eventos.

Para alcançar os objetivos propostos pelo modelo, de acordo com NEITSCH et al. (2002), o SWAT tem as seguintes características:

- É fisicamente baseado, ao invés de utilizar equações de regressão para descrever as relações entre as variáveis de entrada e saída, o modelo requer informações específicas sobre clima, propriedades dos solos, topografia, vegetação, e práticas de manejo na bacia. Os processos físicos associados com a dinâmica da água e dos sedimentos, crescimento da vegetação, ciclo de nutrientes, etc., são modelados a partir da utilização dos dados de entrada. Pode-se questionar esta classificação, pois modelos fisicamente baseado não necessitam de calibragem. Portanto, entende-se aqui o SWAT como um modelo que também tem características de conceitual;
- Utiliza dados de entrada prontamente disponíveis em agências governamentais. Neste quesito, no Brasil estes dados não estão acessíveis de forma direta;
- É computacionalmente eficiente. As simulações de grandes bacias ou a variedade de estratégias de manejo podem ser realizadas sem muito custo de tempo e recursos, e;
- Permite o estudo de impactos ambientais que são visíveis somente através de uma avaliação realizada em um longo período de tempo.

De acordo com Gassman *et al.* (2007), o modelo SWAT vem sendo utilizado de forma corrente após o seu desenvolvimento. Muitas aplicações foram realizadas por agências governamentais, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, para avaliar mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos e avaliação da capacidade do modelo para futuras aplicações.

No Brasil, Machado (2002) aplicou o modelo para simular o escoamento e a produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do rio Piracicaba/SP. Baldissera (2005) aplicou o modelo para simular as vazões líquidas mensais na Bacia do Rio Cuiabá. Na linha de pesquisa deste trabalho, Souza (2008) utilizou o modelo como ferramenta para a gestão de recursos hídricos, com aplicação na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. Santos *et al.* (2010) avaliaram o impacto de diferentes cenários de usos do solo na vazão e na produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Apucarantina. Em uma abordagem geográfica, Schultz *et al.* (2010) propuseram uma aproximação entre a simulação hidrológica realizada pelo modelo e a teoria do geossistema. Algumas instituições públicas e privadas também fazem uso do modelo para

predizer problemas relacionados à erosão e assoreamento, principalmente empresas de geração de energia elétrica, conforme Santos *et al.* (2005).

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO SWAT

A figura 4 representa sinteticamente os processos do modelo SWAT relacionados à geração de vazões.

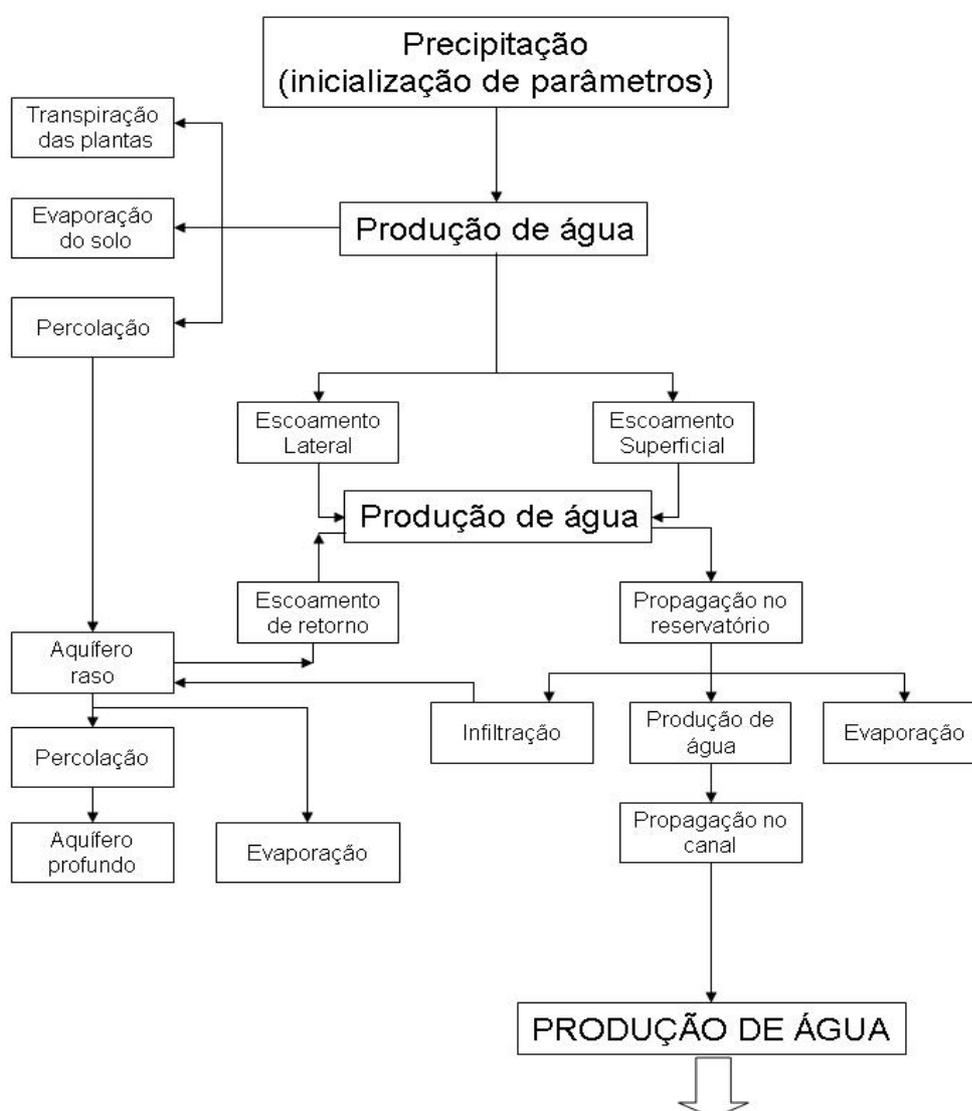


Figura 4 – Fluxograma do modelo SWAT - Fonte: modificado de KING *et al.*, 1996.

A produção de água no Swat é representada pela equação do balanço hídrico (NEITSCH *et al.*, 2002):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (4)$$

Onde SW_t é a umidade final do solo (mm), SW_0 é a umidade inicial do solo em mm, t é o tempo em dias, R_{day} é a precipitação diária em mm, Q_{surf} é o escoamento superficial em mm, E_a é a evapotranspiração diária em mm, w_{seep} é a percolação em mm, Q_{gw} é o escoamento de retorno em mm, e i é o intervalo de tempo, em dias.

A seguir, são apresentadas as equações principais que o modelo utiliza no que concerne à hidrologia. As informações são oriundas de Neitsch *et al.* (2002) e Santos *et al.* (2005).

3.1.1 Escoamento Superficial

O modelo utiliza, nas simulações diárias, o método da curva número do Soil Conservation Service – SCS (USDA-SCS, 1972) para simular o escoamento superficial. A equação é um produto de mais de vinte anos de pesquisa envolvendo relações de chuva-vazão em pequenas bacias rurais dos Estados Unidos e que entrou em uso na década de 1950. O método permite estimar o volume de escoamento superficial conforme o uso da terra e o tipo de solo, sendo:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - Ia)^2}{(R_{day} - Ia + S)} \quad (5)$$

Onde Q_{surf} é o escoamento superficial diário em mm, R_{day} é a precipitação diária em mm, Ia é a abstração inicial, em mm, que inclui o armazenamento de superfície, interceptação e infiltração antes do escoamento e S é o parâmetro de retenção, em mm, o qual tem variação espacial devido às mudanças nos solos, uso do solo, manejo e declividade e variação temporal devido às mudanças na umidade do solo. O parâmetro de retenção é definido por:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

Onde CN é a curva número diária. A abstração inicial é comumente aproximada pra $0.2S$, levando a equação 2 à seguinte forma:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (7)$$

O escoamento superficial somente ocorrerá quando $R_{day} > Ia$

O SCS definiu três condições de umidade antecedente para a curva número.

- CN1 – condição um de umidade, na qual os solos estão secos;
- CN2 – condição dois de umidade, onde se têm umidade média, na qual os solos apresentam umidade da capacidade de campo.
- CN3 – condição três de umidade, situação onde os solos estão saturados.

O modelo assume a condição de umidade dois para o início da simulação.

3.1.2 Taxa de Escoamento de Pico

A taxa de escoamento de pico é a taxa de escoamento superficial máximo que pode ocorrer em um evento de precipitação e é um indicador do poder erosivo da chuva. O SWAT calcula a taxa com o método racional modificado.

O método racional pressupõe que se uma chuva de intensidade i começa no tempo $t=0$ e continua indefinidamente, a taxa de escoamento irá aumentar até o tempo de concentração, $t = t_{conc}$, levando então a contribuição de toda a área da sub-bacia para a vazão. A fórmula racional é dada por:

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad (8)$$

Onde q_{peak} é a taxa de escoamento superficial (m^3/s), C é o coeficiente de escoamento, i é a intensidade da chuva (mm/h), $Área$ é a área da sub-bacia (km^2) e 3.6 é o fator de conversão de unidade.

O método racional modificado é calculado por:

$$q_{peak} = \frac{a_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (9)$$

Onde a_{tc} é a fração do escoamento diário que ocorre durante o tempo de concentração, Q_{surf} é o escoamento superficial (mm) e t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (h).

3.1.3 Tempo de Concentração

O tempo de concentração é a quantidade de tempo desde o início da chuva até o momento no qual toda a área da bacia está contribuindo para a vazão e está diretamente relacionado com o tamanho da bacia. O tempo de concentração é calculado por:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (10)$$

Onde t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (em horas), t_{ov} é o tempo de concentração do escoamento superficial (em horas) e t_{ch} é o tempo de concentração do escoamento do canal até a saída da bacia (em horas).

O tempo de concentração do escoamento superficial é dado por:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 \cdot v_{ov}} \quad (11)$$

Onde L_{slp} é o comprimento da rampa de declividade da bacia (m); v_{ov} é a velocidade do escoamento superficial (m/s) e 3600 é o fator de conversão de unidade.

A velocidade do escoamento superficial é estimada pela equação de Manning, considerando uma faixa de um metro de largura na superfície inclinada, conforme a equação 9:

$$v_{ov} = \frac{q_{ov}^{0,4} \cdot slp^{0,3}}{n^{0,6}} \quad (12)$$

Onde q_{ov} é a taxa média de escoamento superficial (m^3/s), slp é a declividade média na sub-bacia (m/m) e n é o coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia. Então, assume-se que a taxa média de escoamento é 6,35 mm/h e convertem-se as unidades, conforme mostra a seguinte equação:

$$v_{ov} = \frac{0,005 \cdot L_{slp}^{0,4} \cdot slp^{0,3}}{n^{0,6}} \quad (13)$$

Substituindo a equação 10 na equação 8, têm-se:

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

O tempo de concentração no canal é dado pela seguinte equação:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3,6.v_c} \quad (15)$$

Onde L_c é o comprimento médio do canal para a sub-bacia (km), v_c é a velocidade média no canal (m/s) e 3,6 é o fator de conversão de unidade.

O comprimento médio do canal é estimado pela equação:

$$L_c = \sqrt{L.L_{cen}} \quad (16)$$

Onde L é o comprimento do canal do ponto mais distante até o exutório da sub-bacia (km) e L_{cen} é a distancia do canal para o centróide da sub-bacia (km). Assumindo que $L_{cen}=0,5.L$, o comprimento médio do canal é:

$$L_c = 0,71.L \quad (17)$$

A velocidade média é estimada pela equação de Manning assumindo um canal trapezoidal, conforme a seguinte equação:

$$v_c = \frac{0,489.q_{ch}^{0,25}.slp_{ch}^{0,375}}{n^{0,75}} \quad (18)$$

Onde v_c é a velocidade média no canal (m/s), q_{ch} é a taxa média de escoamento do canal (m^3/s), slp_{ch} é a declividade do canal (m/m) e n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal. Definindo a taxa de escoamento médio do canal na unidade de mm/h, é utilizada a seguinte equação:

$$q_{ch} = \frac{q_{ch}^*.Area}{3,6} \quad (19)$$

Onde q_{ch}^* é a taxa média de escoamento no canal (mm/h), $Área$ é a área da sub-bacia (km^2) e 3,6 é o fator de conversão de unidade. A taxa média de escoamento no canal é relacionada com a taxa de vazão para unidade de área fonte de vazão (unidade de área fonte de vazão = 1ha), conforme segue:

$$q_{ch}^* = q_0^*(100.Area)^{-0,5} \quad (20)$$

Onde q_0^* é a unidade de área fonte de vazão (mm/h), $Área$ é a área da sub-bacia e 100 é o fator de conversão de unidade. Assumindo que a unidade de área fonte de vazão é 6,35 mm/h e substituindo as equações 16 e 17 na equação 15, têm-se:

$$v_c = \frac{0,317.Area^{0,125}.slp_{ch}^{0,375}}{n^{0,75}} \quad (21)$$

Substituindo as equações 14 e 18 na equação 12, têm-se:

$$t_{ch} = \frac{0,62.L.n^{0,75}}{Area^{0,125}.slp_{ch}^{0,375}} \quad (22)$$

Onde t_{ch} é o tempo de concentração da vazão no canal (h), L é o comprimento do canal do ponto mais distante até o exutório da sub-bacia (km), n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal, $Area$ é a área da sub-bacia (km²) e slp_{ch} é a declividade do canal (m/m).

3.1.4 Retardo do Escoamento Superficial

Em grandes bacias, com um tempo de concentração maior que um dia, somente uma porção do escoamento superficial irá chegar ao canal principal no dia em que é gerado. O SWAT tem um recurso de armazenamento para o volume do escoamento superficial que não chega ao canal principal no mesmo dia em que é gerado.

A quantidade de escoamento superficial liberado para o canal principal é calculado pela equação:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (23)$$

Onde Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal em um dia qualquer (mm), Q'_{surf} é a quantidade de escoamento superficial gerada em uma bacia em um dia qualquer (mm), $Q_{stor,i-1}$ é o escoamento superficial armazenado ou atrasado do dia anterior (mm), $surlag$ é o atraso do escoamento superficial, e t_{conc} é o tempo de concentração para a bacia (h).

3.1.5 Escoamento Lateral

O escoamento lateral pode ser significativo em áreas com solos de alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e com camadas impermeáveis ou

semipermeáveis. O escoamento lateral de saída (mm/dia) é representado pela seguinte equação:

$$Q_{lat} = 24.H_0.v_{lat} \quad (24)$$

Onde Q_{lat} é o escoamento lateral de saída, H_0 é a espessura da camada saturada do comprimento de rampa (mm/mm) e v_{lat} é a velocidade do escoamento de saída em mm/h.

A projeção da espessura da camada saturada do comprimento de rampa é dada por:

$$H_0 = \frac{2.SW_{ly,excess}}{1000.\phi_d.L_{hill}} \quad (25)$$

Onde, $SW_{ly,excess}$ é o volume drenável na zona saturada (mm), ϕ_d é a porosidade drenável do solo e L_{hill} é o comprimento de rampa em m.

A velocidade de saída é calculada por:

$$v_{lat} = K_{sat} \cdot \sin(a_{hill}) \quad (26)$$

Onde V_{lat} é a velocidade de saída, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (m/h), a_{hill} é o ângulo de inclinação da encosta e $\sin(a_{hill})$ é a declividade da encosta, slp , em (m/m).

Então ao substituir as equações 11 e 10 na equação 9, tem-se:

$$Q_{lat} = 0,024 \frac{2SW_{ly,excess} K_{sat} slp}{\phi_d L_{hill}} \quad (27)$$

3.1.6 Armazenamento no Dossel

O armazenamento no dossel afeta significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração.

No SWAT, a quantidade máxima de água que pode ficar retida nas copas das plantas pode variar de dia para dia, em função do índice de área foliar, conforme a seguinte equação:

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (28)$$

Onde can_{day} é a quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas em um dia qualquer (mm), can_{mx} é a quantidade máxima de água que pode ser retida nas copas quando o dossel está totalmente desenvolvido (mm), LAI é o índice de área foliar para um dia qualquer e LAI_{mx} é o índice máximo de área foliar para a planta.

3.1.7 Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração envolve todos os processos responsáveis pela transformação da água da superfície terrestre em vapor. Inclui a evaporação do dossel da vegetação, transpiração, sublimação e evaporação a partir do solo, ou seja, é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas definidas em função da evapotranspiração potencial.

A evapotranspiração é o primeiro processo pelo qual a água é retirada da bacia. Aproximadamente 62% da precipitação incidente nos continentes é evapotranspirada.

O SWAT disponibiliza três métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Na simulação, utilizou-se o método de Penman-Monteith, o qual requer séries de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento

3.1.8 Água No Solo

A água presente no solo pode variar de zero, quando o solo é secado em estufa, até um valor máximo, no qual o solo está saturado. Para interações entre planta e solo, dois estágios intermediários são conhecidos: a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de campo é a quantidade de água encontrada em um solo quando o mesmo, em condição saturada, tenha sido drenado por aproximadamente dois dias. O ponto de murcha permanente é a quantidade de água encontrada no solo, na qual as plantas murcham e não

conseguem recuperar-se, devido à dificuldade de extrair a água, mesmo em um ambiente úmido.

A capacidade de campo e o ponto de murcha permanente estão relacionados com a tensão a qual a água é submetida no solo. A capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo na tensão de 0,033 MPa e o ponto de murcha permanente é a quantidade de água retida no solo com uma tensão de 1,5 MPa. A quantidade de água existente entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é considerada como a água disponível para a extração das plantas, também chamada de capacidade de água disponível, conforme a seguinte equação:

$$AWC = FC - WP \quad (29)$$

Onde AWC é a quantidade de água disponível para as plantas, FC é a quantidade de água em um solo na capacidade de campo e WP é a quantidade de água presente no ponto de murcha permanente.

3.1.8.1 Percolação

A percolação é calculada para cada camada do perfil de solo. A água que percola é a água que excede a capacidade de campo de cada camada. O volume de água disponível para a percolação na camada de solo é calculado pelas seguintes equações:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad \text{se } SW_{ly} > FC_{ly} \quad (30)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad \text{se } SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (31)$$

Onde $SW_{ly,excess}$ é o volume de água drenada na camada de solo em um dia qualquer (mm), SW_{ly} é a conteúdo de água da camada de solo em um dia qualquer (mm) e FC_{ly} é a quantidade de água em uma camada de solo na capacidade de campo.

A quantidade de água que percola da camada superior para a inferior é calculada através da seguinte equação:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (32)$$

Onde $w_{perc,ly}$ é a quantidade de água percolada em um dia (mm), Δt é o intervalo de tempo (h) e TT_{perc} é o tempo de propagação para a percolação (h)

O tempo de propagação é específico para cada camada de solo e é calculado pela seguinte equação:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (33)$$

Onde TT_{perc} é o tempo para a percolação (h), SAT_{ly} é a quantidade de água na camada de solo em condições de saturação (mm), FC_{ly} é a água presente na camada de solo em condição de capacidade de campo (mm) e K_{sat} é a condutividade hidráulica para a camada (mm/h).

3.1.8.2 Água Subterrânea

O SWAT considera dois aquíferos para cada bacia. O aquífero raso é o aquífero não confinado que contribui para a vazão no canal principal ou dentro da bacia. O aquífero profundo é o aquífero confinado e o modelo assume que a água que entra neste aquífero irá contribuir para a vazão fora da bacia (ARNOLD et al, 1993, apud NEITSCH et al, 2002).

O balanço hídrico do aquífero raso é definido por:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad (34)$$

Onde $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i (mm), $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia $i-1$ (mm), w_{rchrg} é a recarga no aquífero no dia i (mm), Q_{gw} é o escoamento subterrâneo ou de base, no canal principal no dia i (mm), w_{revap} é o escoamento que retorna ao perfil do solo

(mm), w_{deep} é a percolação da água do aquífero raso para o profundo (mm) e $w_{pump,sh}$ é a água retirada do aquífero raso (mm)

3.1.8.3 Recarga do Aquífero

A água que percola do solo, antes de chegar ao aquífero raso, passa pela zona vadosa. O tempo que a água leva para percolar até o aquífero raso depende da profundidade do nível freático e das propriedades hidráulicas da formação geológica.

A recarga do aquífero através da percolação não é instantânea, podendo ocorrer em um ou mais dias. A recarga em um dia qualquer é calculada pela equação proposta por VENETIS (1969) e utilizada por SANGREY et al (1984), a qual segue:

$$w_{rchrg,i} = \left(1 - e^{\lfloor -1/\delta_{gw} \rfloor}\right) w_{seep} + e^{\lfloor -1\delta_{gw} \rfloor} \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (35)$$

Onde $w_{rchrg,i}$ é a recarga do aquífero no dia i , em mm, δ_{gw} é o tempo de resposta do aquífero (dias), w_{seep} é a quantidade de água que drena do solo (mm) e $w_{rchrg,i-1}$ é a recarga do aquífero no dia $i-1$.

A água que drena do solo no dia i é calculada pela equação:

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crk,btm} \quad (36)$$

Onde $w_{perc,ly=n}$ é a água que percola da camada mais baixa, n , do perfil de solo, em (mm) e $w_{crk,btm}$ é a quantidade de água após a camada mais baixa do perfil de solo devido ao desvio de fluxo, em mm.

3.1.8.4 Escoamento de Base

O aquífero raso contribui para o escoamento de base. O escoamento de base somente irá ocorrer se a água armazenada no aquífero exceder o limite

proposto pelo usuário do modelo. O escoamento de base é calculado pela seguinte equação:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (37)$$

Onde Q_{gw} é o escoamento de retorno, em mm, K_{sat} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia), L_{gw} é o comprimento do dreno (m) e h_{wtbl} é a cota piezométrica (m).

3.1.8.5 Capilaridade

A água pode mover-se do aquífero raso para a zona não saturada logo acima, por força capilar. O SWAT modela o retorno da água do aquífero raso para as camadas não saturadas do solo como uma função da demanda de água para a evapotranspiração, ou seja, é a água que, após retornar do aquífero para o perfil de solo, é transferida para a atmosfera pela evaporação do solo e raízes das plantas. Para evitar confusão entre os termos de evaporação do solo e transpiração, o processo é chamado no modelo como “Revap”. Igualmente ao escoamento de retorno, o “Revap” somente irá ocorrer se a quantidade de água existente no aquífero raso exceder um limite especificado pelo usuário do modelo. A quantidade máxima de água que pode ser removida do aquífero por “Revap” em um dia qualquer é calculada pela seguinte equação:

$$w_{revap, mx} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (38)$$

Onde $w_{revap, mx}$ é a quantidade máxima de água que é retirada do aquífero (mm), β_{rev} é o coeficiente de Revap e E_0 é a evapotranspiração potencial (mm).

3.1.8.6 Percolação para o Aquífero Profundo

Uma fração da recarga diária pode percolar até o aquífero profundo. A percolação para o aquífero profundo somente irá ocorrer se a água armazenada no aquífero raso exceder um valor definido pelo usuário do modelo. A quantidade

máxima de água que pode percolar do aquífero raso para o aquífero profundo em um dia qualquer, é dada pela seguinte equação:

$$w_{deep, mx} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg} \quad (39)$$

Onde $w_{deep, mx}$ é a quantidade máxima de água que irá percolar até o aquífero profundo (mm), β_{deep} é o coeficiente de percolação do aquífero e w_{rchrg} é água que irá entrar no aquífero (mm).

O balanço hídrico do aquífero profundo é dado pela seguinte equação:

$$aq_{dp, i} = aq_{dp, i-1} + w_{deep} - w_{pump, dp} \quad (40)$$

Onde $aq_{dp, i}$ é a água armazenada no aquífero profundo no dia i (mm), $aq_{dp, i-1}$ é a água armazenada no aquífero profundo no dia $i-1$ (mm), w_{deep} é a quantidade de água que percolou do aquífero raso para o profundo (mm) e $w_{pump, dp}$ é a água retirada do aquífero profundo.

A água que entra no aquífero profundo não entra em outros processos modelados pelo SWAT, sendo então considerada como perdida na bacia hidrográfica em análise.

3. 1.9. Propagação no reservatório

Quando na presença de reservatórios na bacia, a propagação no reservatório envolve a dinâmica da água pela rede de canais da bacia, onde além de perdas, podem ocorrer processos de armazenamento e propagação. A propagação no reservatório é dada por

$$VM = VM_0 + QI - QO - EV - SEP \quad (41)$$

Onde VM é o volume de água armazenada no fim do dia (m^3), VM_0 é o volume de água armazenada no início do dia (m^3), QI é o escoamento de entrada (m^3), QO é o escoamento de saída (m^3), EV é a evaporação (m^3) e SEP é a infiltração (m^3).

3. 1.10. Propagação no canal

Para a simulação da propagação no canal, o modelo utiliza informações sobre o comprimento, declividade, profundidade, declividade lateral e coeficiente de manning do canal, além da declividade e coeficiente de manning da margem de inundação. A taxa de escoamento e a velocidade média do fluxo são calculadas usando a equação de Manning.

Desta forma, para um segmento de canal com ponto de entrada e saída próximos, o armazenamento é baseado na equação da continuidade, a saber:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (42)$$

onde V_{in} é o volume de entrada (m^3), V_{out} é o volume de saída (m^3), e ΔV_{stored} é a variação do volume de água armazenada (m^3).

A taxa de variação do volume de água de entrada durante um intervalo de tempo é dada por:

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad (43)$$

onde $V_{stored,1}$ é o volume armazenado no início do processo (m^3), $V_{stored,2}$ é o volume armazenado no fim do processo (m^3), $q_{out,1}$ é a vazão de saída no início do processo (m^3/s), $q_{out,2}$ é a vazão de saída no final do processo (m^3/s), e Δt é o intervalo de tempo entre o início do processo e o final do processo.

O tempo de propagação no canal é uma relação entre o volume de água do canal e o escoamento, dada pela equação 29:

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad (44)$$

onde TT é o tempo de propagação (s), V_{stored} é o volume armazenado (m^3), e q_{tout} é a taxa de escoamento em m^3/s .

A relação entre o tempo de propagação e o coeficiente de armazenamento é dada por:

$$q_{out,2} = \left(\frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \right) q_{in,ave} + \left(1 - \frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \right) q_{out,1} \quad (45)$$

A equação 41 é semelhante à equação do método do coeficiente:

$$q_{out,2} = SCq_{in,ave} + (1 - SC)q_{out,1} \quad (46)$$

onde SC é o coeficiente de armazenamento.

O coeficiente de armazenamento (SC) é estimado usando as seguintes equações:

$$SC = \frac{2\Delta t}{2TT + \Delta t} \quad (47)$$

O escoamento de saída do trecho considerado é determinado por:

$$q_{out,2} = SC \left(q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} \right) \quad (48)$$

3.2 PARÂMETROS CALIBRÁVEIS NO MODELO SWAT

Para simular as vazões de uma bacia hidrográfica, o modelo SWAT permite a calibração de 27 parâmetros. A tabela 3 mostra os parâmetros calibráveis do modelo. Em destaque, os parâmetros utilizados para a simulação realizada neste trabalho. As discussões sobre estes parâmetros, apresentadas após a tabela, foram realizadas com base em Neitsch *et al.* (2002) e Cibin *et al.* (2010).

TABELA 3 – PARÂMETROS CALIBRÁVEIS NO MODELO SWAT

Nº	PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	UNIDADE
1	Alpha_Bf*	Constante de recessão do escoamento de base	dias
2	Biomix	Eficiência da atividade biológica	adimensional
3	Canmx*	Intercepção máxima da vegetação	mm

Continua

Continuação

Nº	PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	UNIDADE
4	Ch_Cov	Fator de cobertura do canal	adimensional
5	Ch_K2	Condutividade hidráulica na base do canal principal	mm/h
6	Ch_N2	Coeficiente de rugosidade do canal principal	m ^{-1/3} /s
7	Cn2*	Curva Número	adimensional
8	Epc0	Fator de compensação para uso de água pelas plantas	adimensional
9	Esco*	Coeficiente de compensação da evaporação no solo	adimensional
10	Gw_Delay*	Tempo de recarga do aquífero	dias
11	Gw_Revap*	Coeficiente 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	Smfmn	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_Al0	Albedo do solo	adimensional
22	Sol_Awc*	Capacidade de 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

Continua

Conclusão

Nº	PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	UNIDADE
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

FONTE: SCHULTZ *ET. AL*, 2010.

NOTA: * Parâmetros calibrados na simulação deste trabalho.

O parâmetro Alpha Bf tem relação direta com as recessões do hidrograma. Portanto, este parâmetro, em estudos de vazão mínima tem substancial importância.

Durante uma chuva qualquer, a interceptação do dossel reduz a energia erosiva das gotas e armazena uma parcela da precipitação no dossel. Portanto, a interceptação máxima da vegetação, dada pelo parâmetro Canmx, afeta significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração.

A curva número (CN2) é uma função da permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de umidade no solo. Este parâmetro está relacionado com a infiltração e o escoamento superficial na bacia.

Quando existe uma demanda de evaporação de água no solo, o SWAT particiona a demanda entre as camadas de solo. A quantidade de demanda evaporativa de uma camada de solo é determinada tomando a diferença entre as demandas evaporativas calculados nos limites superior e inferior da camada de solo. Para permitir ao usuário controlar a distribuição desta demanda em diversas profundidades, o modelo utiliza o coeficiente de compensação da evaporação no solo (ESCO). Este parâmetro está relacionado com o processo de evapotranspiração na bacia.

O parâmetro Gw Delay, responsável por controlar o tempo de recarga do aquífero, relaciona-se com o escoamento de base. Influenciado a dinâmica da água subterrânea, este parâmetro tem substancial sensibilidade na calibração de vazões mínimas.

O Gw Revap, ao controlar o fluxo de água da zona saturada (aquífero) para a zona não saturada do solo, influencia a dinâmica da água subterrânea na bacia e por conseqüência, também tem estreita relação com as vazões mínimas.

O comprimento médio da encosta, de cada HRU, é controlado pelo parâmetro S_{subbsn} . Mesmo o comprimento médio da encosta sendo um elemento físico da bacia, em virtude de limitações, sejam de ordem de escala do mapeamento ou da própria modelagem, este elemento pode ser alterado no modelo. O S_{subbsn} tem influência na taxa de pico do escoamento, escoamento superficial e também na produção de sedimentos.

A quantidade de água disponível nas camadas de solo para a extração das plantas é estimada pela diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha, controlada pelo parâmetro Sol_{Awc} . Este parâmetro tem relação com os processos de percolação, evaporação e dinâmica da água subterrânea na bacia.

A condutividade hidráulica saturada é controlada pelo parâmetro Sol_K . A condutividade hidráulica é uma característica física do solo, passível de medição em campo, que traz informações sobre o movimento da água no solo. Ocorre que os solos têm uma distribuição espacial irregular que os mapeamentos, em virtude da escala, não conseguem representar. Devido a este problema, não se obtêm o correto valor da condutividade hidráulica para toda a bacia, mas sim para pequenas porções. Desta forma, a estimativa/correção desta propriedade através de parâmetros de modelos hidrológicos é comum. A condutividade hidráulica influencia os processos de percolação, fluxo lateral e dinâmica da água subterrânea.

A declividade média de cada sub-bacia é representada pelo parâmetro $Slope$. Este parâmetro tem influencia sobre a taxa de escoamento de pico, fluxo lateral, produção de sedimentos e escoamento superficial.

3.3 DIVISÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO

A bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro foi dividida em 47 sub-bacias. Em um primeiro momento, esta divisão foi realizada tentando manter as sub-bacias com áreas aproximadamente equivalentes, objetivando a mesma resolução espacial em termos de unidade de simulação. Posteriormente, para realização de medições em campo, em sub-bacias selecionadas, o exutório destas foi reposicionado à montante para pontos de fácil acesso. A escolha das bacias foi realizada considerando as condições de acesso e valores da q_{95} simulada antes das medições. A figura 5 mostra a divisão da bacia, a drenagem representativa do canal

principal de cada sub-bacia e também os dez locais onde foram realizadas as medições, correspondentes as sub-bacias 01, 03, 11, 21, 28, 33, 39, 44, 45 e 46. A sub-bacia 43 corresponde ao exutório da bacia do Altíssimo Rio Negro

A tabela 4 mostra a área de cada sub-bacia e a sua área de contribuição, ou seja, a sua própria área somada às áreas de drenagem das sub-bacias a montante (sub-bacias contribuidoras).

Após a divisão em sub-bacias, o modelo realiza uma outra divisão, gerando Hrus (unidades de resposta hidrológica). Estas unidades correspondem a combinação única entre tipo de solo, uso do solo e declividade, gerando uma resposta hidrológica específica, semelhante a unidades de paisagem. A Hru é a menor unidade considerada pelo modelo para a simulação. Durante o processo de criação das Hrus, o modelo permite realizar uma generalização, desconsiderando pequenas áreas das sub-bacias recobertas por determinado tipo de solo, uso do solo ou declividade. Neste trabalho, foram desconsiderados os usos do solo com porcentagem de cobertura inferior a 20% da área da sub-bacia e solos e declividades com porcentagem de ocorrência inferior a 10%. Conforme Christofolletti (1999) e Chorley e Haggett (1975), esta discretização remete a uma das características dos modelos, a seletividade, onde informações menos importantes podem ser eliminadas. Neste estudo, o número de Hrus é de 436.

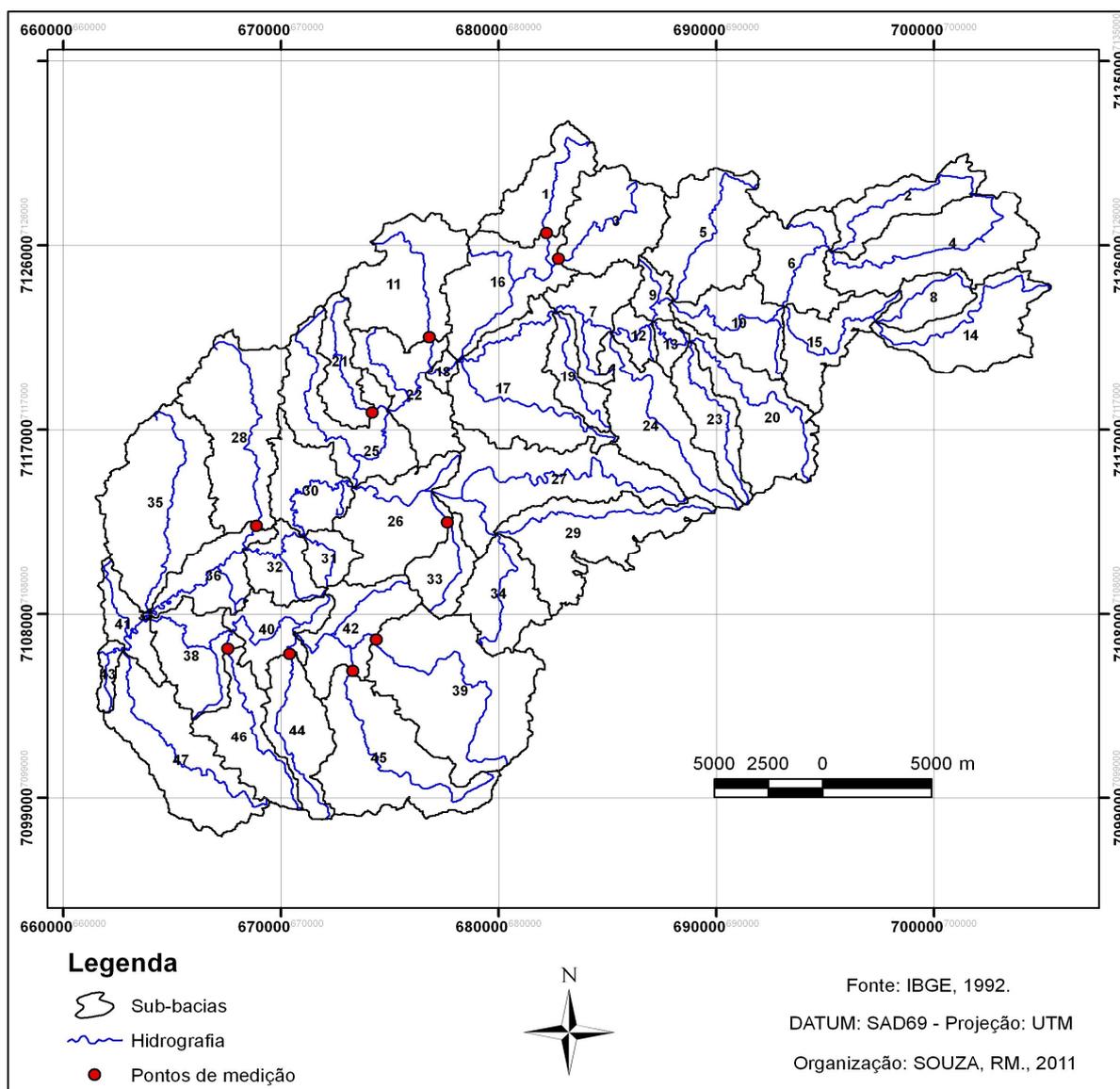


Figura 5 – Divisão da bacia, canais principais e pontos medidos.

TABELA 4 – ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DE CADA SUB-BACIA.

Bacia	Área (km ²)	Área de drenagem (km ²)	Bacias contribuidoras
1*	15,26	15,26	1
2	13,77	13,77	2
3*	19,09	19,09	3
4	28,77	28,77	4
5	24,00	24,00	5
6	16,38	58,92	6 (2,4)
7	12,15	218,79	7 (12,24)
8	8,17	8,17	8
9	3,97	143,54	9 (5,10)

Continua

Continuação

Bacia	Área (km²)	Área de drenagem (km²)	Bacias contribuidoras
10*	14,55	115,57	10 (6,15)
11	24,67	24,67	11
12	4,14	183,60	12 (9,13)
13	2,90	35,92	13 (20,23)
14	19,59	19,59	14
15	14,34	42,10	15 (8,14)
16	21,24	55,59	16 (1,3)
10*	14,55	115,57	10 (6,15)
11	24,67	24,67	11
12	4,14	183,60	12 (9,13)
13	2,90	35,92	13 (20,23)
14	19,59	19,59	14
15	14,34	42,10	15 (8,14)
16	21,24	55,59	16 (1,3)
17	29,26	256,05	17 (7,19)
18	1,74	313,38	18 (16,17)
19	8,00	8,00	19
20	21,06	21,06	20
21*	9,59	9,59	21
22	17,44	355,49	22 (11,18)
23	11,96	11,96	23
24	23,04	23,04	24
25	22,68	387,76	25 (21,22)
26	22,07	103,39	26 (27,33)
27	31,60	72,54	27 (29,34)
28*	31,28	31,28	28
29	26,07	26,07	29
30	13,90	505,05	30 (25,26)
31	5,19	5,19	31
32	9,26	519,50	32 (30,31)
33*	8,78	8,78	33
34	14,89	14,89	34
35	35,92	35,92	35
36	12,72	563,50	36 (28,32)
37	0,12	599,54	37 (35,36)
38	15,25	150,47	38 (40,46)
39*	43,35	43,35	39

Continua

Conclusão

Bacia	Área (km ²)	Área de drenagem (km ²)	Bacias contribuidoras
40	12,06	118,90	40 (42,44)
41	7,56	757,57	41 (37,38)
42	15,89	91,23	42 (39,45)
43	2,63	788,00	43 (41,47)
44*	15,58	15,58	44
45*	31,99	31,99	45
46*	16,32	16,32	46
47	27,80	27,80	47

FONTE: SOUZA, 2011.

NOTA: * Sub-bacias com medições em campo

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O clima na área de estudo é classificado como subtropical úmido. Segundo Mendonça e Oliveira (2007) uma das características que distinguem os climas da região sul-brasileira do restante do país é uma maior regularidade na distribuição anual das chuvas – entre 1.250 e 2.000mm – juntamente com as baixas temperaturas de inverno. Essas características resultam da associação entre a posição geográfica, relevo e atuação dos sistemas atmosféricos intertropicais e polares.

A geologia da bacia em estudo é mostrada na figura 6. A elaboração do mapa foi baseada na Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo SG-22 - Curitiba, disponibilizada pelo CPRM (Serviço Geológico do Brasil). As rochas de origem ígnea são encontradas no extremo leste, região que corresponde a Serra do Mar, ao norte e ao sul. As rochas metamórficas são encontradas mais ao centro-leste da bacia e as rochas sedimentares estão localizadas ao longo da planície aluvial do Rio Negro e em uma pequena parte no centro sul da bacia.

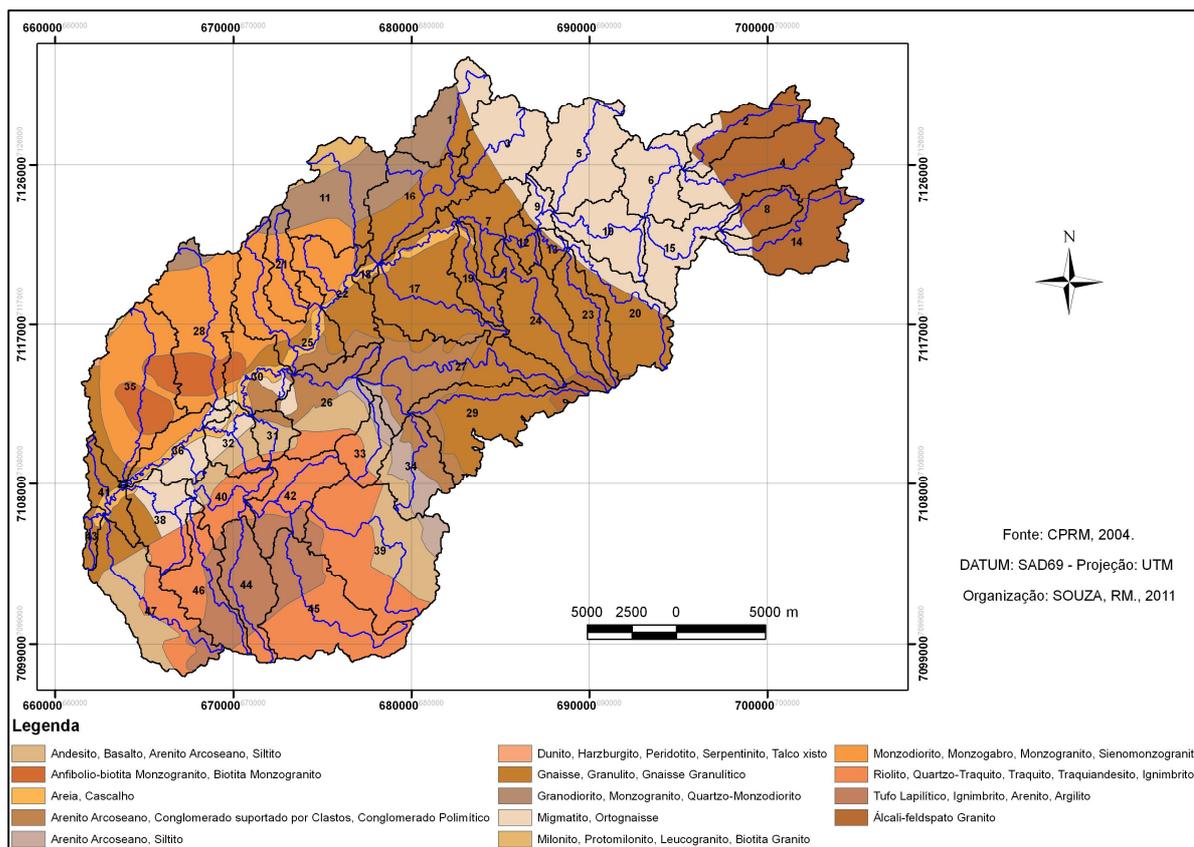


Figura 6 – Geologia da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro

A figura 7 mostra a declividade da área de estudo. O intervalo das classes foi definido de acordo com os valores sugeridos pela EMBRAPA (1979), a saber:

- 0 a 3% - relevo plano;
- 3 a 8% - relevo suave ondulado;
- 8 a 20% - relevo ondulado;
- 20 a 45% - relevo fortemente ondulado, e;
- Acima de 45% - relevo montanhoso.

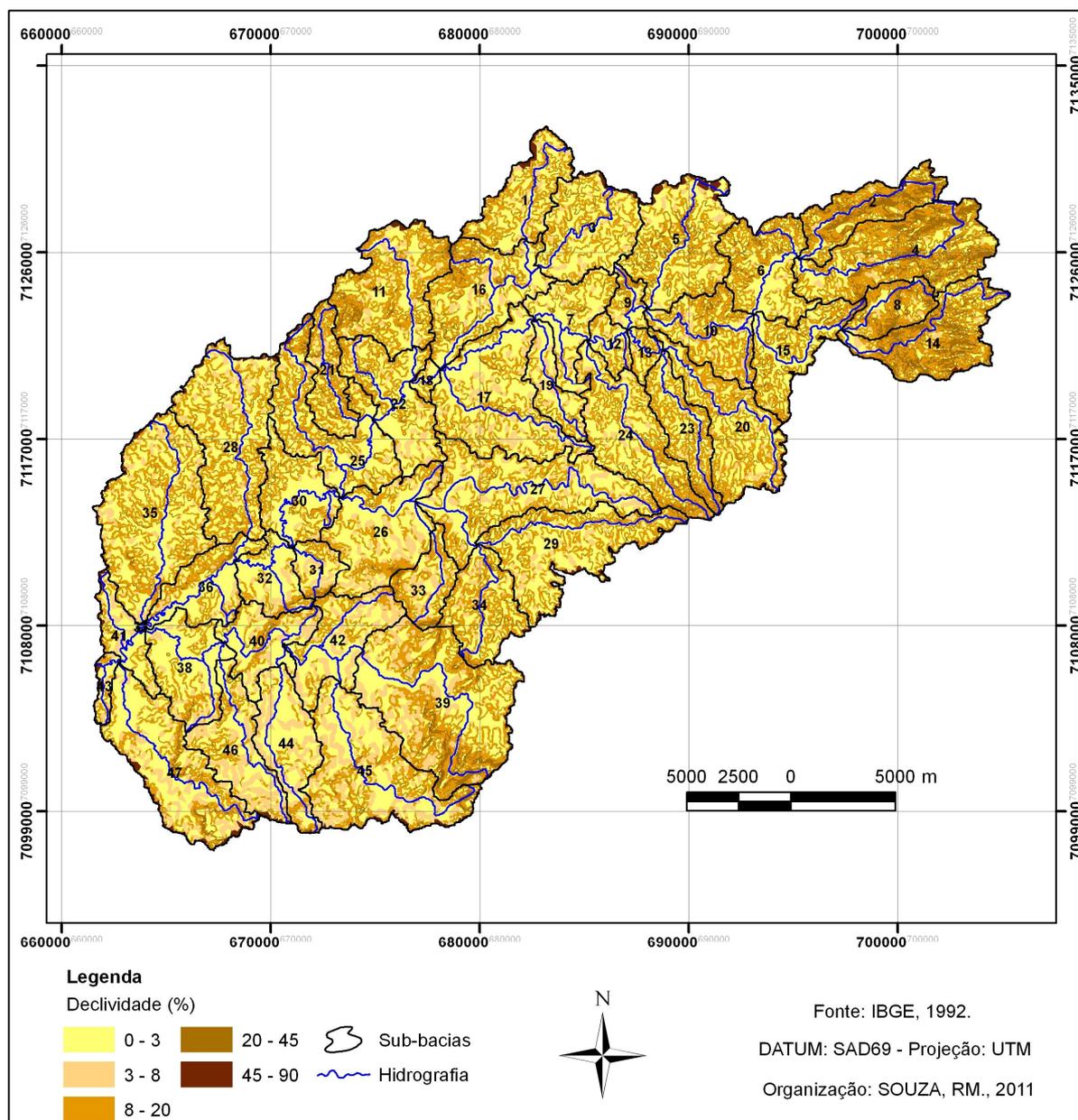


Figura 7 – Declividade da bacia do Altíssimo Rio Negro

Observando a figura, nota-se que a bacia possui, na maior parte de sua área, relevo suave ondulado. A declividade média da bacia é de 7%. As maiores declividades são encontradas na porção leste da bacia, correspondente a Serra do Mar.

As informações referentes à hipsometria, drenagem, solos e usos do solo da bacia, são mostradas no próximo capítulo, pois são dados necessários para a simulação.

3.5 DADOS ESPACIAIS

Para a simulação, o modelo requer as seguintes informações espaciais: modelo digital do terreno, hidrografia, mapa de solos, mapa de usos do solo. Além destas dos dados espaciais, o modelo necessita de séries temporais, que serão tratadas no decorrer deste capítulo.

O modelo digital do terreno e a hidrografia (figura 8) foram obtidos através da digitalização de cartas topográficas do IBGE, ano 1992, na escala 1/50.000. O gradiente altimétrico da bacia é de 700 metros, com a altitude mínima de 820 metros e máxima de 1520 metros. Percebe-se que as partes mais elevadas do relevo estão na porção nordeste da imagem e correspondem a Serra do Mar. Destaque também para a área plana da figura, a qual é a área aluvionar do Rio Negro. A hidrografia mostrada na figura corresponde aos canais principais.

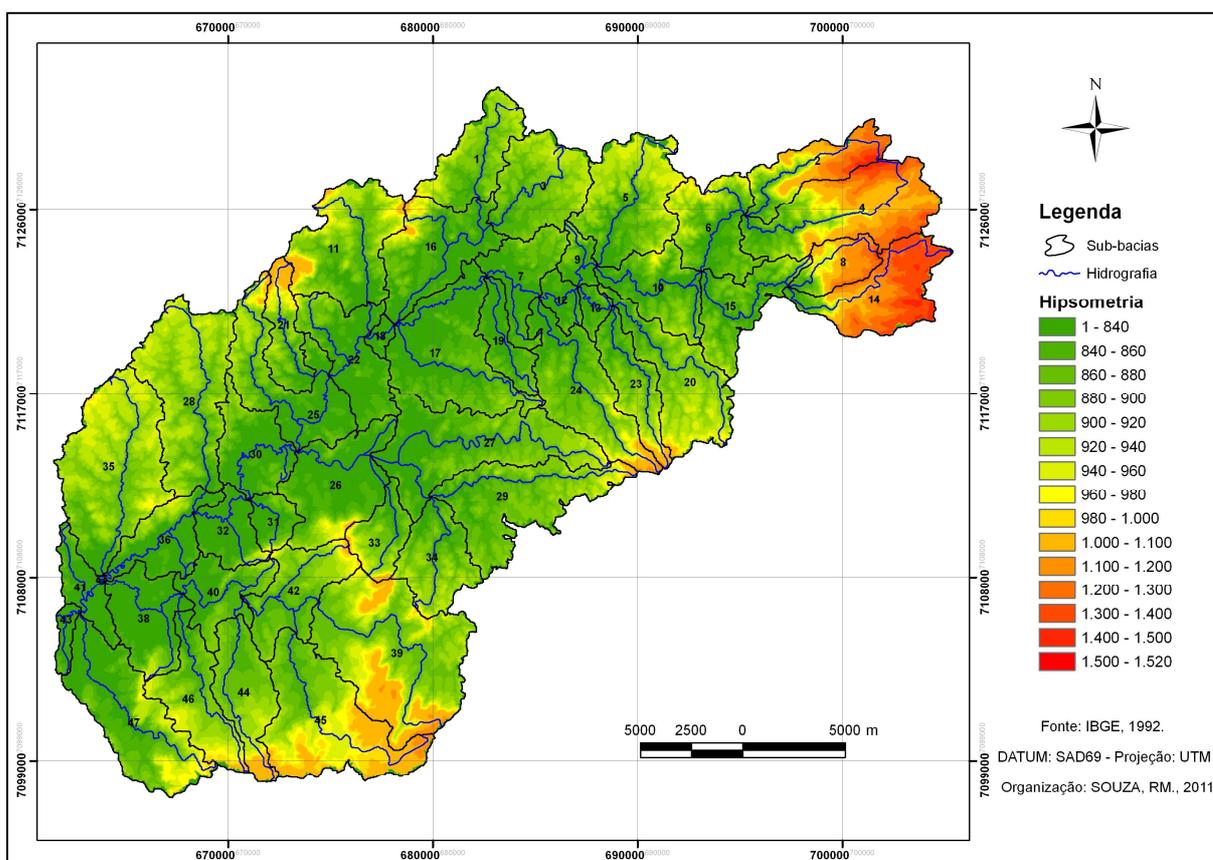


Figura 8 – Modelo digital de terreno da bacia hidrográfica do altíssimo Rio Negro

Em relação aos solos da bacia em estudo, o mapa (1/250.000) foi organizado pelo Laboratório de Hidrogeomorfologia da Universidade Federal do Paraná (LHG/UFPR), baseado em dados oriundos da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) considerando somente o primeiro nível categórico. Os solos da área de estudo (Figura 9) estão distribuídos da seguinte forma: em 44% da área encontra-se o solo do tipo Cambissolo, em 22% Nitossolo, em 13% Argissolo, em 11% Neossolo, em 8% Gleissolo e em 2% Latossolo.

As características de cada tipo de solo apresentadas a seguir estão de acordo com a EMBRAPA (2006) e Lepsch (2002)

- Cambissolos: solos em estado embrionário, com um desenvolvimento muito fraco ou moderado. São solos constituídos por material mineral com um ou mais horizontes superficiais, que estão diretamente sob um horizonte subsuperficial B incipiente.
- Nitossolos: solos com 350g/kg ou mais de argila, inclusive no horizonte A, constituídos por material mineral que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, dentro de 1,5m. da superfície do solo.
- Argissolo: solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta e satisfazendo, ainda, os seguintes requisitos:
 - Horizonte Plíntico, se presente, não satisfaz os critérios para Plintossolo;
 - Horizonte glei, se presente, não satisfaz os critérios para Gleissolo.
- Neossolo: solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Esses solos não têm este horizonte B por serem jovens e geralmente situados em relevos com declividade acentuada. Horizontes glei, plíntico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condições diagnósticas para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente.
- Gleissolos: solos desenvolvidos em materiais inconsolidados e influenciados por encharcamento freqüente e prolongado. Ocorrem em regiões permanentemente úmidas, como em locais com lençol freático próximo à superfície o que deixa os poros do solo saturados com água.

- Latossolos: solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 2m da superfície do solo ou dentro de 3m se o horizonte A apresenta mais que 1,5m de espessura.

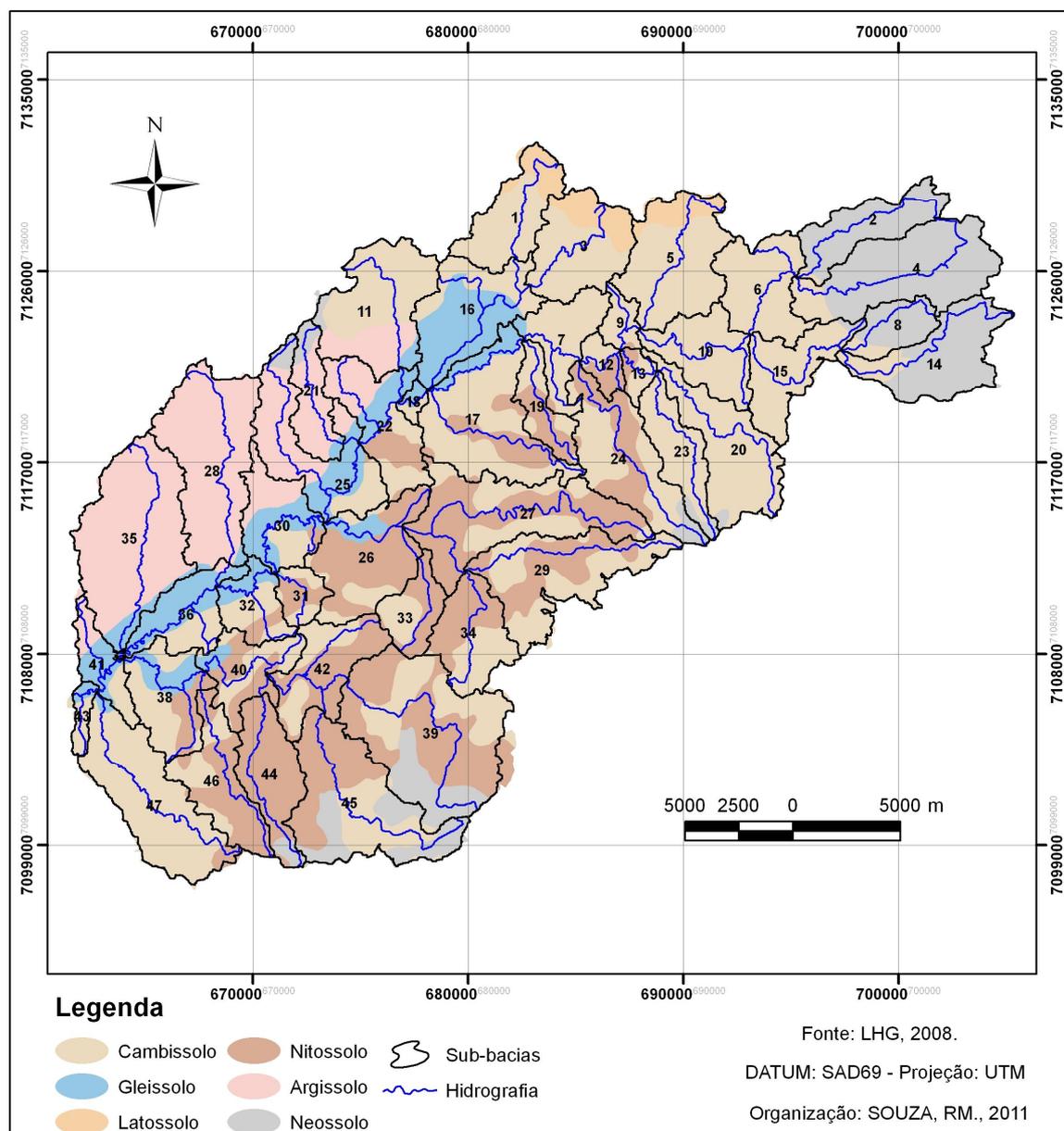


Figura 9 – Solos da bacia hidrográfica do altíssimo Rio Negro

Além do mapa, o modelo requer um banco de dados com diversas informações a respeito das características físico-hídricas dos solos, conforme mostra a tabela 5. Assim como o mapa, o banco de dados foi elaborado pelo LHG/UFPR.

TABELA 5 – INFORMAÇÕES DO BANCO DE DADOS DE SOLOS

Sigla	Descrição	Unidade
SNAM*	Nome do solo	-
NLAYER*	Número de camadas/horizontes	-
HYDGRP*	Grupo hidrológico	-
SOL_ZMX*	Profundidade máxima da zona de raízes	mm
ANION_EXCL*	Fração da porosidade com ânions ativos	Fração
SOL_CRK*	Volume potencial máximo do perfil de solo composto por fissuras como uma fração do volume total do solo	m ³ /m ³
SOL_Z*	Profundidade da camada de solo	mm
SOL_BD**	Densidade aparente (úmida)	g/cm ³
SOL_AWC**	Capacidade de água disponível	mm H ₂ O/mm Solo
SOL_K**	Condutividade hidráulica saturada	mm/h
SOL_CBN**	Porcentagem de carbono orgânico	% peso de solo
CLAY**	Porcentagem de argila	% peso de solo
SILT**	Porcentagem de silte	% peso de solo
SAND**	Porcentagem de areia	% peso de solo
ROCK**	Porcentagem de fragmentos de rocha	% peso de solo
SOL_ALB**	Albedo do solo úmido	Fração
USLE_K**	Erodibilidade do solo (USLE)	m ² hr/(m ³ t cm)
SOL_EC**	Condutividade elétrica	dS/m

FONTE: SWAT, 2011

NOTA: *dados por tipo de solos; **dados por camada de solos

O grupo hidrológico, segundo o U.S Natural Resource Conservation Service (NRCS, 2007) é a classificação dos solos em grupos – A, B, C ou D - de acordo com a sua capacidade de infiltração e a produção de escoamento superficial, sendo que a infiltração é decrescente do grupo A para o D (tabela6).

TABELA 6 – VALORES PARA CLASSIFICAÇÃO DO SOLO EM GRUPOS HIDROLÓGICOS

Grupo	Taxa de Infiltração	Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)
A	Alta	> 150
B	Moderada	entre 5 e 150
C	Baixa	entre 1 e 5
D	Baixíssima	< 1

FONTE: NRCS, 2007.

Porém, Lombardi Neto *et al.* (1989) e Sartori *et al.* (2005) consideram que esta classificação não contempla todas as características dos solos brasileiros. Desta forma, propuseram uma classificação hidrológica do solo 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 (prof. > 200cm) ou profundos (100 a 200 cm);
- Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência à erosão;
- Solos de textura média;
- Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura apresente alta macroporosidade no perfil;
- Solos bem ou excessivamente drenados;

Grupo Hidrológico B:

- Solos profundos (100 a 200cm);
- 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 apresenta boa macroporosidade no perfil;

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;

Grupo Hidrológico D:

- Solos rasos (prof. < 50cm.);
- Solos com taxa de infiltração muito baixa, apresentando pouquíssima resistência e tolerância a erosão;
- Solos orgânicos.

A tabela 7 mostra o enquadramento dos solos da bacia do altíssimo Rio Negro de acordo com a classificação de Lombardi Neto *et al.* (1989) e Sartori *et al.* (2005).

TABELA 7 – GRUPO HIDROLÓGICO DOS SOLOS DA BACIA DO ALTÍSSIMO RIO NEGRO

Tipo de Solo	Taxa de Infiltração	Grupo Hidrológico
Argissolo	Baixa	C
Cambissolo	Baixa	C
Gleissolo	Muito Baixa	D
Latossolo	Alta	A
Neossolo	Muito Baixa	D
Nitossolo	Moderada	B

FONTE: LHG, 2008

O uso do solo foi determinado baseado em uma imagem do satélite LandSat, sensor TM-5, com órbitas ponto 220/79, 220/78 e 221/78, com data de julho de 2007. As bandas utilizadas para a classificação automática, realizada pelo LABHIDRO/UFSC, foram a 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

A Floresta Ombrófila Mista ainda recobre 38% da área. As pastagens ou campos recobrem 28%, a agricultura, seja com cultivo ou solo exposto, recobre 24%, o reflorestamento de Pinus tem uma área de 10%, sendo que os corpos hídricos ocupam menos de 1% da área, conforme figura 10.

Conforme mostrado no item 3.3, durante o processo de criação das Hrus, o modelo permite realizar uma generalização, desconsiderando pequenas áreas das sub-bacias recobertas por determinado tipo de solo, uso do solo ou declividade. Neste trabalho, foram desconsiderados os usos do solo com porcentagem de cobertura inferior a 20% da área da sub-bacia e solos e declividades com porcentagem de ocorrência inferior a 10%. A tabela 8 mostra a distribuição percentual de tipos e usos do solo após a discretização das HRUs.

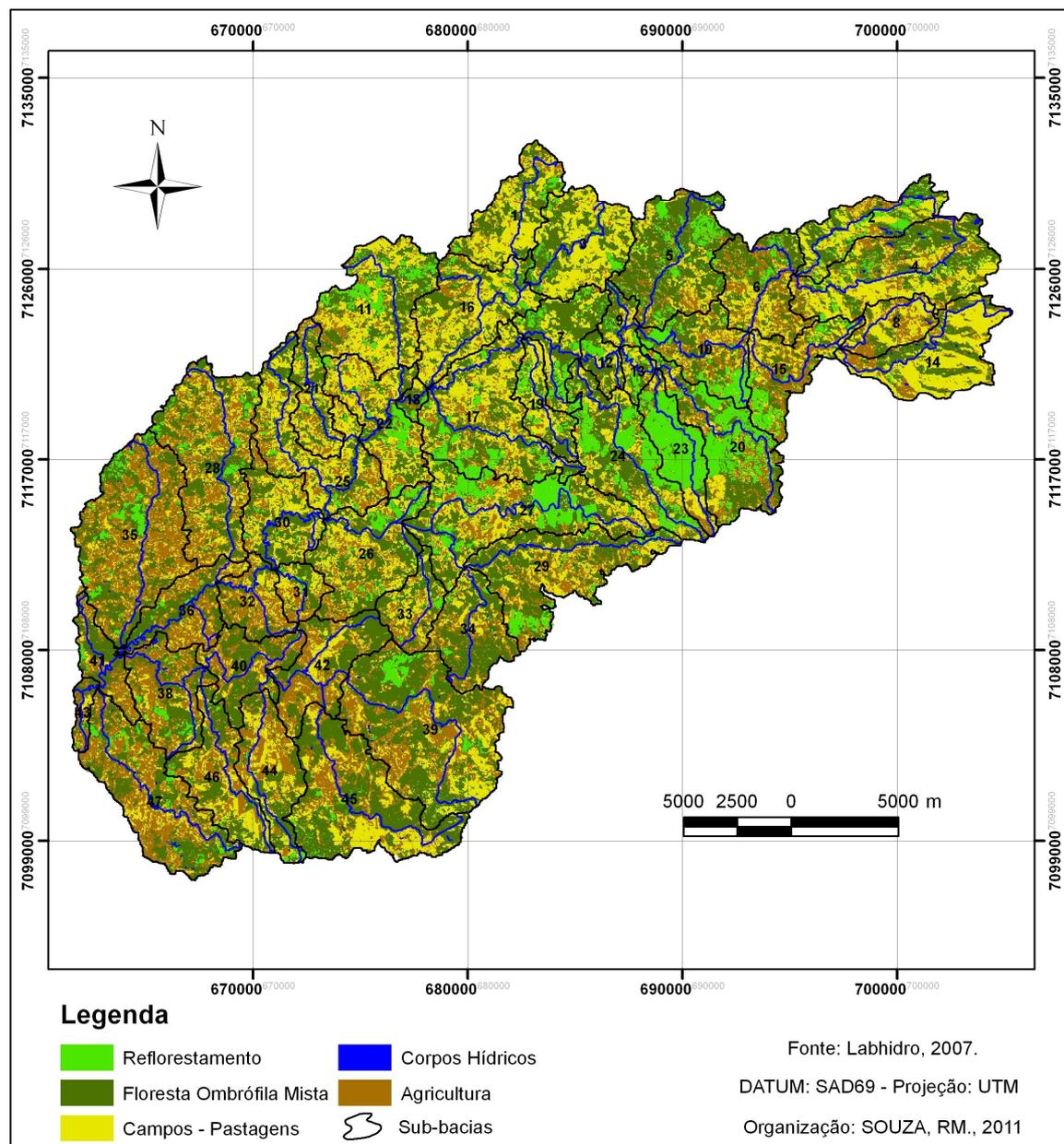


Figura 10 – Uso do solo da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro

TABELA 8 – OCORRÊNCIA DE TIPOS E USOS DO SOLO ANTES E DEPOIS DA DISCRETIZAÇÃO DOS HRUS

Solos	Antes da discretização (%)	Pós discretização (%)
Cambissolo	44	44
Nitossolo	22	22
Argissolo	13	13
Neossolo	11	11
Gleissolo	8	8
Latossolo	2	2
Continua		

Conclusão

Usos	Antes da discretização (%)	Pós discretização (%)
F.O.M	38	45
Pastagens/campos	28	28
Agricultura	25	22
Reflorestamento	9	5

FONTE: SOUZA, 2011

NOTA: F.O.M: Floresta Ombrófila Mista

Nota-se na tabela 8 que as diferenças oriundas do processo de discretização dos HRU's são verificadas nos usos do solo. As alterações referentes aos tipos de solos foram insignificantes, com mudanças inferiores a 1%.

3.6 DADOS HIDROLÓGICOS

Foi utilizada a série de vazão diária do período de 01/01/1984 a 30/11/2010, da estação fluviométrica de Fragosos (65090000), localizada no município de Piên/PR, nas coordenadas 26°09'19''S e 49°23'03''W. Os dados meteorológicos são oriundos da estação climatológica 02549041 (Pinhais), operada pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR, localizada no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba, nas coordenadas geográficas 25° 25'S e 49° 08'W, com altitude de 930 m. De posse dos dados meteorológicos, foi calculada a evapotranspiração potencial pelo método de Penman modificado, cuja descrição detalhada consta em Santos (2001).

As séries de precipitação utilizadas, médias diárias do período de 01/01/1984 a 30/11/2010, são oriundas das estações pluviométricas com código ANA (Agência Nacional de Águas) 02549008 (vossoroca), 02549003 (rio da várzea), 02649018 (fragosos) e 02649057 (campo alegre). A figura 11 mostra a localização das estações.

Segundo Santos *et al.* (2001), o trabalho de analisar os dados brutos oriundos de observações realizadas em estações estudadas, de detectar erros prováveis e corrigir possíveis falhas nas observações é conhecido em hidrologia como análise de consistência. A análise de consistência deve ser efetuada para um conjunto de estações localizadas em uma mesma bacia hidrográfica.

Eventualmente, para o preenchimento de lacunas nos registros ou substituição de dados observados e considerados impróprios, pode-se utilizar de estações situadas em bacias ou regiões vizinhas.

O objetivo de uma estação de medição de chuvas é o de obter uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos. É normal, contudo, a existência de períodos sem informações ou com falhas nas observações, devido a problemas com a localização da estação, com os aparelhos de registro ou com o operador da estação. Os dados coletados, portanto, devem ser submetidos a uma análise antes de serem utilizados (SANTOS *et al.*, 2001).

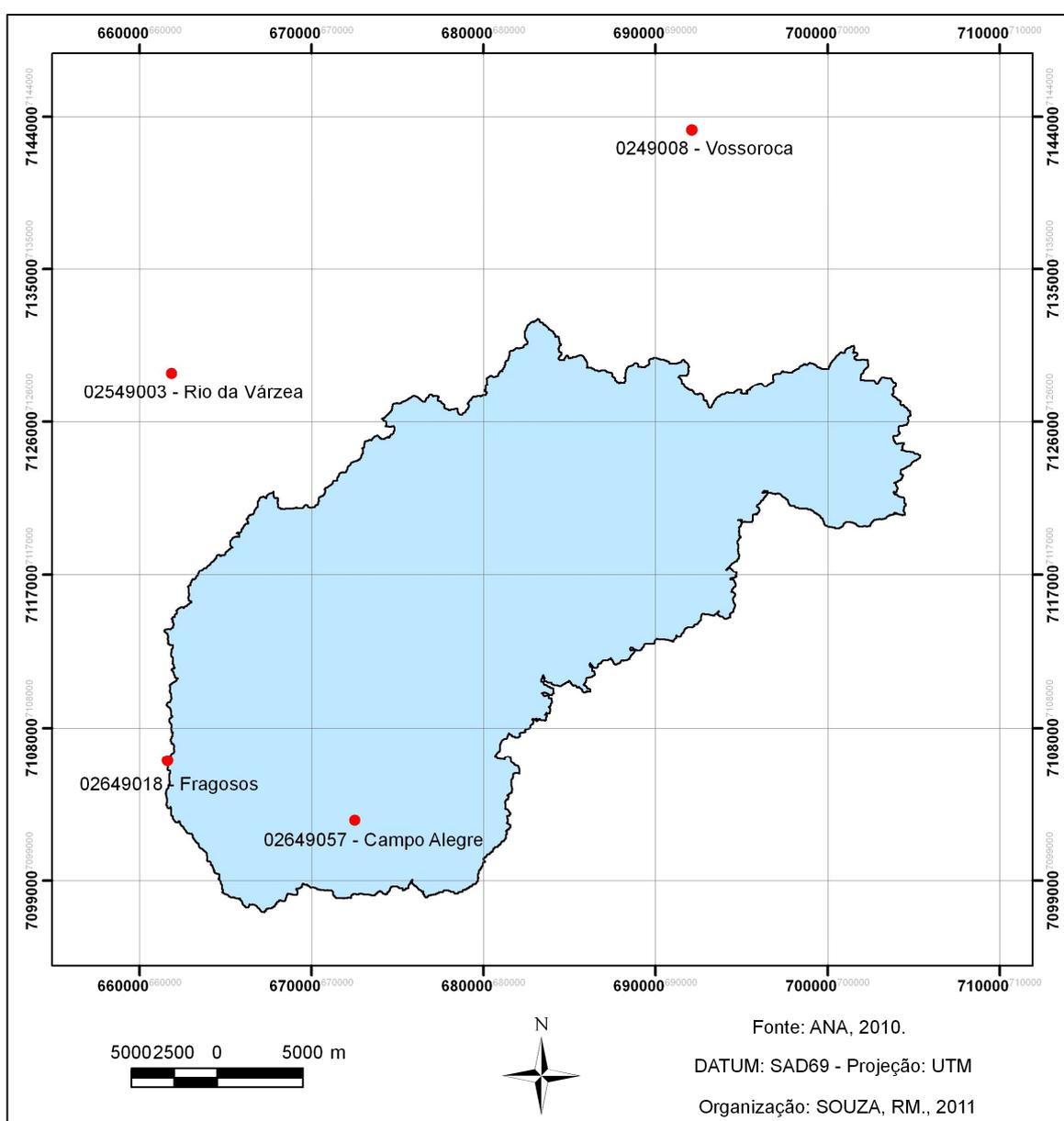


Figura 11 – Localização das estações pluviométricas utilizadas

Neste trabalho, realizou-se a análise de consistência dos dados pluviométricos com a utilização da curva duplo-acumulativa, a qual é obtida plotando-se as precipitações acumuladas de uma estação no eixo y e plotando no eixo x as precipitação acumuladas de estações vizinhas. Caso exista alguma alteração significativa, a curva duplo-acumulativa apresenta uma mudança na declividade (SANTOS *et al.*, 2001).

A estação Rio da Várzea (02549003) apresentou falha nas medições nos períodos de 01/09/1987 a 30/09/1987 e 25/12/1991 a 27/12/1991. Para não influenciar o cálculo da média pluviométrica, estes dias foram descartados nas séries das quatro estações. As figuras 12 a 15 mostram as curvas duplo-acumulativas das estações utilizadas neste trabalho.

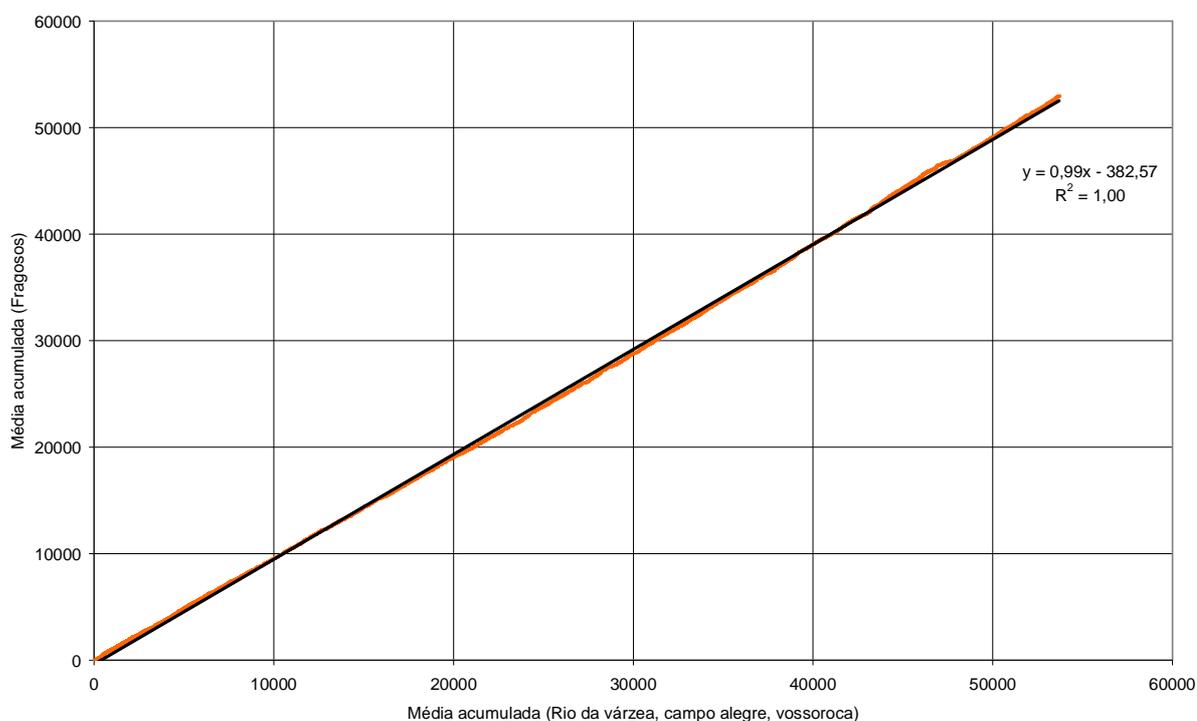


Figura 12 – Curva duplo-acumulativa da estação de Fragosos (02649018)

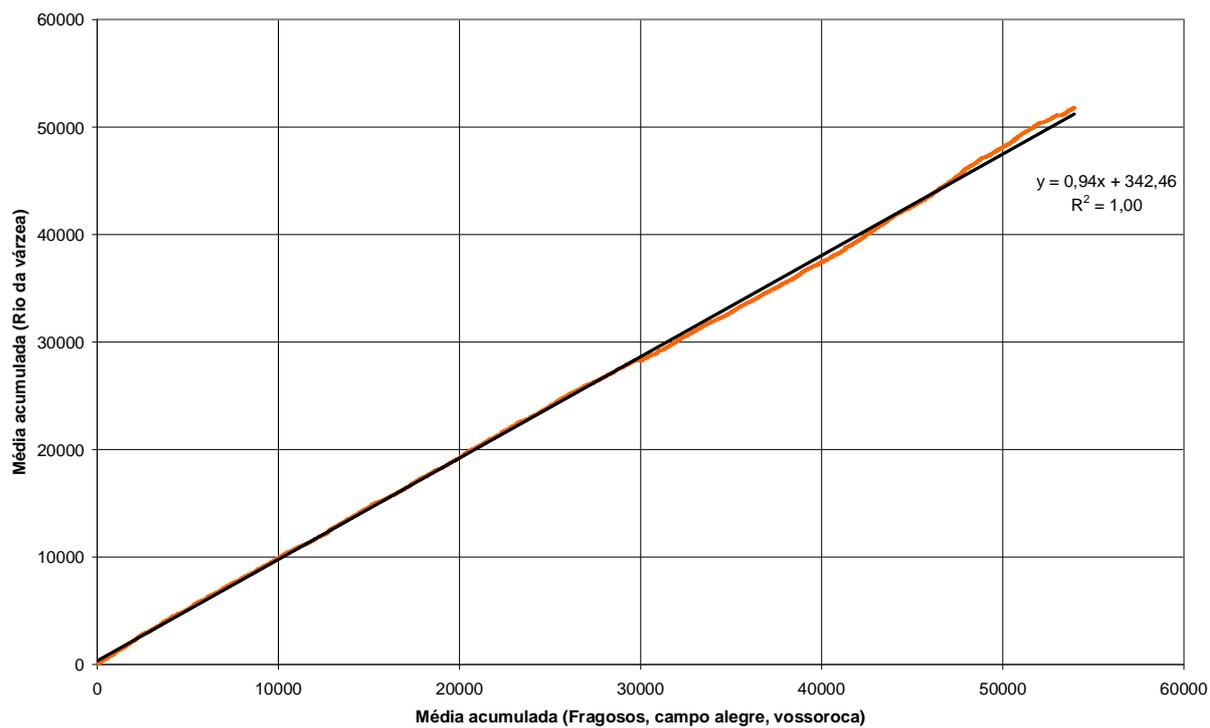


Figura 13 – Curva duplo-acumulativa da estação Rio da Várzea (02549003)

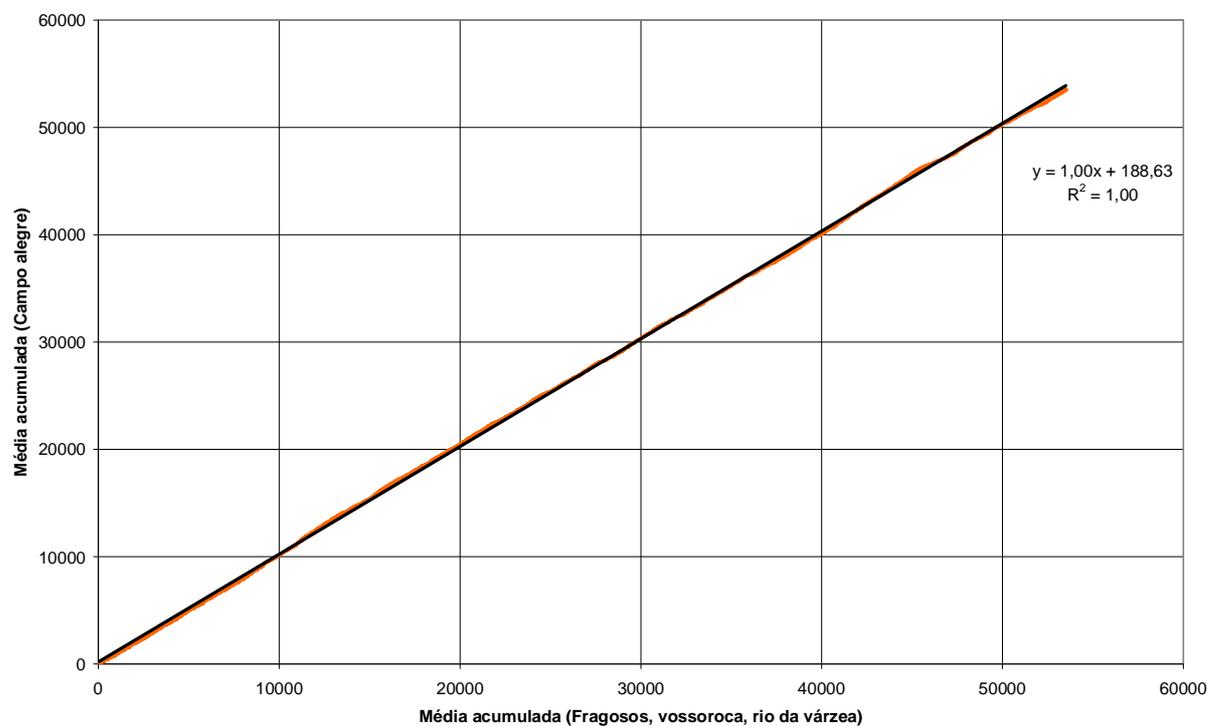


Figura 14 – Curva duplo-acumulativa da estação Campo Alegre (02649057)

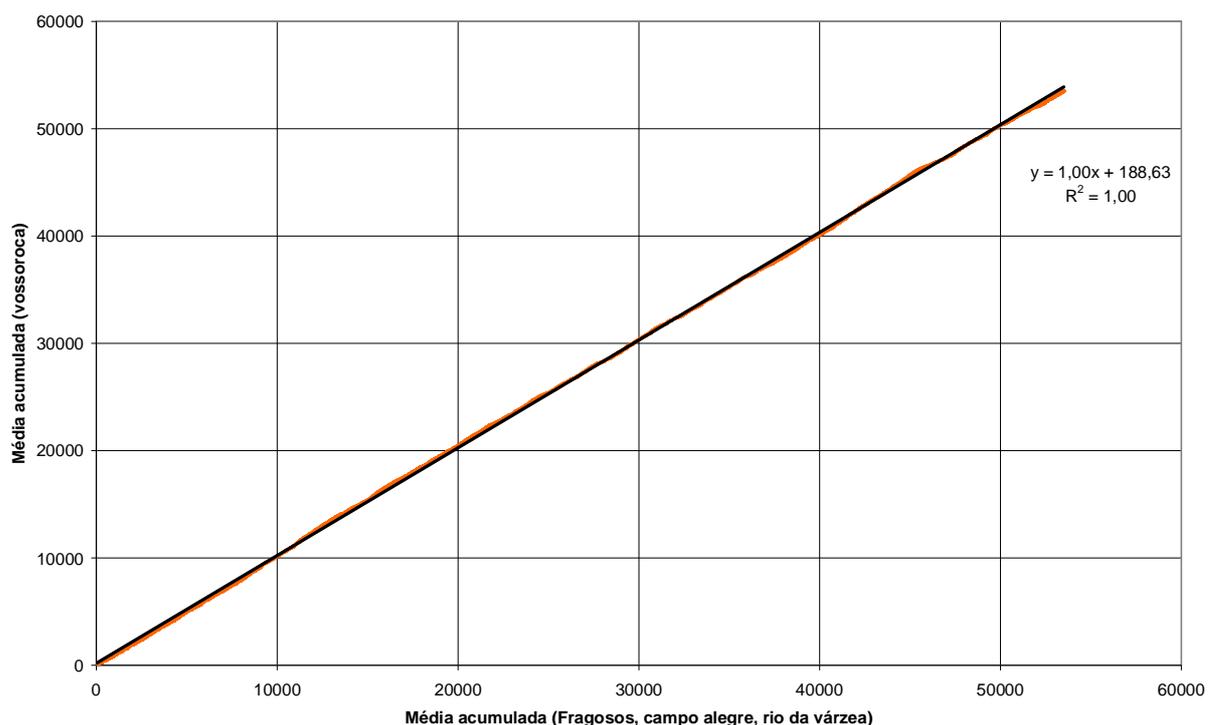


Figura 15 – Curva duplo-acumulativa da estação Vossoroca (02549008)

Analisando as figuras, percebe-se que os dados de todas as estações apresentam consistência entre si.

3.7 MEDIÇÕES

Foram realizadas três campanhas de medição de vazão, nos dias 08/07/2010, 31/08/2010 e 21/09/2010. O objetivo era realizar as medições em dias com recessão no hidrograma e com ausência de precipitações antecedentes, o que não foi possível devido às condições atmosféricas. No dia 21/09/2010, a ocorrência de uma forte precipitação comprometeu a qualidade das medições, sendo este dia descartado.

O equipamento utilizado para as medições foi o FlowTracker, um medidor acústico de vazão que trabalha com o efeito Doppler (Acoustic Doppler Velocimeter). As medições realizadas com este aparelho são chamadas de medição a vau, onde o operador atravessa a seção do rio a pé medindo as velocidades e profundidade do leito. O método acústico é baseado na medição e integração de áreas e velocidades. Estas informações são obtidas pela análise do eco dos pulsos de ultrassom emitidas

pelo aparelho e refletidas pelas partículas sólidas em suspensão na água e também pela superfície sólida do fundo. Ao mesmo tempo, durante a travessia do canal, é realizada a batimetria, o levantamento da trajetória da travessia e os perfis e direções de velocidades. Estas informações, quando integradas, fornecem a vazão que está passando pela seção (SANTOS, *et al.*, 2001). As figuras 16 e 17 mostram imagens das campanhas de medição.



Figura 16 – Equipe do LHG realizando medições em leito irregular



Figura 17 – Equipe do LHG realizando medições em rio com controle.

3.8 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliação dos resultados da simulação, além da inspeção visual dos hidrograma simulado x observado, utilizou-se de análise estatística. Para esta análise, utilizou-se o coeficiente de Nash - Sutcliffe (1970) (COE), tradicionalmente utilizado para avaliar ajustes de modelos hidrológicos, mas que dá maior peso às vazões máximas. Para avaliar o ajuste das vazões mínimas e sendo adotado como o coeficiente indicativo da qualidade da simulação deste trabalho, utilizou-se o log de COE, o qual valoriza vazões mínimas. Ambos os coeficientes variam de $-\infty$ a 1, sendo que 1 representa o ajuste ideal e valores acima de 0,70 podem ser considerados satisfatórios. O coeficiente e o log do coeficiente são definidos por:

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (49)$$

$$NASH_{log} = 1 - \frac{\sum (\log Q_{sim} - \log Q_{obs})^2}{\sum (\log Q_{obs} - \overline{\log Q_{obs}})^2} \quad (50)$$

onde Q_{sim} é a vazão simulada, Q_{obs} é a vazão observada e $\overline{Q_{obs}}$ é a média da vazão observada.

Também foram utilizados métodos estatísticos de correlação e regressão.

A correlação mede o grau de associação entre duas variáveis. Os coeficientes de correlação variam de -1 a 1. Uma correlação com resultado >0 indica correlação positiva, com uma variável aumentando de acordo com a outra. Se o resultado da correlação for <0 , a correlação é negativa e indica que as variáveis crescem em direções opostas. O valor 0 indica que não existe nenhuma correlação entre as duas variáveis (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Segundo Naghettini e Pinto (2007), a regressão linear múltipla tem por objetivo estudar o comportamento de uma variável dependente y em função de uma ou mais variáveis independentes X_i . A regressão é expressa da seguinte forma:

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p \quad (51)$$

Onde Y é a variável dependente ou prevista; X_1 , X_2 e X_p são as variáveis independentes ou explicativas e β_1 , β_2 e β_p , são os coeficientes da regressão.

4. RESULTADOS

4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT

O período simulado inicialmente é chamado de período de calibração, onde a simulação não é realizada para todo o período do estudo, mas sim para ajustar o modelo. Posteriormente, é realizada a validação, onde com os valores dos parâmetros do período de calibração, simula-se outra parte ou o restante da série. A validação é necessária para verificar se o modelo está representando a física da bacia. Espera-se que o período de validação tenha resultados próximos ao período de calibração.

A calibração, no primeiro momento, foi manual, em intervalo de tempo diário, com os valores dos parâmetros sendo atribuídos a todas as sub-bacias. Os parâmetros foram escolhidos baseados na literatura e na técnica de tentativa e erro, sendo calibrados através da opção de substituir valor ou multiplicação. Substituir valor significa que o valor atribuído ao parâmetro torna-se o mesmo para toda a bacia. A multiplicação mantém a proporção, visto que cada sub-bacia, HRU ou tipo de solo, apresentam um valor inicial próprio para determinados parâmetros.

Para definir os valores dos parâmetros, procedeu-se a calibração através da técnica de tentativa e erro, até chegar-se a uma simulação que representasse, mesmo de que forma não totalmente adequada, o regime hidrológico da bacia.

A calibração automática deve ser realizada após uma calibração que apresente resultados medianos, conforme o exposto no parágrafo anterior. A calibração automática foi exercida para o período de dados disponíveis na época, de 01/01/1991 a 31/12/2002. Porém, assim como outros modelos hidrológicos, o modelo SWAT necessita de um período de aquecimento, para considerar condições de umidade antecedente não medidas. Assim, o período 01/01/1991 a 31/12/1993 foi utilizada para aquecimento do modelo, avaliando-se o período restante. A calibração automática foi realizada com o software SWAT-CUP, desenvolvido especificamente para calibração do modelo SWAT.

A tabela 9 mostra os parâmetros e os valores oriundos da calibração automática e a figura 18 mostra o hidrograma das vazões simuladas e observadas.

TABELA 9 – PARÂMETROS CALIBRADOS AUTOMATICAMENTE

Nº	Parâmetro	Descrição	Valor calibrado
1	Alpha Bf (1)	Constante de recessão do escoamento	0,85
2	Canmx (1)	Interceptação máxima da vegetação	9,85
3	Cn2 (2)	Curva Número	0,1
4	Ch_n2 (1)	Coeficiente de rugosidade do canal principal	1
5	Esco (1)	Coeficiente de compensação da evaporação no solo	0,01
6	Gw_Delay (1)	Tempo de recarga do aquífero	60
7	Gw_Revap (1)	Coeficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	0,15
8	Gwqmn (1)	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	10
9	Sol_Awc (2)	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	4
10	Sol_K (2)	Condutividade hidráulica saturada	2
11	Slope (2)	Declividade	10
12	Ssubbsn (2)	Comprimento da vertente	0,7

FONTE: SOUZA, 2011

NOTA: Operação realizada: (1) substituição, (2) multiplicação.

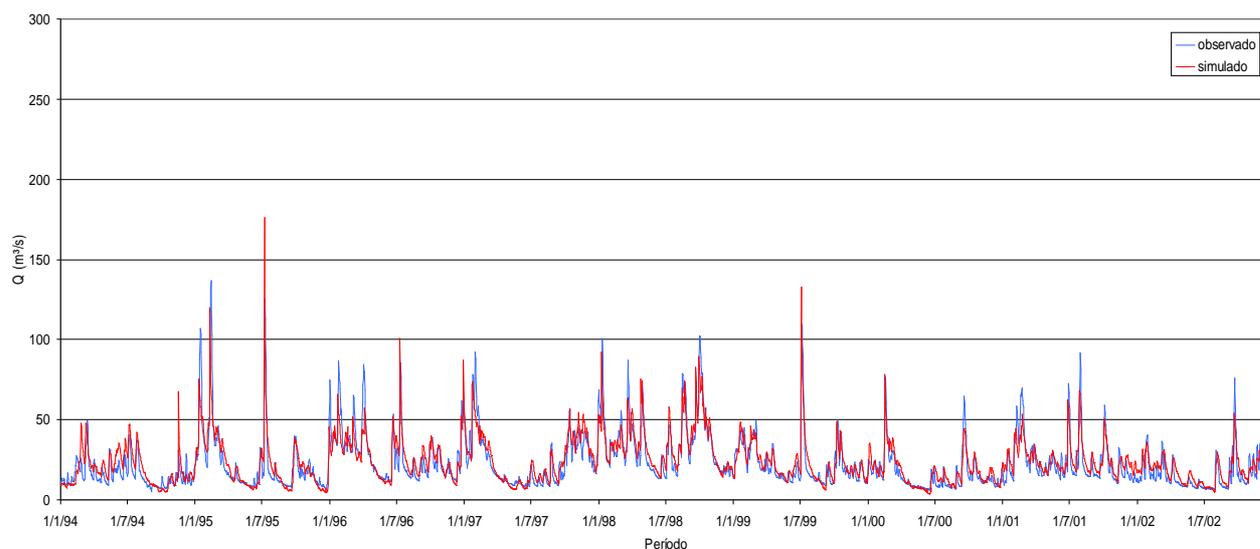


Figura 18 – Hidrograma do período de calibração de 01/01/1994 a 31/12/2002

Conforme mostra a figura, o hidrograma das vazões simuladas representou adequadamente o comportamento hidrológico da bacia, com problemas em picos e recessões. O COE desta simulação foi 0,79 e o logCOE foi 0,82. Porém, analisando os parâmetros e valores utilizados, verifica-se que a representatividade física dos parâmetros não era adequada, com valores sendo aumentados até dez vezes.

Diante deste resultado, partiu-se para o refinamento da calibração automática, novamente através de calibração manual. Procurou-se encontrar valores de parâmetros que apresentassem maior representatividade física do sistema e também inserção ou exclusão de outros parâmetros. Desta forma, para o período de calibração, o melhor conjunto de parâmetros e seus respectivos valores contam na tabela 10. De posse de uma maior série de dados, optou-se pela validação do modelo entre 01/01/1980 a 30/11/2010, considerando o período de aquecimento de 01/01/1980 a 31/12/1983.

TABELA 10 – DESCRIÇÃO E VALORES DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

Nº	Parâmetro	Descrição	Valor Calibrado
1	Alpha Bf (1)	Constante de recessão do escoamento de base	0,57
2	Canmx (1)	Interceptação máxima da vegetação (mm H ₂ O)	42
3	CN2 (2)	Curva número na condição de solo úmido	0,314
4	Esco (1)	Coeficiente de compensação da evaporação do solo	0,207
5	Gw Delay (1)	Tempo de recarga do aquífero (dias)	90
6	Gw Revap (1)	Coeficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	0,1
7	Slsbbsn (2)	Comprimento médio da vertente de cada Hru (m)	0,57
8	Sol AWC (2)	Controla a quantidade de água disponível nas camadas de solo (mm H ₂ O/mm solo)	1,18
9	Sol K (2)	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)	2,62
10	Slope (2)	Declividade média de cada sub-bacia (m/m)	2,5

FONTE: SOUZA, 2011

NOTA: Operação realizada: (1) substituição, (2) multiplicação.

O COE obtido para todo o período de simulação foi de 0,54 e o logCOE foi 0,76. A tabela 11 compara os valores das vazões observadas e simuladas dos períodos de calibração e simulação.

TABELA 11 – COMPARATIVO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS

Período de calibração (01/01/1994 a 31/12/2002)		
	Observado	Simulado
Q média (m³/s)	22,83	24,14
Q95 (m³/s)	8,12	7,36
q95 (L/s.km²)	10,30	9,34
Período da simulação (01/01/1984 a 30/11/2010)		
	Observado	Simulado
Q média (m³/s)	20,25	20,08
Q95 (m³/s)	6,65	6,05
q95 (L/s.km²)	8,44	7,68

FONTE: ANA, 2010 E SOUZA, 2011.

Conforme mostra a tabela 11 os valores das vazões Q95 e q95 simuladas no período de calibração e simulação estão próximos, com este último apresentando vazões inferiores devido à atenção dada às vazões mínimas. No que diz respeito à média, como houve uma diminuição geral dos valores das vazões simuladas para o período de 01/01/184 a 30/11/2010, a mesma seguiu esta tendência.

Para facilitar a visualização do hidrograma das vazões observadas e simuladas, o mesmo foi dividido em três períodos, conforme mostram as figuras 19 a 21. A figura 21 também mostra a vazão nos dias de medição.

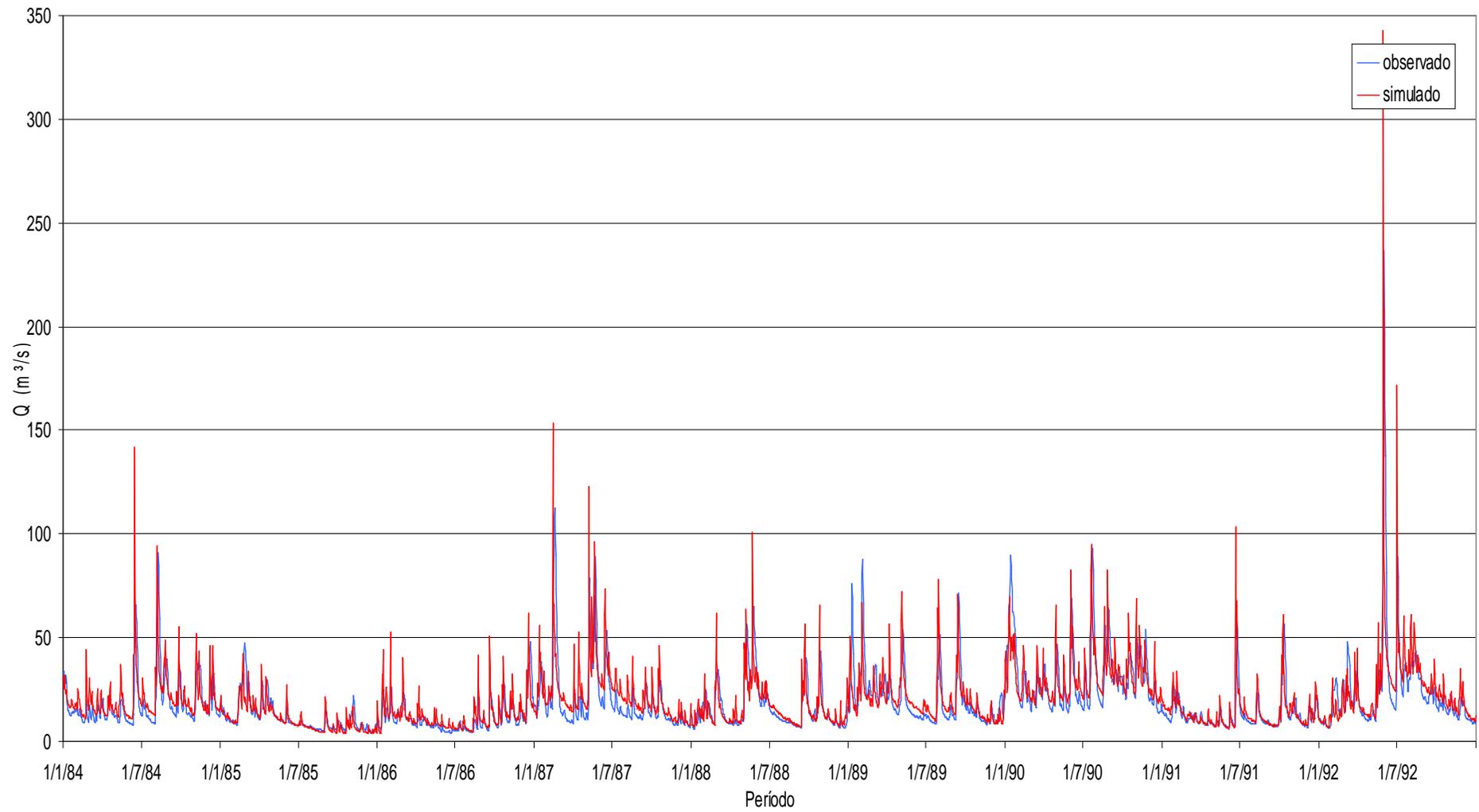


Figura 19 – Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/1984 a 31/12/1992.

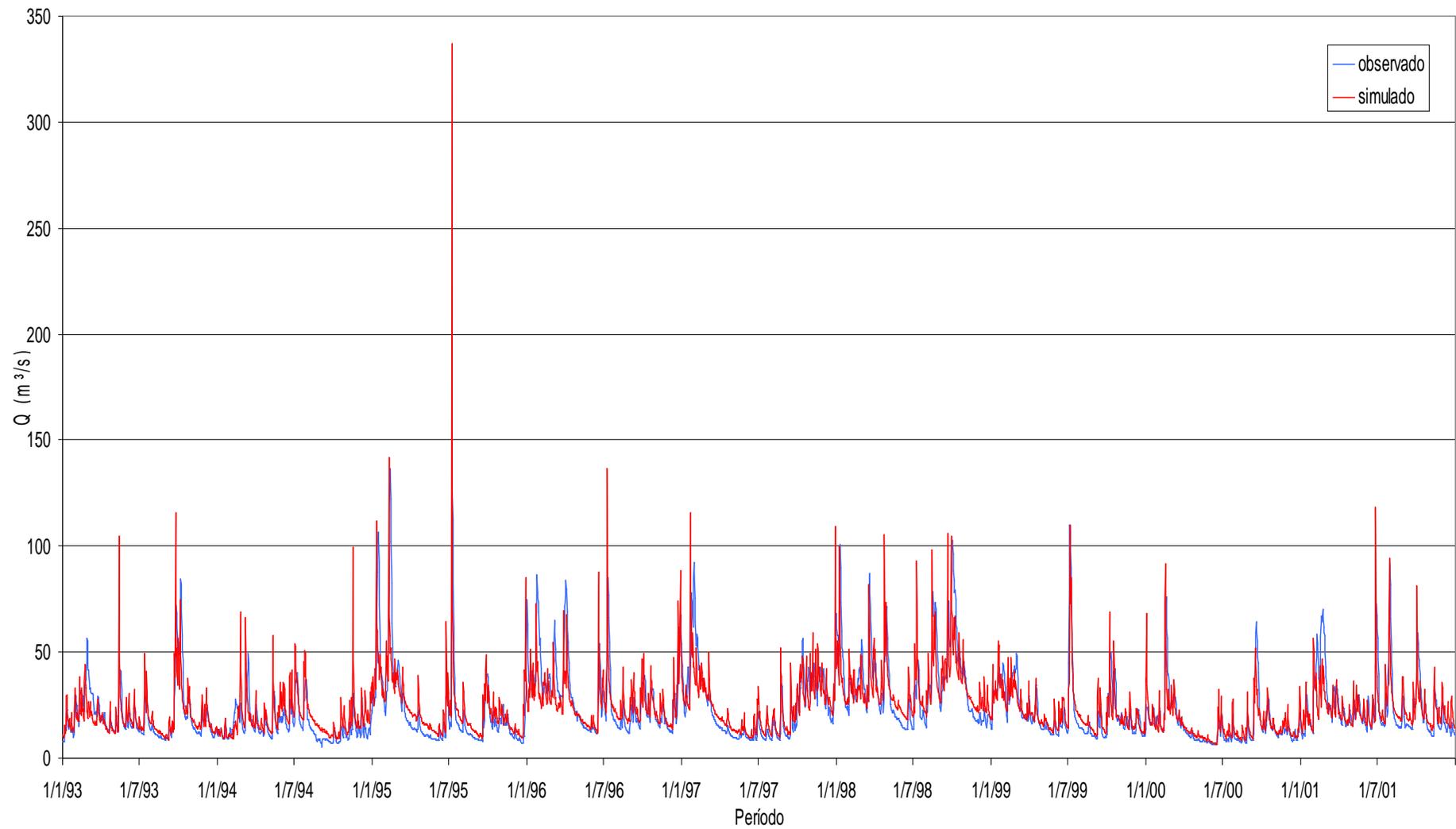


Figura 20 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/1993 a 31/12/2001.

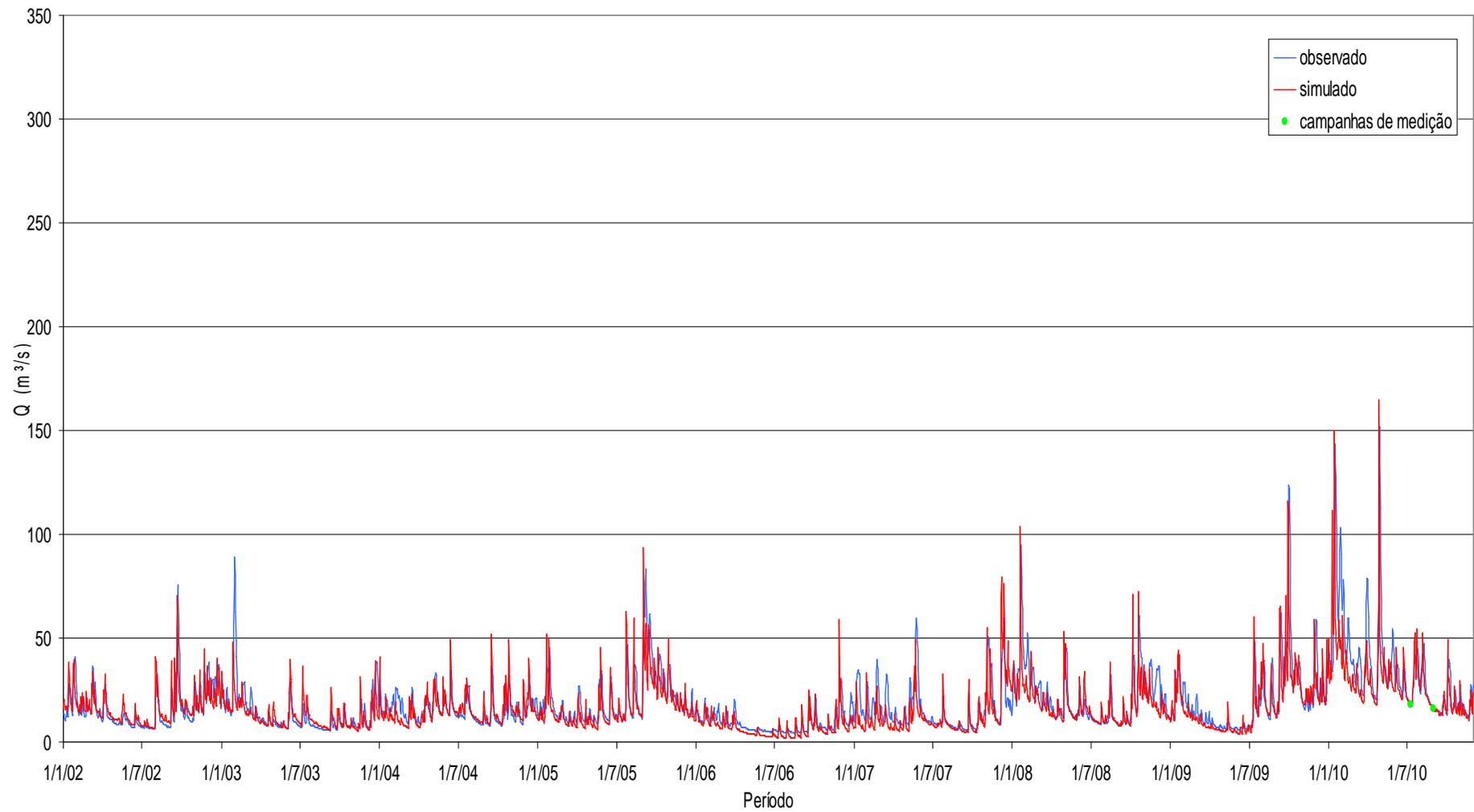


Figura 21 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas, período de 01/01/2002 a 30/11/2010

Como este trabalho é voltado ao estudo de vazões mínimas, optou-se por aperfeiçoar a calibração desta faixa de vazões. Analisando as figuras, nota-se que os erros, em sua grande maioria, foram superestimando as mínimas. Apesar deste fato, percebe-se que as recessões e as vazões baixas foram representadas de forma satisfatória.

A título de comparação, a figura 22 mostra a curva de permanência das vazões observadas e simuladas no período de 01/01/1984 a 30/11/2010.

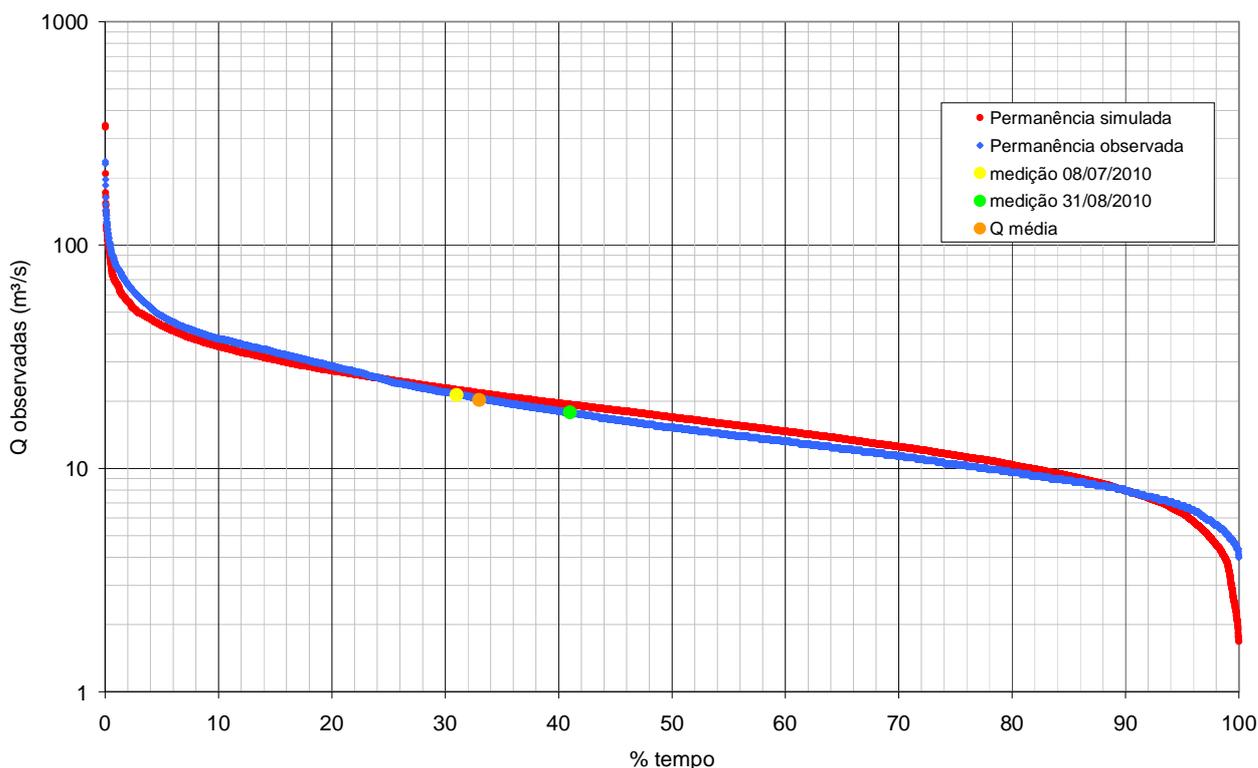


Figura 22 – Curvas de permanência das vazões observadas e simuladas

Conforme mostra a figura, nas vazões altas a simulação apresentou maiores vazões. No que diz respeito especificamente a Q95, os valores da simulação foram levemente inferiores. Verifica-se também que as medições, efetuadas para validação espacial, foram realizadas com permanências abaixo e acima da média (Q33), mas próximas a ela. Em virtude das condições climáticas no decorrer do ano de 2010, não foi possível realizar medições em dias de vazões menores. Os resultados destas medições são discutidos no capítulo 4.3.

A figura 23 apresenta a dispersão entre as vazões observadas e simuladas.

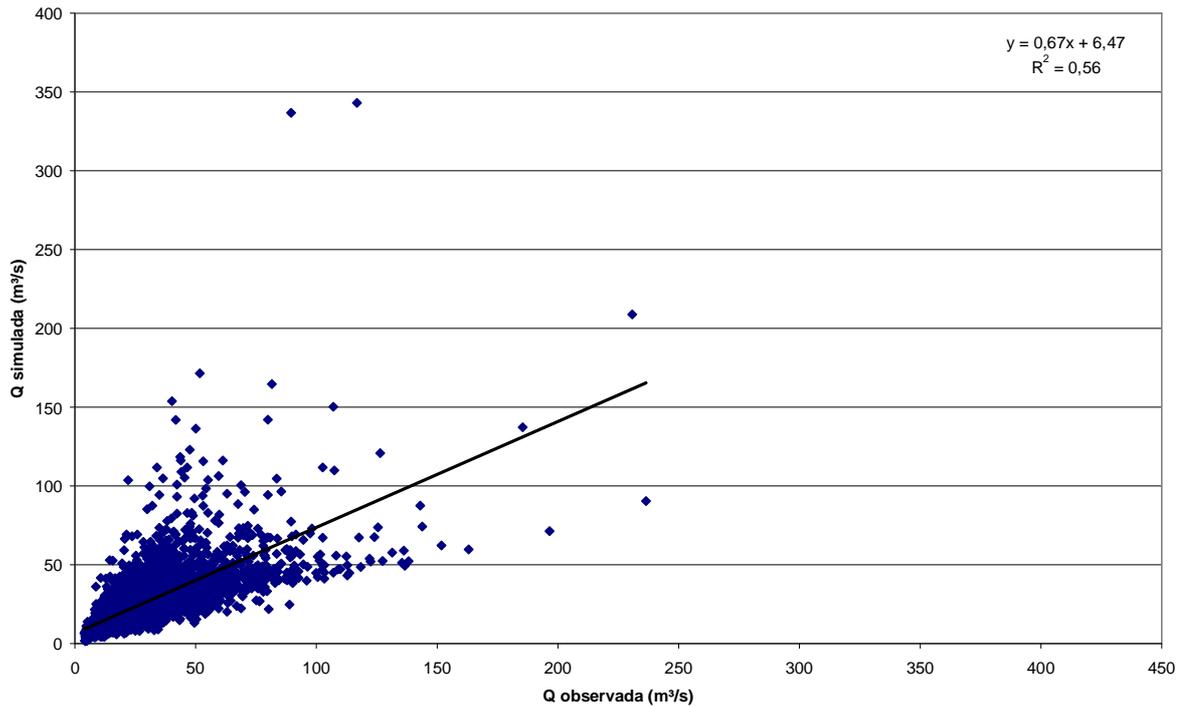


Figura 23 – Dispersão entre vazões observadas e simuladas

Analisando a figura, verifica-se que a série de vazões simuladas comparada à série de vazões observadas, apresentou erros em vazões baixas e altas, com uma tendência de subestimar as vazões. Porém, devido à importância dada às vazões mínimas no ajuste do modelo SWAT, percebe-se que os maiores erros estão na representação das vazões altas, notadamente acima de 50m³/s, onde o modelo simulou, predominantemente, valores inferiores aos observados.

4.2 RESULTADOS ESPACIAIS E ESTATÍSTICOS

A tabela 12 traz os valores das vazões q95 simuladas em cada sub-bacia, além de outras informações das sub-bacias extraídas do modelo SWAT. A figura 24 espacializa esta informação, mostrando a variabilidade espacial das vazões específicas simuladas.

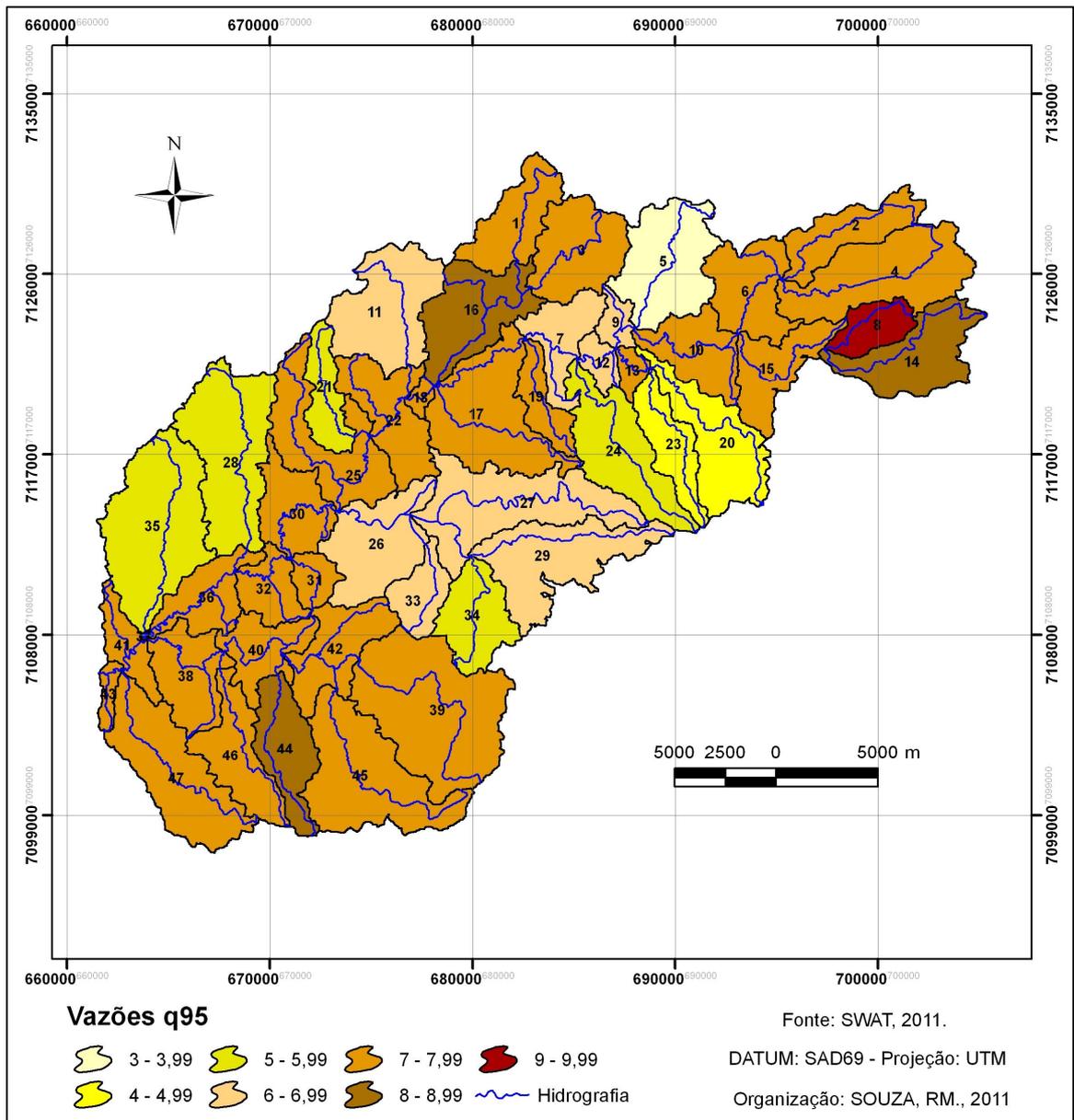


Figura 24 – Vazão q95 simulada em cada sub-bacia

Analisando a figura 24, verifica-se que a maior variabilidade espacial das vazões q95 está nas bacias de cabeceira, com todo o intervalo das vazões q95 simuladas presente nestas bacias. O menor valor de q95 simulada foi encontrado na bacia 05 (3,74 L/s.km²) e o maior valor foi encontrado na bacia 08 (9,25 L/s.km²). De uma forma geral, a vazão simulada predominante está no intervalo de 7,00 a 7,99 L/s.km².

TABELA 12 – VAZÕES q95 SIMULADAS E CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS DEFINIDAS PELO MODELO SWAT

Sb	q95	Tipos de solo *					Usos do solo *					Ad (km ²)	P.M.A (mm)
		RL	CX	LB	NX	GM	PVA	F.O.M	PAST	AGRL	PINUS		
1	7,19	0,00	0,87	0,24	0,00	0,00	0,00	0,44	0,56	0,00	0,00	15,26	1375
2	7,59	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,48	0,00	0,00	13,77	1375
3	7,37	0,00	0,70	0,30	0,00	0,00	0,00	0,45	0,55	0,00	0,00	19,09	1375
4	7,69	0,94	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,49	0,00	0,00	28,77	1375
5	3,74	0,00	0,80	0,20	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	24,00	1375
6	7,29	0,69	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,43	0,10	0,00	58,92	1375
7	6,78	0,30	0,61	0,02	0,06	0,00	0,00	0,47	0,29	0,09	0,15	218,79	1375
8	9,25	0,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,46	0,00	8,17	1375
9	6,72	0,46	0,50	0,03	0,00	0,00	0,00	0,49	0,36	0,13	0,02	143,54	1375
10	7,25	0,58	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,43	0,16	0,03	115,57	1375
11	6,62	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	0,32	0,47	0,53	0,00	0,00	24,67	1264
12	6,73	0,36	0,59	0,03	0,02	0,00	0,00	0,46	0,29	0,10	0,14	183,60	1375
13	4,73	0,00	0,97	0,00	0,03	0,00	0,00	0,34	0,04	0,00	0,63	35,92	1375
14	8,02	0,94	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,66	0,00	0,00	19,59	1375
15	7,81	0,61	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,52	0,22	0,00	42,10	1375
16	8,64	0,00	0,59	0,16	0,00	0,25	0,00	0,44	0,56	0,00	0,00	55,59	1264
17	7,17	0,26	0,61	0,02	0,10	0,02	0,00	0,48	0,32	0,07	0,13	256,05	1570
18	7,48	0,21	0,60	0,04	0,08	0,06	0,00	0,47	0,36	0,06	0,10	313,38	1570
19	7,34	0,00	0,46	0,00	0,54	0,00	0,00	0,47	0,53	0,00	0,00	8,00	1570
20	4,52	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	21,06	1570
21	5,61	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,37	0,36	0,27	0,00	9,59	1264
22	7,60	0,19	0,59	0,04	0,08	0,07	0,04	0,47	0,38	0,06	0,09	355,49	1570
23	4,06	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	11,96	1570
24	5,42	0,00	0,58	0,00	0,42	0,00	0,00	0,43	0,26	0,00	0,31	23,04	1570
25	7,61	0,18	0,55	0,04	0,07	0,08	0,09	0,45	0,38	0,08	0,08	387,76	1570
26	6,36	0,00	0,39	0,00	0,60	0,01	0,00	0,47	0,26	0,19	0,08	103,39	1570
27	6,16	0,00	0,44	0,00	0,56	0,00	0,00	0,48	0,23	0,16	0,12	72,54	1570
28	5,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,35	0,25	0,39	0,00	31,28	1570
29	6,91	0,00	0,55	0,00	0,45	0,00	0,00	0,48	0,25	0,27	0,00	26,07	1570
30	7,59	0,14	0,51	0,03	0,18	0,07	0,08	0,46	0,35	0,11	0,08	505,05	1570
31	7,41	0,00	0,48	0,00	0,52	0,00	0,00	0,34	0,32	0,34	0,00	5,19	1570
32	7,61	0,13	0,51	0,03	0,18	0,08	0,07	0,45	0,35	0,11	0,08	519,50	1570
33	6,51	0,00	0,41	0,00	0,59	0,00	0,00	0,42	0,30	0,28	0,00	8,78	1570
34	5,19	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,68	0,00	0,32	0,00	14,89	1570

Continua

Conclusão

35	5,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,96	0,40	0,00	0,60	0,00	35,92	1570
36	7,56	0,12	0,48	0,02	0,17	0,09	0,12	0,45	0,34	0,14	0,07	563,50	1570
37	7,51	0,12	0,45	0,02	0,16	0,08	0,17	0,45	0,32	0,17	0,07	599,54	1570
38	7,51	0,13	0,30	0,00	0,54	0,03	0,00	0,45	0,20	0,34	0,00	150,47	1570
39	7,02	0,20	0,29	0,00	0,50	0,00	0,00	0,48	0,22	0,30	0,00	43,35	1570
40	7,43	0,16	0,28	0,00	0,56	0,01	0,00	0,47	0,22	0,32	0,00	118,90	1570
41	7,66	0,12	0,42	0,02	0,23	0,08	0,14	0,45	0,29	0,21	0,05	757,57	1570
42	7,41	0,20	0,30	0,00	0,50	0,00	0,00	0,47	0,23	0,29	0,00	91,23	1570
43	7,68	0,11	0,44	0,02	0,22	0,08	0,14	0,45	0,28	0,22	0,05	787,78	1570
44	8,42	0,04	0,00	0,00	0,96	0,00	0,00	0,34	0,30	0,36	0,00	15,58	1570
45	7,89	0,30	0,28	0,00	0,42	0,00	0,00	0,49	0,26	0,25	0,00	31,99	1570
46	7,83	0,00	0,31	0,00	0,69	0,00	0,00	0,38	0,29	0,33	0,00	16,32	1570
47	7,37	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,57	0,00	27,80	1570

FONTE: SWAT, 2011 – Org. SOUZA, RM.

NOTA: *Proporção de ocorrência na sub-bacia - Sb: sub-bacia – RL: Neossolo – CX: Cambissolo – LB: Latossolo – NX: Nitossolo – GM: Gleissolo – PVA: Argissolo – FOM: Floresta Ombrófila Mista – PAST: Pastagens – AGRL: Agricultura – Ad: área de drenagem – P.M.A: precipitação média anual

A figura 25 mostra a variabilidade das vazões q95 conforme a área de contribuição das sub-bacias. A linha indica o valor simulado da bacia do altíssimo Rio Negro como um todo, representada pela bacia 43.

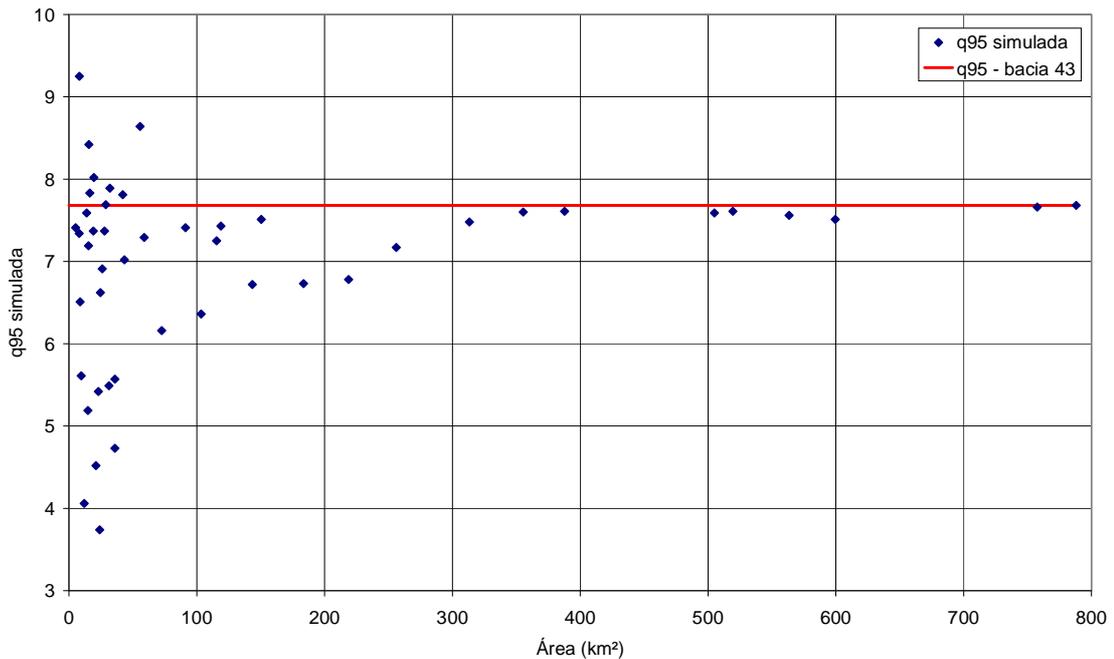


Figura 25 – Variabilidade da vazão q95 conforme a área de drenagem

Nota-se que quanto menor a área de drenagem, principalmente para áreas de drenagem inferiores a 100km², maior é a variabilidade das vazões q95 simuladas. Verifica-se também que com o aumento da área de drenagem, existe uma tendência do aumento da q95. Porém, tomando como pressuposto somente esta variável, os resultados oriundos da simulação apontam que esta não pode ser a única considerada para a regionalização de vazões mínimas, notadamente em bacias com área de drenagem inferior a 100km².

A título de comparação, a figura 26 apresenta as chuvas médias anuais do período de 01/01/1984 a 30/11/2010 das estações pluviométricas utilizadas neste trabalho e a estação de referência que o modelo adotou para cada sub-bacia. O modelo efetua o processo de regionalização das chuvas pelo método de Thiessen.

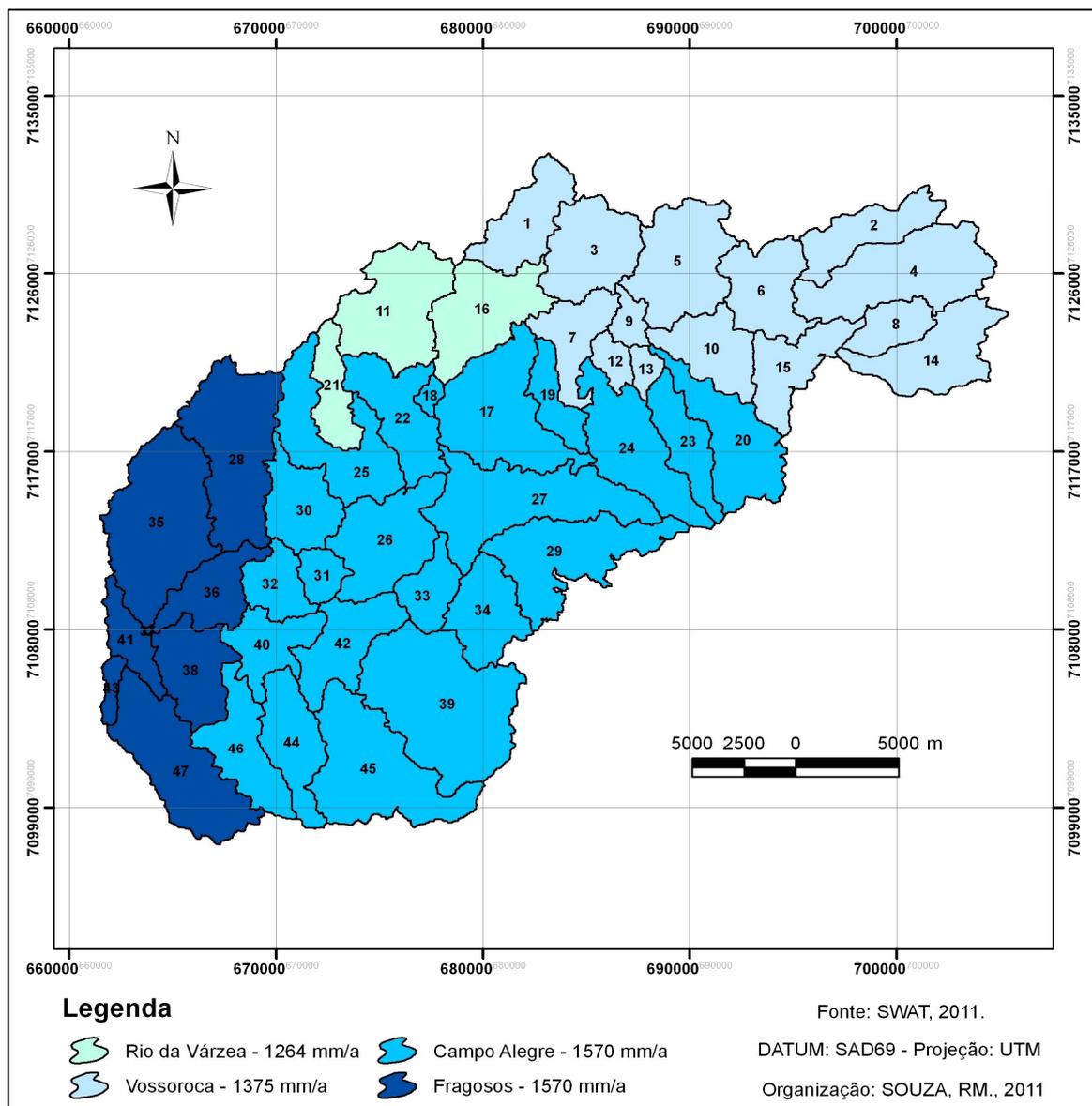


Figura 26 – Volume médio anual de precipitação das estações pluviométricas

Comparando a figura 26 com a figura 24, verifica-se que não existe uma relação direta entre as vazões q95 simuladas e as precipitações médias do período do estudo. A sub-bacia 05, que apresentou a menor q95 simulada e a sub-bacia 08, que apresentou a maior q95 simulada, estão sobre influência da mesma estação pluviométrica (Vossoroca) a qual não apresenta os extremos em relação ao volume precipitado. Novamente evidencia-se a complexidade dos elementos que influenciam o regime de escoamento das vazões mínimas. Destaque na figura para as médias de precipitação anual das estações de Fragosos e Campo Alegre, que apresentaram o mesmo valor no período de 01/01/1984 a 30/11/2010.

Portanto, perante a complexidade de fatores que influenciam as vazões mínimas, optou-se por realizar uma correlação com todos os elementos da tabela 12, com o propósito de verificar qual daqueles elementos apresenta maior correlação com a vazão q95 simulada. A tabela 13 mostra a matriz de correlação obtida.

TABELA 13 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE q95 SIMULADA E ELEMENTOS DA BACIA

	q95	RL	CX	LB	NX	GM	PVA	F.O.M	PAST	AGRL	PINUS	Ad (km ²)	PMA (mm)
q95	1,00												
RL	0,42	1,00											
CX	-0,40	-0,47	1,00										
LB	-0,01	-0,21	0,36	1,00									
NX	0,15	-0,37	-0,25	-0,30	1,00								
GM	0,34	-0,17	0,07	0,24	-0,16	1,00							
PVA	-0,27	-0,18	-0,41	-0,12	-0,25	0,04	1,00						
F.O.M	-0,26	-0,18	0,13	0,31	0,07	0,05	-0,10	1,00					
PAST	0,69	0,51	-0,32	0,24	-0,19	0,18	-0,13	-0,22	1,00				
AGRL	0,16	-0,14	-0,41	-0,38	0,36	-0,14	0,38	-0,22	-0,36	1,00			
PINUS	-0,57	-0,21	0,55	-0,13	-0,19	-0,08	-0,13	-0,36	-0,45	-0,36	1,00		
Ad (km ²)	0,28	-0,08	0,07	-0,03	-0,09	0,55	0,00	0,09	0,04	-0,09	-0,03	1,00	
PMA (mm)	-0,03	-0,45	0,02	-0,35	0,59	0,02	-0,04	0,01	-0,49	0,38	0,12	0,32	1,00

FONTE: SWAT, 2011; Org. SOUZA, R.M.

NOTA: RL: Neossolo – CX: Cambissolo – LB: Latossolo – NX: Nitossolo – GM: Gleissolo – PVA: Argissolo FOM: Floresta Ombrófila Mista – PAST: Pastagens – AGRL: Agricultura – Ad: área de drenagem - P.M.A: precipitação média anual

Analisando a matriz de correlação, percebe-se que o uso do solo do tipo pastagem apresenta a maior correlação com a vazão q95 simulada, seguida pelo

solo do tipo neossolo. A título de ilustração, a figura 27 mostra a relação entre a q95 simulada e a proporção de cobertura do solo por pastagens nas sub-bacias.

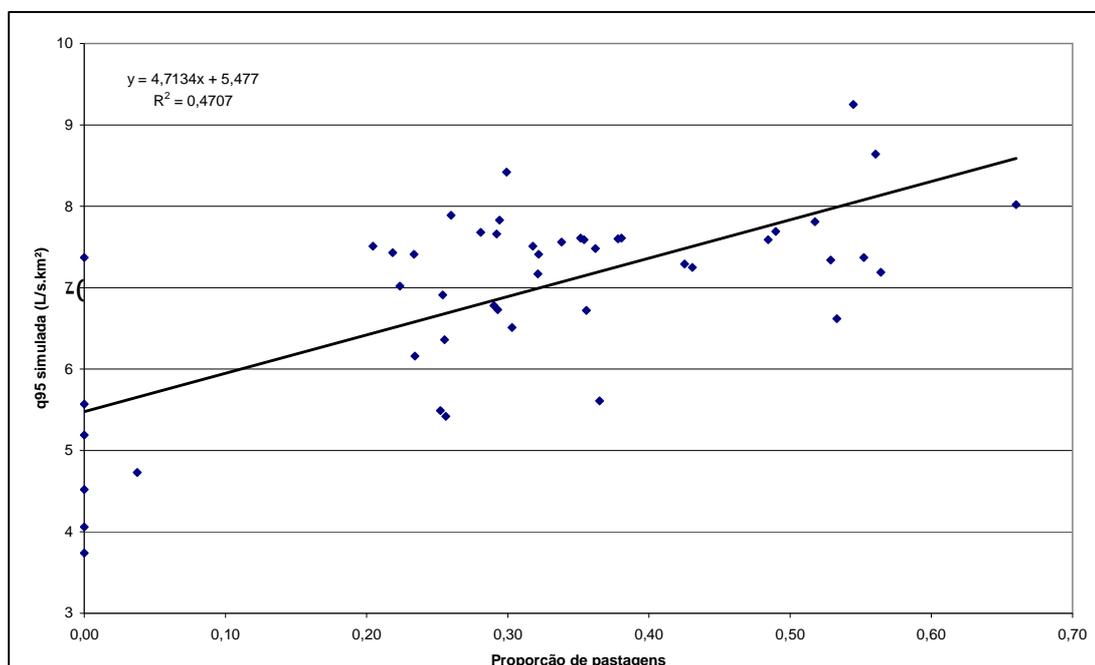


Figura 27 – Modelo de regressão entre proporção de pastagens e q95 simuladas

Nota-se que a pastagem é o elemento que apresenta maior correlação com a vazão q95 simulada, assim quanto maior a proporção de pastagem, maior a vazão mínima simulada. Porém, esse coeficiente não é suficiente para explicar o comportamento das vazões mínimas. Denota-se que características isoladas são incapazes de explicar a espacialidade das vazões mínimas simuladas pelo modelo SWAT.

A figura 28 apresenta o resultado da aplicação do modelo de regressão múltipla com todos os elementos da tabela 12, ou seja, doze elementos. Os coeficientes obtidos na regressão são aplicados para obtenção da q95 prevista, a qual é comparada com a q95 simulada pelo modelo SWAT.

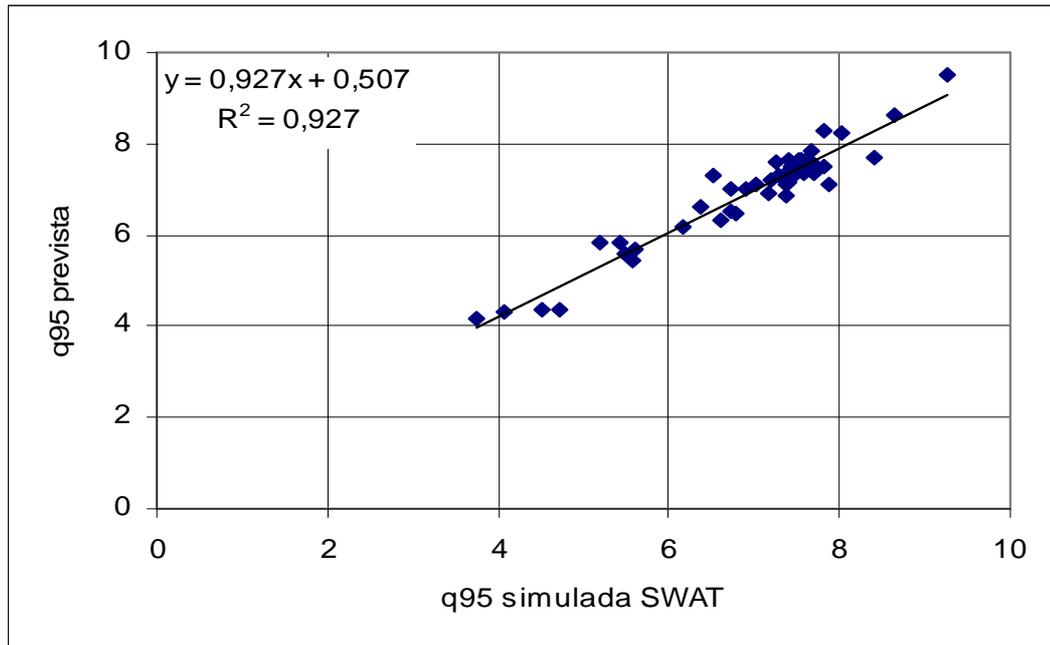


Figura 28 – Modelo de regressão com diversos elementos

A figura 28 mostra a estreita relação entre os elementos utilizados nesta regressão e as vazões q95 simuladas, com R^2 de 0,93. Este resultado comprova a teoria sobre as vazões mínimas, mostrando que os elementos citados de forma recorrente realmente podem ser utilizados para sua estimativa na bacia estudada.

A figura 29 apresenta a análise de resíduos da regressão com diversos elementos.

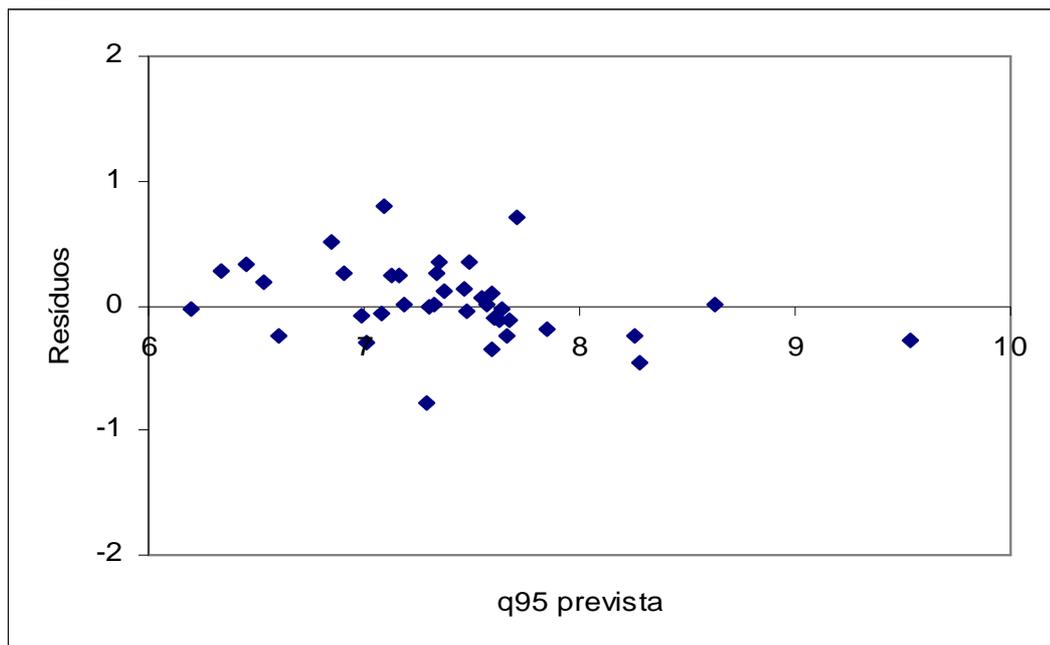


Figura 29 – Análise de resíduos da regressão com diversos elementos

Para que uma regressão apresente boa qualidade, sem valores que possam desequilibrar o resultado, os resíduos devem estar distribuídos de forma equilibrada abaixo e acima da linha do 0. A figura 29 mostra este comportamento, ou seja, o desempenho da regressão não está sendo influenciado por possíveis erros nos dados utilizados.

Segundo Tucci e Clarke (1997), alterações na superfície de uma bacia hidrográfica causam impactos significativos sobre o escoamento, afetando o comportamento das enchentes, as vazões médias e as vazões mínimas. Neste contexto, realizou-se uma regressão entre as vazões q95 simuladas e a porcentagem de ocorrência dos diferentes usos do solo nas sub-bacias, conforme figura 30.

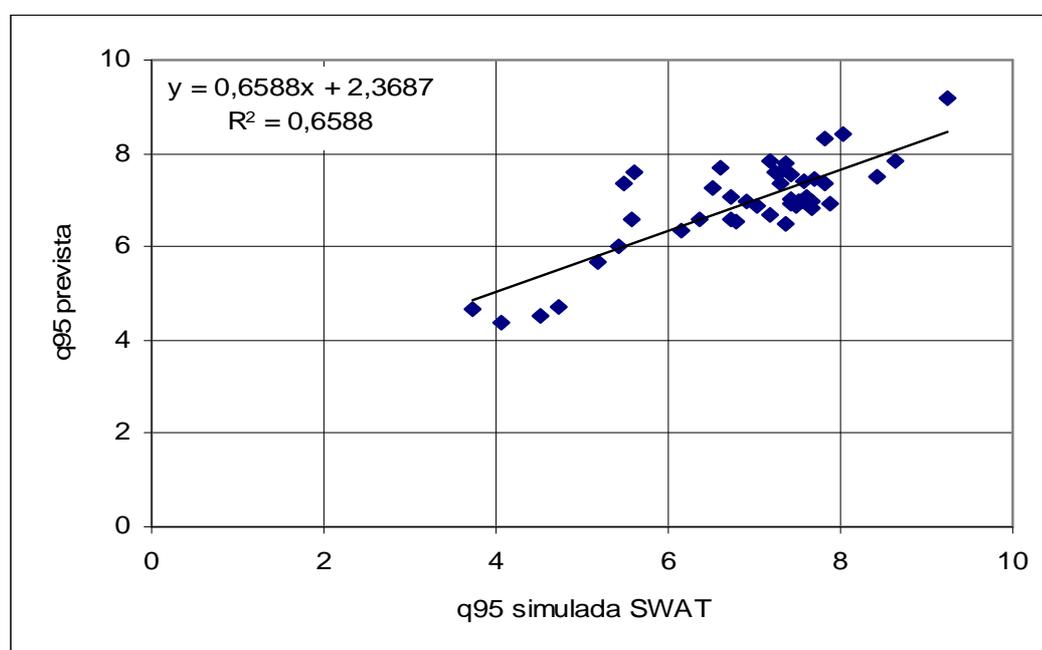


Figura 30 – Modelo de regressão com usos do solo

Nota-se que existe uma boa relação entre as vazões mínimas simuladas e as previstas pela regressão com usos do solo, com R^2 0,66, contudo não superior a regressão com diversos elementos. Pode atribuir este resultado a variabilidade de usos das sub-bacias. A bacia apresenta uma boa porcentagem de usos com cobertura vegetal (78%), distribuído em 45% de Floresta Ombrófila Mista, 28% de pastagens/campos e 5% de reflorestamento. Como estes usos não estão concentrados, as sub-bacias apresentam uma boa cobertura vegetal, refletindo no bom desempenho da regressão.

A análise de resíduos do modelo de regressão com usos do solo é apresentada na figura 31.

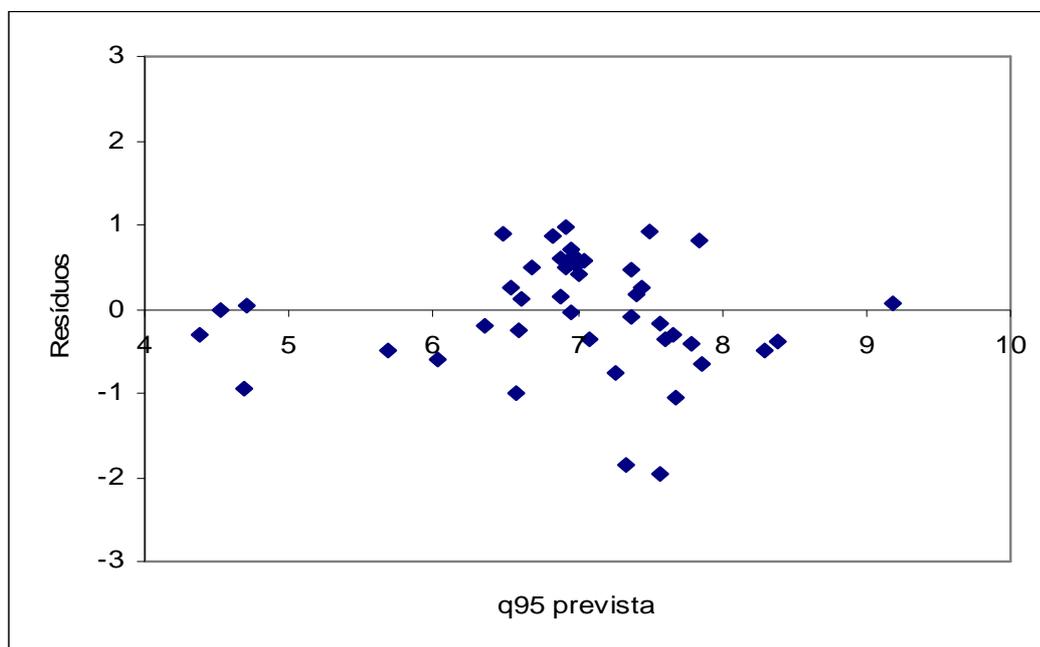


Figura 31 – Análise de resíduos do modelo de regressão com usos do solo

Conforme mostra a figura 31, a análise de resíduos desta regressão também mostra que a regressão não está sendo influenciada por erro nos dados de entrada.

Smakthin (2001) cita que as descargas de águas subterrâneas, de lagos, pântanos ou do derretimento de geleiras são alguns dos processos responsáveis pela geração das vazões mínimas. As descargas de águas subterrâneas são oriundas de aquíferos, os quais podem ser confinados em rochas ou em meio poroso, ou seja, o solo funcionando com um aquífero. Desta forma optou-se por realizar uma regressão entre as vazões q95 simuladas e a porcentagem de ocorrência dos diferentes tipos de solo nas sub-bacias, com os resultados mostrados na figura 32.

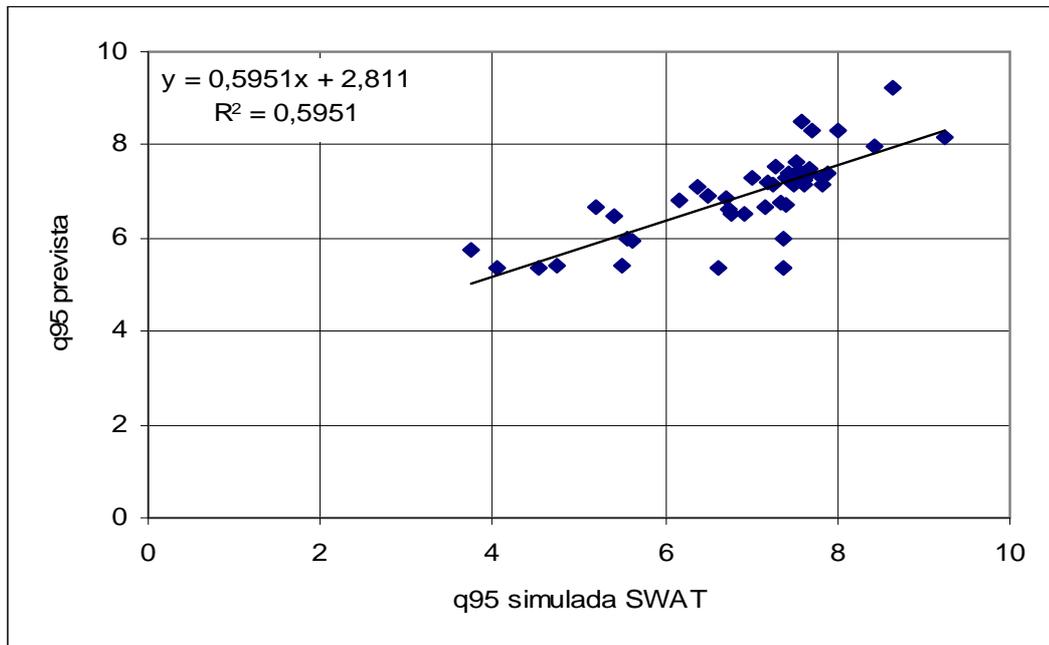


Figura 32 – Modelo de regressão com tipos de solo

O resultado mostra que 60% do comportamento das vazões mínimas simuladas pode ser explicado pelos tipos de solos das sub-bacias

A figura 33 mostra a análise de resíduos desta regressão.

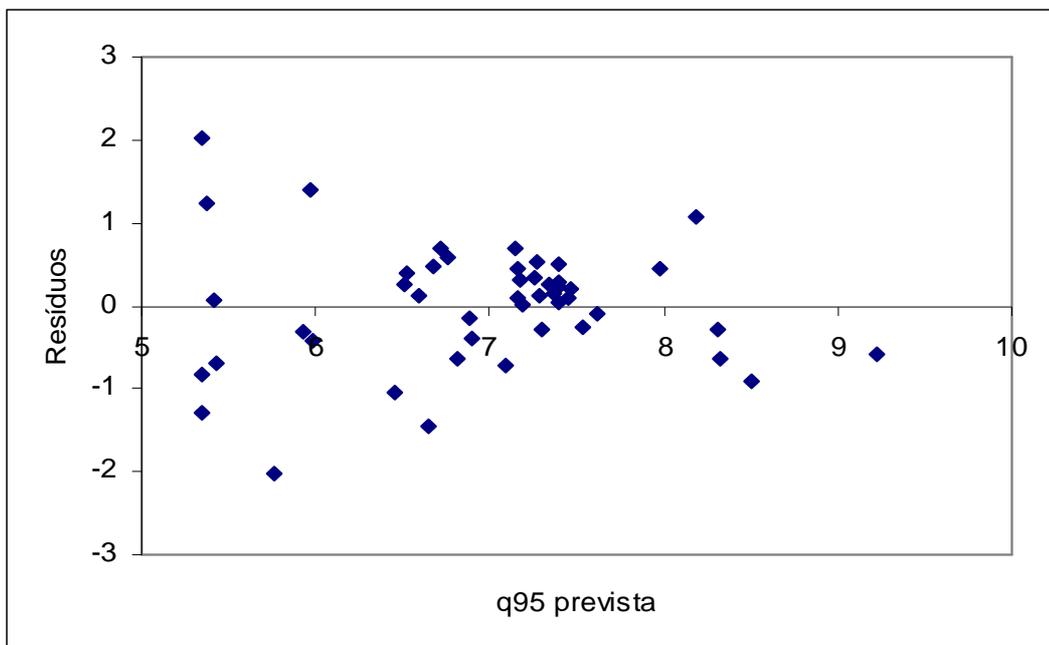


Figura 33 – Análise de resíduos do modelo de regressão com solos

Conforme mostra a figura 33, a qualidade dos dados utilizados para a regressão é satisfatória.

Os resultados obtidos com as técnicas de correlação e regressão comprovaram a teoria sobre as vazões mínimas, mostrando que os elementos citados de forma recorrente realmente podem ser utilizados para sua estimativa. Por outro lado, os resultados alertaram para o erro que pode-se cometer ao utilizar somente uma variável em estudos de estimativa destas vazões. Além de comprovar a teoria das vazões mínimas, os resultados indicaram que o modelo SWAT representou de forma satisfatória o comportamento hidrológico da bacia do Altíssimo Rio Negro.

Ainda com relação ao SWAT, constata-se que a variação espacial dos resultados simulados pelo modelo guarda relação com as características físicas das sub-bacias, as quais são variáveis de entrada e compõem os bancos de dados do modelo. Ou seja, a complexidade estrutural do modelo SWAT garante a representatividade física do sistema representado.

4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Devido à variabilidade espacial das vazões mínimas simuladas da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, optou-se pela realização de medições em campo para comprovar a eficácia do modelo SWAT para a regionalização de vazões. As medições foram realizadas nos dias 08/07/2010, 31/08/2010 e 21/09/2010, em épocas de vazões médias. O intuito era realizar estas medições em épocas de vazões baixas, mas devido a condições climáticas não foi possível. No dia 21/09/2010, nem todas as medições foram satisfatórias, pois a ocorrência de uma forte precipitação comprometeu os dados, sendo então estes desconsiderados. Foram medidas as seguintes bacias: 01, 03, 11, 21, 28, 33, 39, 44, 45 e 46, conforme mostra a figura 34. Na tabela 14, são apresentados os valores das vazões medidas e simuladas das sub-bacias.

TABELA 14 – VAZÕES MEDIDAS E VAZÕES SIMULADAS

Sub-bacia	8/7/2010		31/8/2010	
	q medidas (L/s.km ²)	q simuladas (L/s.km ²)	q medidas (L/s.km ²)	q simuladas (L/s.km ²)
1	24,25	26,7	23,59	21,62
3	25,67	27,7	21,48	22,38
11	23,10	12,85	19,46	15,29
21	19,81	9,92	15,64	12,16
28	21,74	17,93	19,18	17,19
33	18,22	21,21	12,53	19,37
39	16,38	22,79	12,00	20,8
44	14,12	30,64	11,55	28,47
45	15,00	27,57	12,19	25,18
46	12,25	27,79	8,58	25,56

FONTE: SWAT (2010); SOUZA (2011)

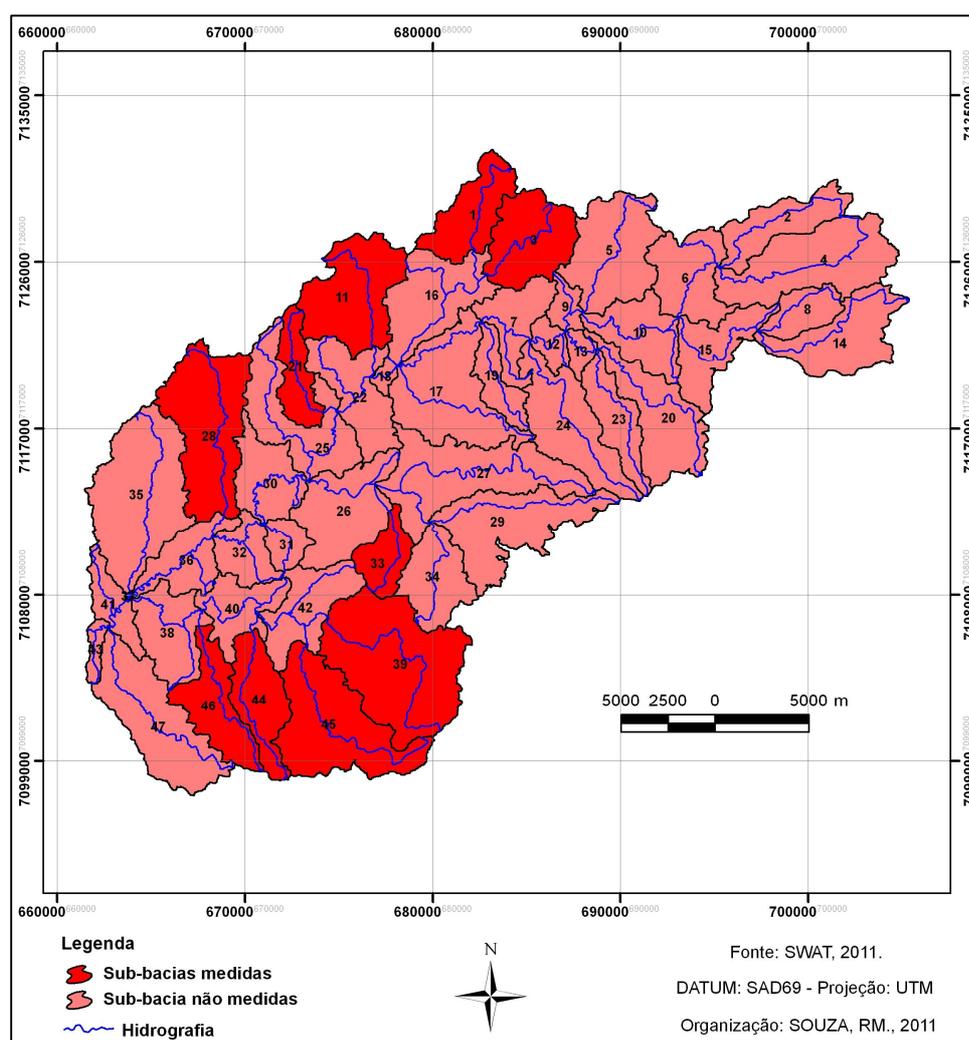


Figura 34 – Localização das sub-bacias medidas

As medições efetuadas no dia 08/07/2010 foram realizadas perante uma vazão com permanência Q31 – período de 01/01/1984 a 30/11/2010. A figura 35 mostra as vazões medidas no dia 08/07/2010 comparadas com as vazões simuladas neste dia pelo modelo SWAT.

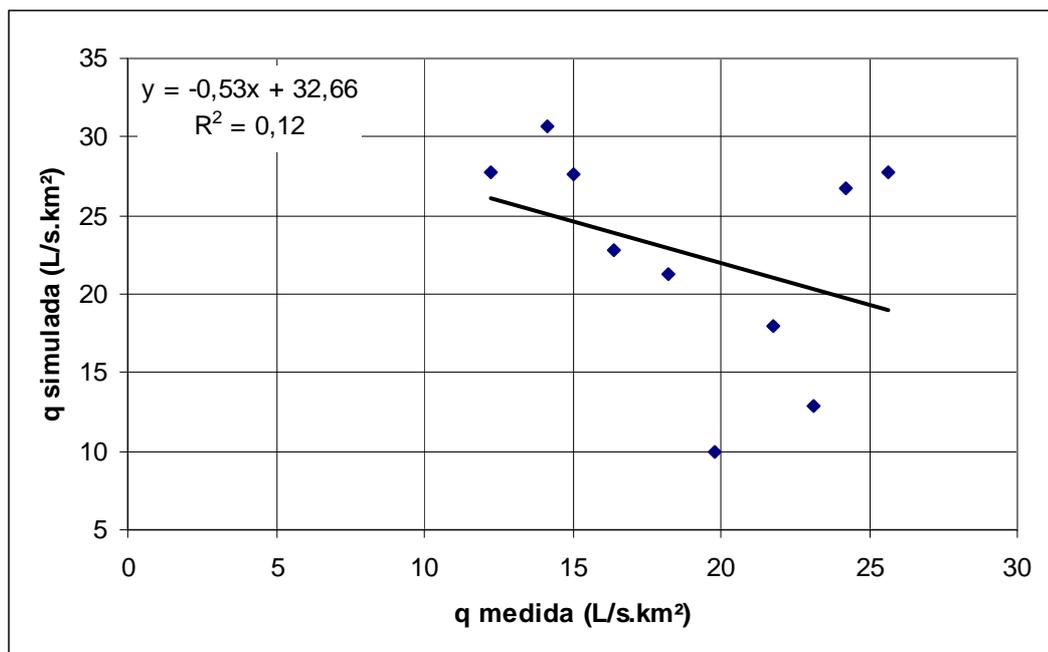


Figura 35 – Comparativo entre vazões medidas e simuladas no dia 08/07/2010

A análise da figura mostra que o modelo não regionalizou de forma adequada as vazões medidas em campo neste dia. No dia 08/07/2010, a vazão observada no exutório da bacia do Altíssimo Rio Negro foi 18,00 m³/s (22,84 L/s.km²) e a vazão simulada foi de 18,43 m³/s (23,39 L/s.km²), apresentando uma diferença bem menor do que a mostrada na figura. Nota-se também que existe uma tendência de relação inversa entre as vazões.

As medições efetuadas no dia 31/08/2010 foram realizadas perante uma vazão com permanência de Q40. A figura 36 mostra as vazões medidas no dia 31/08/2010 comparadas com as vazões simuladas neste dia pelo modelo SWAT.

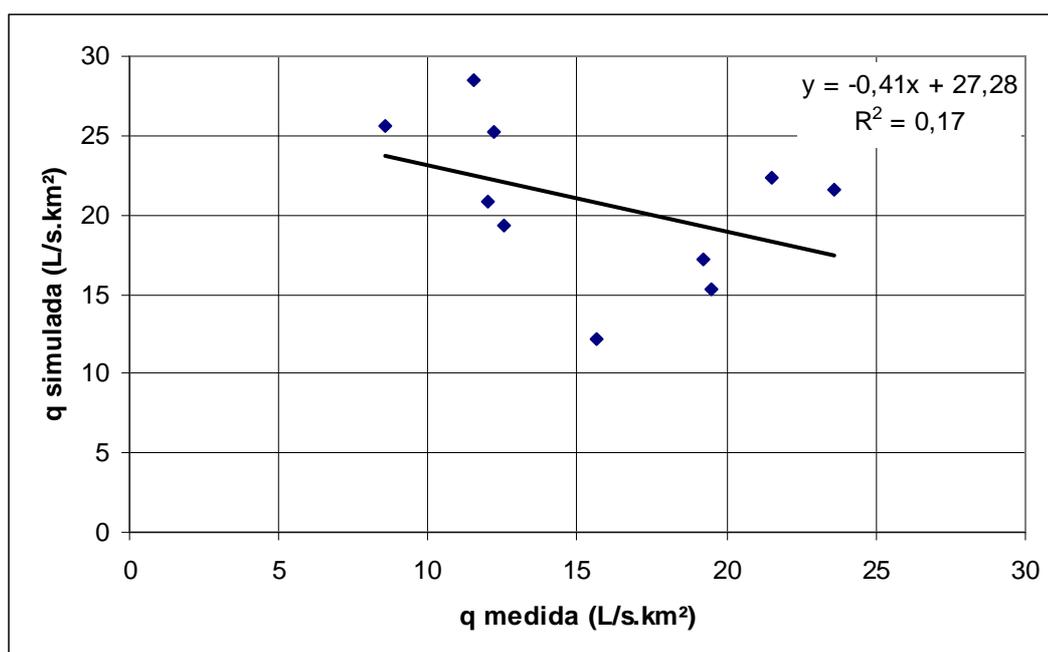


Figura 36 - Comparativo entre vazões medidas e simuladas no dia 31/08/2010

Como pode-se observar na figura 36, as vazões regionalizadas pelo modelo neste dia também não apresentaram bons resultados. A vazão observada neste dia no exutório da bacia do Altíssimo Rio Negro foi de 16,08 m³/s (20,41 L/s.km²) e a vazão simulada foi de 16,68 m³/s (21,17 L/s.km²). Como nas medições anteriores, a tendência de relação inversa entre as vazões medidas e simuladas se mantém.

As figuras 37 e 38 mostram a variabilidade das vazões medidas e simuladas com relação à área de drenagem, respectivamente para os dias 08/07/2010 e 31/08/2010.

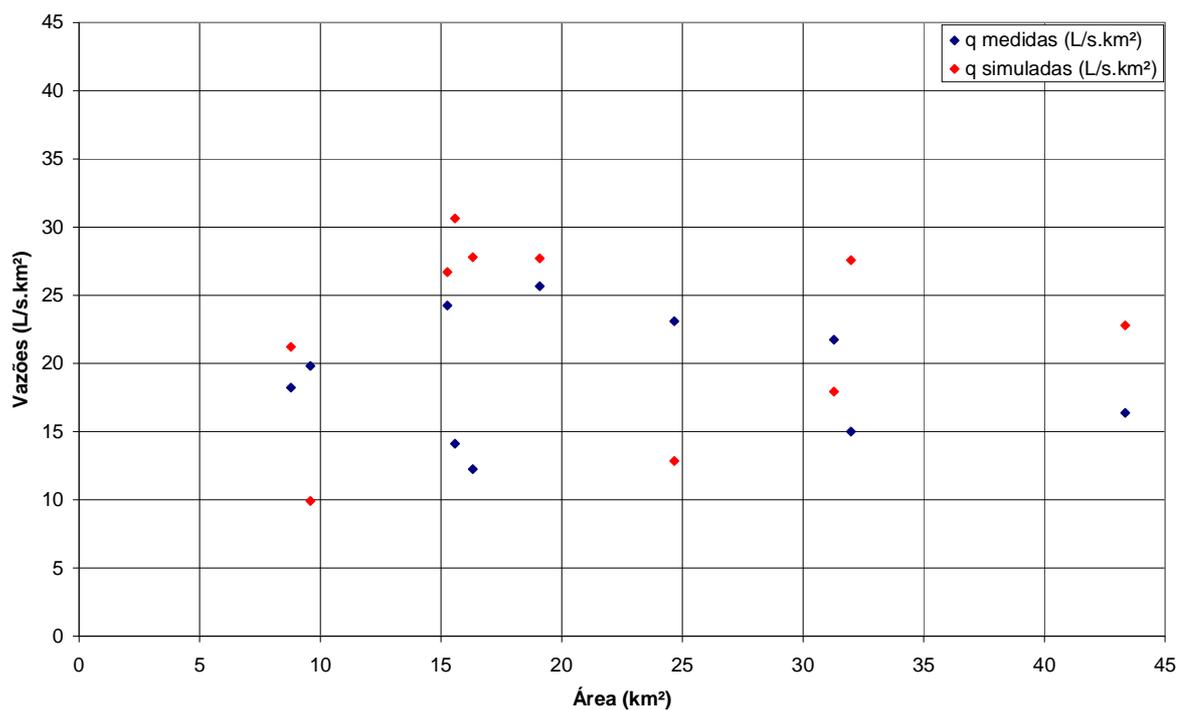


Figura 37 – Vazões medidas e simuladas no dia 08/07/2010

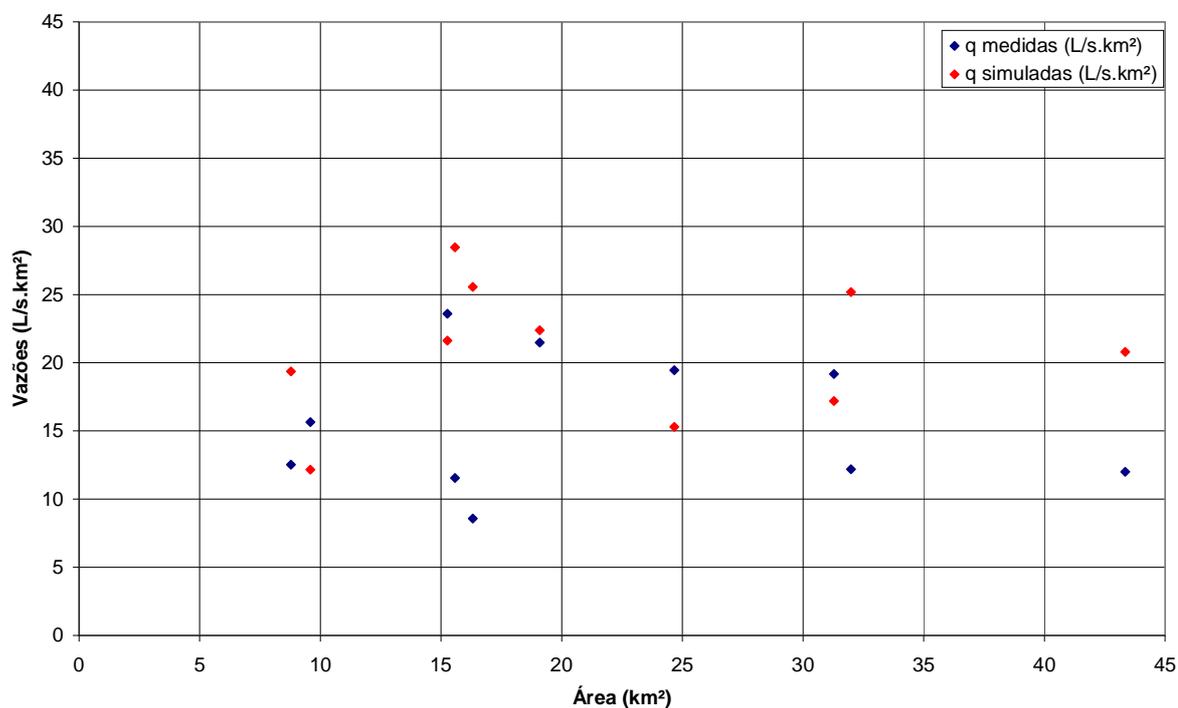


Figura 38 – Vazões medidas e simuladas no dia 31/08/2010

Verifica-se nas figuras que a variabilidade das vazões simuladas, conforme a área de drenagem é levemente superior a das vazões medidas. Pode-se deduzir que o modelo não está regionalizando de forma adequada as vazões.

Conforme mostrado na figura 22, as vazões medidas estavam próximas da média do período de 01/01/1984 a 30/11/2010, que equivale à vazão Q33. Segundo Tucci (2002), possíveis variáveis para regionalizar as vazões médias são a área de drenagem e a precipitação média. Desta forma, realizou-se uma regressão com estas variáveis. A figura 39 mostra o resultado deste procedimento para as medições do dia 08/07/2010 e a figura 40 a análise de resíduos.

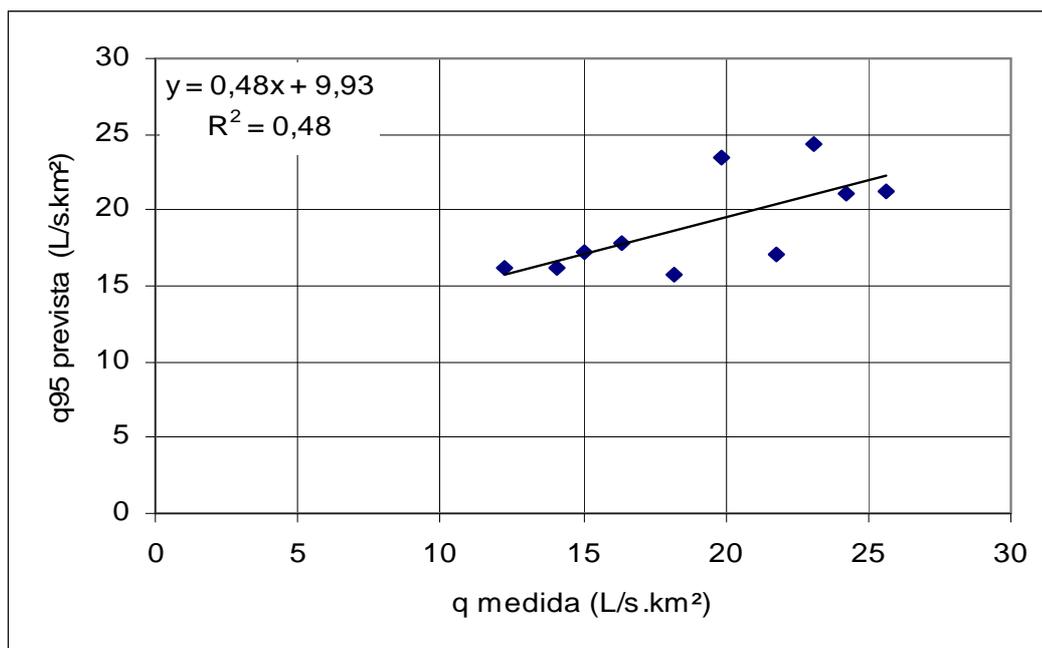


Figura 39 – Modelo de regressão das medições de 08/07/2010, com área de drenagem e precipitação média.

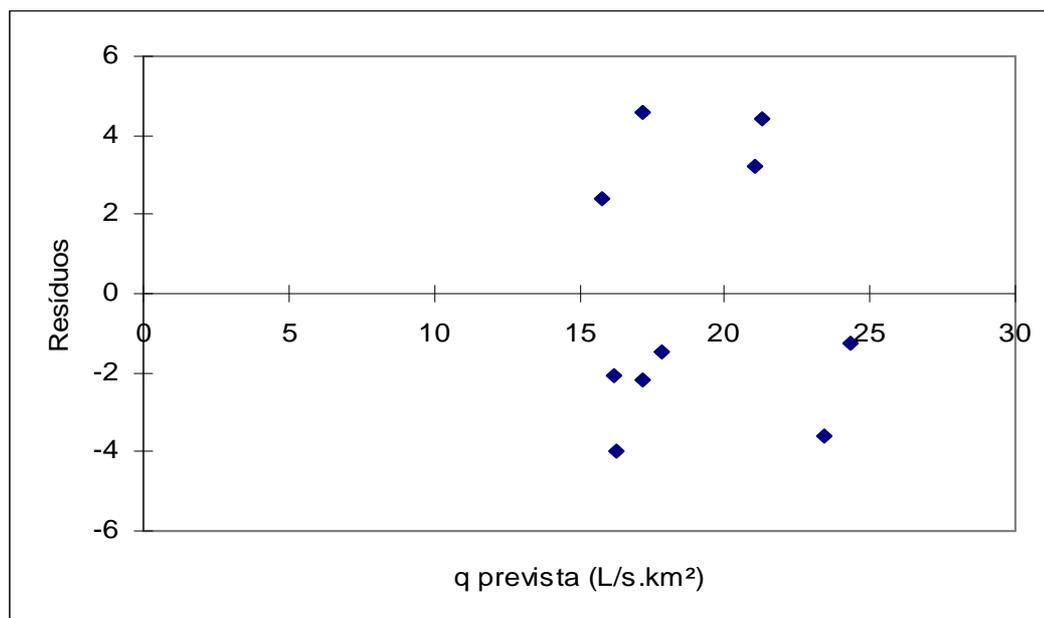


Figura 40 – Resíduos da regressão com área de drenagem e precipitação média para medições de 08/07/2010

As figuras 41 e 42 mostram, respectivamente, as regressões das medições realizadas no dia 31/08/2010, utilizando as variáveis área de drenagem e precipitação média.

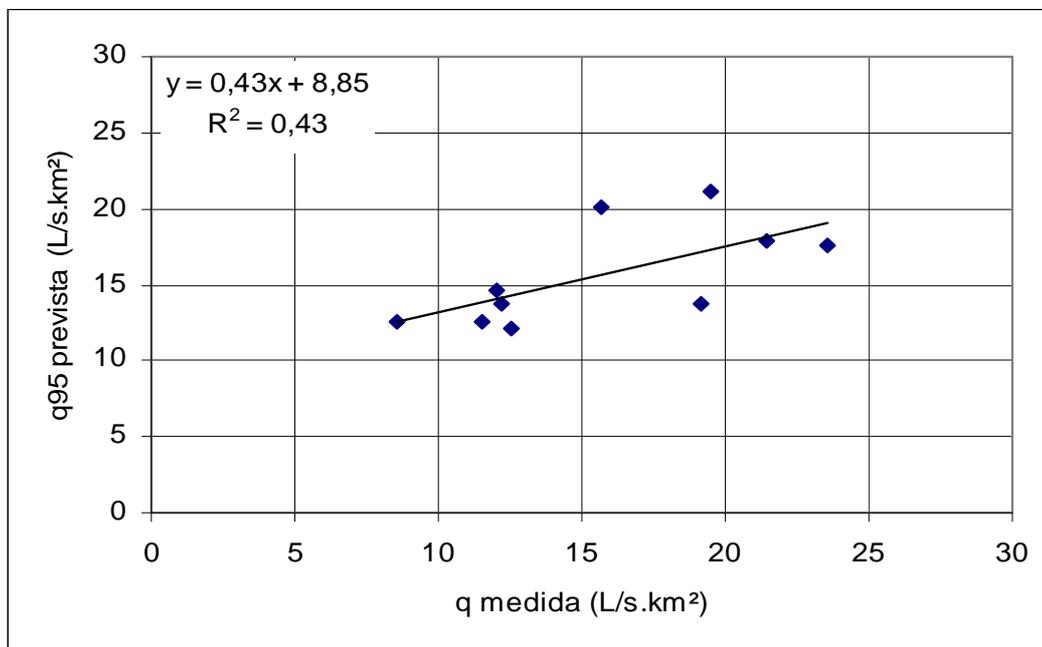


Figura 41 – Modelo de regressão das medições 31/08/2010, com área de drenagem e precipitação média.

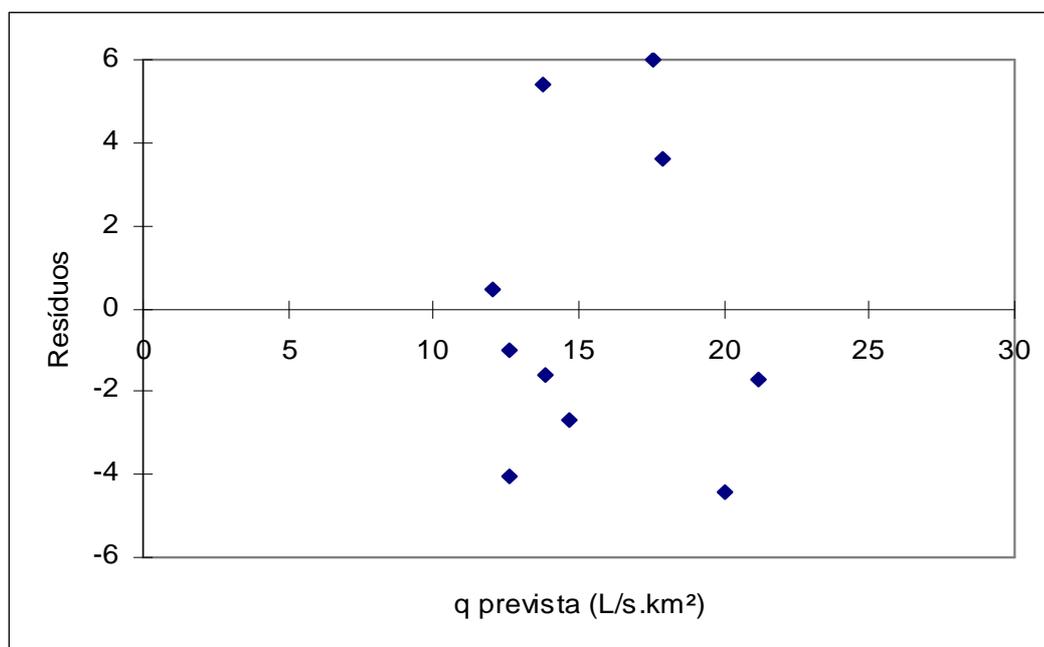


Figura 42 – Resíduos da regressão com área de drenagem e precipitação média para medições de 31/08/2010

Assim como as vazões medidas no dia 08/07/2010, os valores das vazões medidas no dia 31/08/2010 não são explicados unicamente pela área de drenagem e pela precipitação média. Considerando o raciocínio de Tucci (2002), os resultados apresentados na figura 39 deveriam ser superiores aos mostrados na figura 41, pois os primeiros estão mais próximos da média. Conforme mostraram as figuras, este comportamento foi verificado.

A análise de resíduos a partir da figura 42 indica que esta regressão não apresenta uma qualidade muito alta.

Conforme mostraram as figura 39 e 41, a utilização das duas variáveis recomendadas por Tucci (2002) não foi suficiente para estimar as vazões medidas em campo.

Perante o resultado acima, optou-se por realizar regressões com os mesmo elementos que apresentaram os melhores resultados na estimativa de vazões mínimas simuladas, a saber: tipos de solos, usos do solo, área de drenagem e precipitação média anual. As figuras 43 e 44 apresentam regressões das vazões medidas nos dias 08/07/2010 31/08/2010, respectivamente.

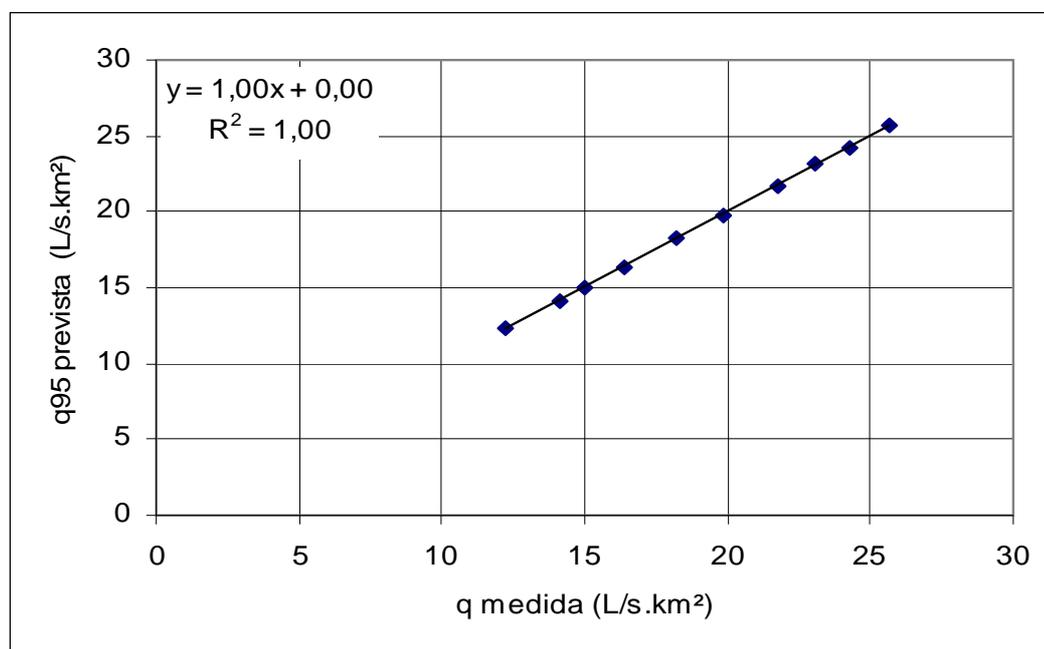


Figura 43 – Modelo de regressão com diversos elementos – medições de 08/07/2010

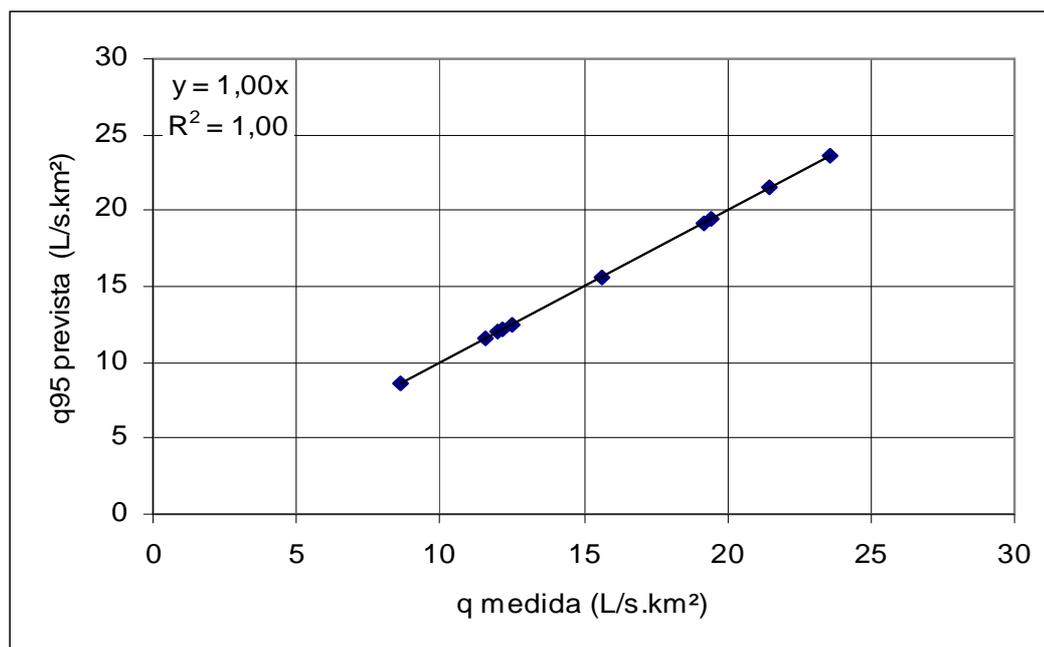


Figura 44 – Modelo de regressão com diversos elementos – medições de 31/08/2010

Pode-se observar nas figuras 45 e 46 que os mesmos elementos que apresentaram os melhores resultados na estimativa de vazões mínimas simuladas são explicativos das vazões medidas em campo. Portanto, a variabilidade espacial das vazões medidas é integralmente explicada pelas características físicas consideradas pelo modelo SWAT na caracterização das sub-bacias.

5. CONCLUSOES

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a estimativa de vazões mínimas efetuada com a aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. Como objetivos específicos, simulou-se as vazões diárias da bacia no período de 01/01/1984 a 30/11/2010 e foi realizada uma avaliação, com o auxílio de técnicas estatísticas, do comportamento das vazões mínimas simuladas e da regionalização de vazões efetuada pelo modelo SWAT.

A simulação apresentou ajuste satisfatório, principalmente no que diz respeito a vazões mínimas, com logCOE 0,76. A calibração automática, apesar de representar de forma satisfatória o comportamento da bacia, apresentou problemas nos valores dos parâmetros, estipulando valores elevados que não possuíam representação física.

A avaliação do comportamento das vazões simuladas foi realizada com auxílio de métodos estatísticas. Conforme resultados obtidos, notou-se que ao estimar estas vazões, o modelo SWAT considera as variáveis adequadamente na sua estrutura. Este resultado é significativo, mostrando que modelo pode representar a física de bacias hidrográficas de forma coerente. No entanto, a distribuição espacial dos resultados da simulação, embora guardem estreita relação com estas variáveis, apresentam erros significativos, como mostrado na regionalização das vazões Q31 e Q40.

Elaboram-se três hipóteses para explicar a limitação do modelo SWAT na regionalização.

A primeira é a qualidade da calibração, a qual apresentou um valor satisfatório do logCOE. Porém, para regionalizar as vazões de forma adequada o modelo pode necessitar de uma calibração com COE mais elevado.

Outra hipótese é que o erro da regionalização realizada pelo modelo está relacionado ao fato do mesmo não considerar a geologia e o aquífero profundo na simulação. Estes elementos têm influência fundamental no armazenamento de água. Desta forma, o modelo pode ser limitado para regionalizar vazões, principalmente nas recessões.

A terceira hipótese diz respeito aos valores ou ao conjunto dos parâmetros utilizados. Apesar de ajustar a vazão para a bacia como um todo, podem não estar

representando adequadamente a física da bacia. Assim, recomenda-se simular com outros valores ou conjunto para uma nova avaliação do processo de regionalização do modelo SWAT.

Em relação à regionalização de vazões mínimas, em virtude das medições em campo estarem subordinadas a ocorrência destes eventos durante o tempo da pesquisa, não foi possível avaliar a competência do modelo para tal, pois as medições foram realizadas com vazões próximas da média.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do modelo SWAT em outras bacias para verificar se os erros de regionalização aqui encontrados podem ser atribuídos a limitações do modelo ou às hipóteses aqui levantadas.

Sugerem-se medições em mais sub-bacias, procurando assim criar um banco de dados de vazão para bacias menores.

REFERENCIAS

ABDULLA, F. A; LETTENMAIER, D. P. Development of Regional Parameter Estimation Equations for a Macroscale Hydrologic Model. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 197, p. 230 – 257, 1997

AGRA, S.D., SOUZA, V.C.B., NEVES, M.G.F.P., CRUZ, M.A.S. **Metodologias de regionalização de vazões: estudo comparativo na bacia do Rio Carreiro – Rs**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-Pr, 2003. p 01 -20.

ASSANI, A.A., TARDIF, S., BENSEGHIR, S., CHALIFOUR, A., MHAMED, M., Desenvolvimento de um novo método de regionalização baseado sobre o conceito de “regime de fluxo naturais”: o método Écogeográfico. **Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science**, Paris, v. 19, n° 4, pag. 365-380, 2006

BAENA, L. G. N; SILVA, D. D; PRUSKI, F.F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista de Engenharia Agrícola da UNESP**, Jaboticabal/SP. v. 24, nº 3 p. 612-624, 2004. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n3/a13v24n3.pdf>

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (soil and water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 148p. Dissertação (Mestrado em física e meio ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BEVEN, K.J. **Rainfall – Runoff Modelling: the primer**. John Wilwey & Sons Ltda. Chichester, England, 2001.

CASTIGLIONI,S.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A. **Prediction of low-flow indices in ungauged basins throught physiographical space-based interpolation**. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 378, p272-280, 2009

CHARLISE, S.R; KANSAKAR, S.R; REES, G; CROKER, K; ZAIDMAN, M. Management of water resources and low flow estimation for the Himalayan basin of Nepal. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 282. pg. 25-35, 2003

CHAVES, H. M. L; ROSA, J. W. C; VADAS, R. G; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.

CHORLEY, R.J., HAGGETT P. **Modelos físicos e de informação em Geografia**. São Paulo. EDUSP, 1975 – cap. 1 – pg. 01 a 18

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo-Sp. 1999. cap 02, p 19-34

CIBIN, R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 24. pg. 1133-1148, 2010.

DINIZ, L. S. **Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais**. 213p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2008.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S/A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, v. 1, 1985.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS**, 10, 1979. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006, 306p.

FILL, H.D. Informações hidrológicas. In: **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo, Nobel/ABRH, 1987. p. 95- 210

FILL, H.D.; ROHN, M.C. Regionalização da vazão $Q_{10,7}$ na bacia do Alto Ribeira, através de mínimos quadrados ponderados. **Revista Engenharia e Construção**, nº 74. Ed. Luso-Brasileira, Curitiba/PR, 2002. p 41-46

FIGUEIREDO, A.; OLIVEIRA, L.; FRANCO, A.; Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3 nº 2, pg. 62 – 76, 2008. Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/132/206>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2010.

FUNKHOUSER, J.E.; ENG, K.; MOIX, M.W. **Low-flow characteristics and regionalization of low-flow characteristics for selected streams in Arkansas**: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 5065, 161 p. 2008

GASSMAN *et al.* **The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions**. Center for agricultural and rural development, Iowa State University. Disponível em <http://www.card.iastate.edu/publications/DBS/PDFFiles/07wp443.pdf>. Acesso em 01/12/2008.

GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. Spatial modelling of catchment dynamics. In: GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. **Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modeling**. Published by Cambridge University Press, 2000b. p.51-81.

HUNDECHA HIRPA, Y. **Regionalization of parameters of a conceptual rainfall-runoff model**. 129p. Tese (Doutorado em Engenharia). Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2005.

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SCRINIVASAN R. . **Soil and water assessment tool–SWAT**. USDA, Agricultural Research Service. 450p. 1996.

LACERDA JÚNIOR, H.B. **Um estudo dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do modelo NAVMO com dados de bacias do Cariri paraibano**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande/PB, 2002.

LAAHA, G. e BLÖSCHL, G. Low Flow Estimates from Short Stream Flow Records – a comparison of methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 306, p. 264-286, 2005

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos, 2002. 178 p.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI P.A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. **Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços**. Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas, 1989. Fundação Cargill, p. 99-124.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 152 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.

MATEUS, R.S. **Modelo hidrológico da bacia hidrográfica da represa Guarapiranga – São Paulo, SP**. Dissertação mestrado em Geografia Física, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Programa de pós-graduação em Geografia física. Universidade de São Paulo, 2006. 154p

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre, ABRH, 2001.

MENDONÇA F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo. Oficina de textos, 2007.

MULLIGAN, M. Modelling Catchment Hydrology. IN. **Environmental modelling: finding simplicity in complexity**. Ed. WAINWRIGHT, J.; MULLINGAN, M. 1967. John Wiley e Sons, Ltda. cap.4 p107-123

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICES. **National Engineering Handbook**. Michigan, EUA, Department of Agriculture, 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R; KING, K.W. **Soil and water assessment tool**: Theoretical documentation, vs. 2000. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2002.

PEDROLLO, M. C., GERMANO, A. **Regionalização de vazões na bacia do Rio Tubarão**. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - Mg, 1999. p. 01-16

RAUDKIVI, A.J. **Hydrology**: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. Oxford; New York; Pergamon Press, 1979. cap. 11 – pg. 347-381.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. **Modelos hidrológicos para a gestão ambiental**. Relatório técnico parcial, Instituto nacional de pesquisas espaciais, Ministério da ciência e tecnologia 2000.

RIGGS, H.C. Estimating flow characteristics at ungauged. In REGIONALIZATION IN HYDROLOGY, 1990, Ljubljana. **Proceedings of the Ljubljana Symposium**. Wallingford/Oxfordshire, Reino Unido. IAHS publication n. 191. p. Disponível em http://iahs.info/redbooks/a191/iahs_191_0159.pdf. Acesso em 02/09/2009

RISLEY, J.; STONEWALL, A; HALUSKA, T. **Estimating flow-duration and low-flow frequency statistics for unregulated streams in Oregon**. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2008

RODRIGUEZ, R.D.G, **Proposta conceitual para regionalização de vazões**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). 268 p. Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal de Viçosa/MG. 2008.

SANT'ANA, R. F.; FIOR, M.T.B; KAVISKI, E. **Aproveitamento hidrelétrico de pequeno porte**: regionalização de vazões de estiagem, de curvas de permanência e de vazões máximas de pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná, vol. I a IV. Curitiba, CEHPAR, 1989.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental**: estudo da bacia hidrográfica do rio pequeno, São José dos Pinhais – Pr. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001

SANTOS, I, ANDRIOLO, M.V., GIBERTONI, R.C., PEREIRA FILHO, D.L.B., KAVISKI, E., MÜLLER, I.I., ROHN, M.C., NISHIDA, E., SILVA, R.C. **Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas**: modelagem da erosão e transporte de sedimentos. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Curitiba – PR, 2005.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica** – Tese (Doutorado em Geografia) 167p. Centro de Filosofia e Ciências Humanas - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2009.

SANTOS, I. ANDRIOLO, M.V., GIBERTONI, R.C. KOBIYAMA, M. Use of the SWAT model to evaluate the impact of different land use scenarios on discharge and sediment transport in the Apucarantina River watershed, southern Brazil. In: BANASIK, K.; HOROWITZ, A. J.; OWENS, P. N.; STONE, M.; WALLING, D. E.. (Org.). **Sediment Dynamics for a Changing Future**. 1ª ed. Wallingford: IAHS Press, 2010, v. 1, p. 322-328.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; 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**, vol. 10, nº 4, p. 05-18, 2005.

SCHULTZ, G.B., SOUZA, R.M., SANTOS, I. **Modelagem hidrológica distribuída e de base física: uma abordagem geossistêmica**. Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia. Recife/PE, 2010.

SILVA JÚNIOR, O.B., BUENO, E.O., TUCCI, C.E.M., CASTRO, N.M.R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 8, nº 1. p 21-37, 2003

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do Topmodel na Bacia do Rio Pequeno – Pr.** Dissertação de mestrado em Engenharia ambiental, programa de pós-graduação em Engenharia ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 144p

SILVEIRA, A. L. L.: SILVEIRA, G. L. Vazões mínimas. In: PAIVA, J. B. D; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre, ABRH, 2001. p. 125-164

SINGH, V.P. **Computer models of watershed hydrology**. Water resources publications, Colorado, use, 1995. – cap. 1 pg. 01 - 22

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v. 240, p. 147-186, 2001.

SOUZA, H. T. **Sistema computacional para a regionalização de vazões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) 86p. Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2009.

SOUZA, R.M. **O modelo SWAT como ferramenta de gestão de recursos hídricos: aplicação na bacia do Altíssimo Rio Negro**. Monografia de conclusão de curso. Geografia, UFPR, 2008. 61p.

SUGAI, M.R.V.B.; FILL, H.D.; GOMES, J. **A importância do monitoramento na gestão de recursos hídricos**. Anais do Simpósio internacional sobre gestão de recursos hídricos. Gramado-Rs, 1998.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto do desmatamento no comportamento hidrológico. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 2, nº 1, p. 135 – 152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade/UFRGS Porto Alegre – RS, 1998.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Regionalização hidrológica. In: PAIVA, J. B. D; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre, ABRH, 2001. p. 169-222.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões** – Porto Alegre. Ed. Universidade/UFRGS, 2002.

WATTS, G. Hydrological modelling in practice. In WILBY, R.L. (ed) **Contemporary Hydrology**. Towards Holistic Environmental Science. John Wiley e Sons, 1996. p. 151-193.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Low-flow: Estimation and Prediction**. Operation Hydrology Report, nº 50, 2008