

MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA E DE BASE FÍSICA: UMA ABORDAGEM GEOSISTÊMICA

Gilson Bauer Schultz - Bolsista CNPq ITI-A, Laboratório de Hidrogeomorfologia da Universidade Federal do Paraná (LHG/UFPR) Curitiba, PR, CEP 81531-990 - Caixa-Postal: 19001 - emaildogilson@hotmail.com;

Rodrigo Marcos de Souza - Bolsista CAPES, Laboratório de Hidrogeomorfologia da Universidade Federal do Paraná (LHG/UFPR) – rmarcos@globocom.com;

Irani dos Santos - Professor Doutor do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, Laboratório de Hidrogeomorfologia (LGH/UFPR) – irani@ufpr.br

RESUMO

O geossistema é um conceito utilizado para entender o funcionamento dos processos responsáveis pela dinâmica da paisagem, porém, devido a sua complexidade, necessita simplificações para uma abordagem aplicada. A modelagem matemática distribuída e de base física surge então como uma forma de representar os processos e o componente espacial do geossistema. O modelo SWAT foi aplicado na Bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira, e calibrado para o período de 1994 a 1998. Os resultados demonstraram que o processo de calibração possibilitou a simulação do comportamento dos processos hidrológicos do geossistema.

PALAVRAS-CHAVE: geossistema; SWAT; bacia hidrográfica; região sul brasileira

ABSTRACT

The geosystem is a concept used to understand the workings of the processes responsible for the dynamics of the landscape, but due to its complexity, requires simplifications to an applied approach. Distributed and physically based mathematical models appears then as a way to represent processes and the spatial component of geosystem. The SWAT model was applied to the Alto Rio Negro watershed, southern Brazil, and calibrated

for the period 1994-1998. The results showed that the calibration process has enabled the simulation of the behavior of geosystem's hydrological processes.

KEYWORDS: geosystem; SWAT; watershed; southern Brazil

1-INTRODUÇÃO

A complexidade dos sistemas ambientais naturais trouxe a necessidade de uma abordagem que considerasse sua dimensão estrutural e espacial. Bertrand (1972) *apud* Christofolletti (2002) definiu o geossistema (Fig. 1) como sendo o resultado da combinação dinâmica dos elementos físicos, biológicos e antrópicos, situado em determinada porção do espaço, que fazem da paisagem um conjunto único e indissociável e em constante evolução.

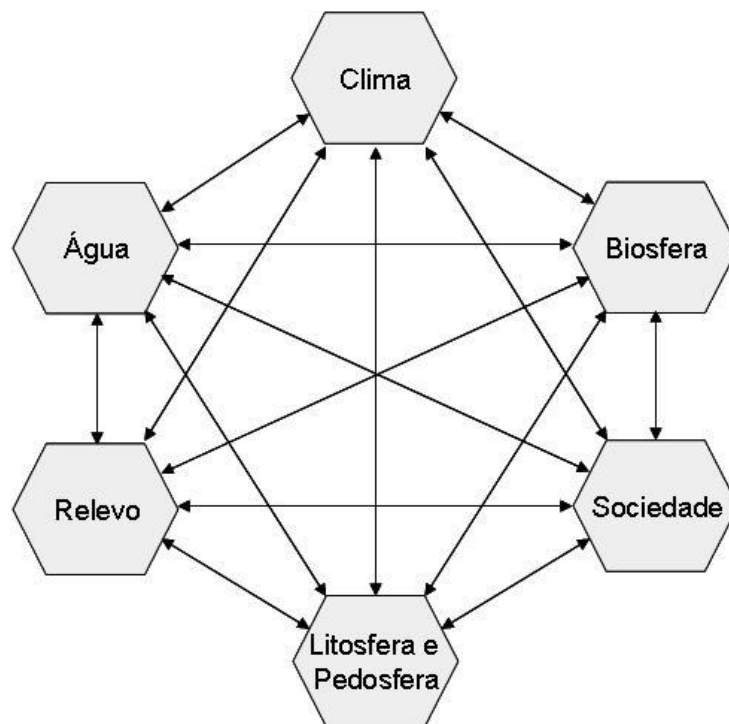


Figura 1 – Ilustração da organização de um geossistema – Fonte: Christofolletti (2002)

No geossistema ocorrem trocas de energia e matéria entre os seus componentes, e cada um sofre influência direta ou indireta de todos os demais. Nesta ótica, em estudos hidrológicos, para se entender os processos que controlam a produção da água em bacias hidrográficas, é preciso considerar todos os elementos do sistema.

Entre as principais problemáticas de estudo do geossistema que Sotchava (1977) propõe, destacam-se: a modelização do geossistema com base em seu regime natural; elaboração de métodos racionais para a avaliação quantitativa do sistema e dos processos de formação da paisagem, particularmente de ferramentas matemáticas adequadas à sua descrição; e o estudo da influência de fatores antrópicos no ambiente natural e prognose dos geossistemas.

A modelagem de sistemas naturais físicos é uma abordagem que permite juntar o conhecimento sobre os processos estudados, utilizando dados de monitoramento, com o objetivo de reproduzir o comportamento do sistema, proporcionando a compreensão deste e possibilitando o ganho de conhecimento sobre os processos modelados além, da constatação de comportamentos não considerados.

Segundo Santos (2009) em estudos de sistemas naturais, inicia-se estudando os processos a partir do monitoramento, e progressivamente, aumenta-se o conhecimento sobre o processo, conjuntamente com a melhora do monitoramento, até a conceituação possibilitar a construção de um modelo. A modelagem passa a permitir melhor entendimento dos processos e demandar novas medições, gerando assim uma cadeia de aproximações sucessivas (Fig. 2).

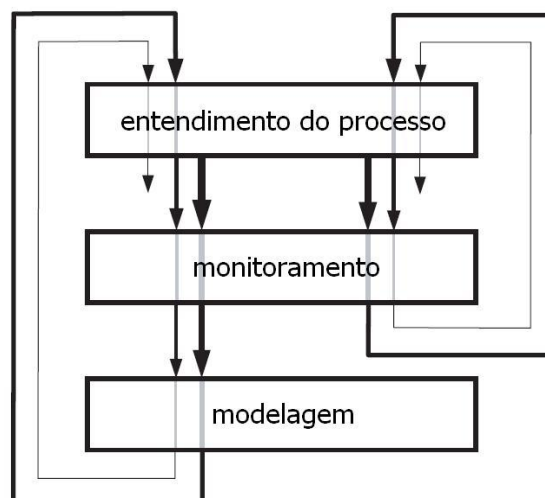


Figura 2- Diagrama de interação entre teoria, monitoramento e modelagem. Fonte: Grayson e Blöschl (2000)

Um modelo, segundo Christofolletti (2002), é qualquer representação simplificada da realidade capaz de reconstruí-la, prever um comportamento ou uma evolução. Os modelos matemáticos são abstrações que pretendem representar o comportamento dos sistemas ambientais utilizando variáveis, parâmetros e constantes matemáticas.

Discutindo as limitações dos modelos matemáticos, Christofolletti (2002) salienta que os maiores problemas são a avaliação da acuidade ou ajuste das previsões do modelo, e a atribuição de valores para os parâmetros que mantenham correlação com parâmetros fisicamente mensuráveis. Esse tipo de limitação encontra-se em modelos utilizados na análise ambiental que atribuem pesos aos parâmetros, tais como em Ross (1994) e Crepani (2001).

Para simular o funcionamento do geossistema as características mais importantes do modelo são: o componente espacial e a descrição matemática adequada dos processos. Em relação a essas características, Santos (2001) classifica os modelos matemáticos:

a) Quanto à variação espacial dos processos:

- Concentrados: Parâmetros e variáveis não apresentam variação espacial, sendo considerado um valor médio para a área de estudo. Ocorre apenas a variação no tempo.

- Distribuídos: Parâmetros e variáveis são dependentes do espaço e do tempo.

b) Quanto à descrição dos processos:

- Empíricos: As equações relacionam os dados de entrada e saída por meio de equações empíricas que não consideram os processos físicos.

- Conceituais: Baseiam-se em conceitos simplificados sobre os processos usando geralmente equações empíricas.

- Fisicamente baseados: descrevem os sistemas naturais utilizando equações gerais da física. Esse tipo de modelo é sempre distribuído.

O modelo SWAT (*Soil and Water Assesment Tool*), desenvolvido pela *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*, foi criado com o propósito de prever o impacto do uso e manejo do solo sobre o ciclo hidrológico, produção de sedimentos e

qualidade da água em bacia grandes e complexas, com variações de solos, uso e manejo por longos períodos de tempo. Para atender a esses propósitos o modelo tem as seguintes características:

- Possui base física. O modelo requer informações sobre o clima, propriedades do solo, uso e ocupação presentes na bacia.

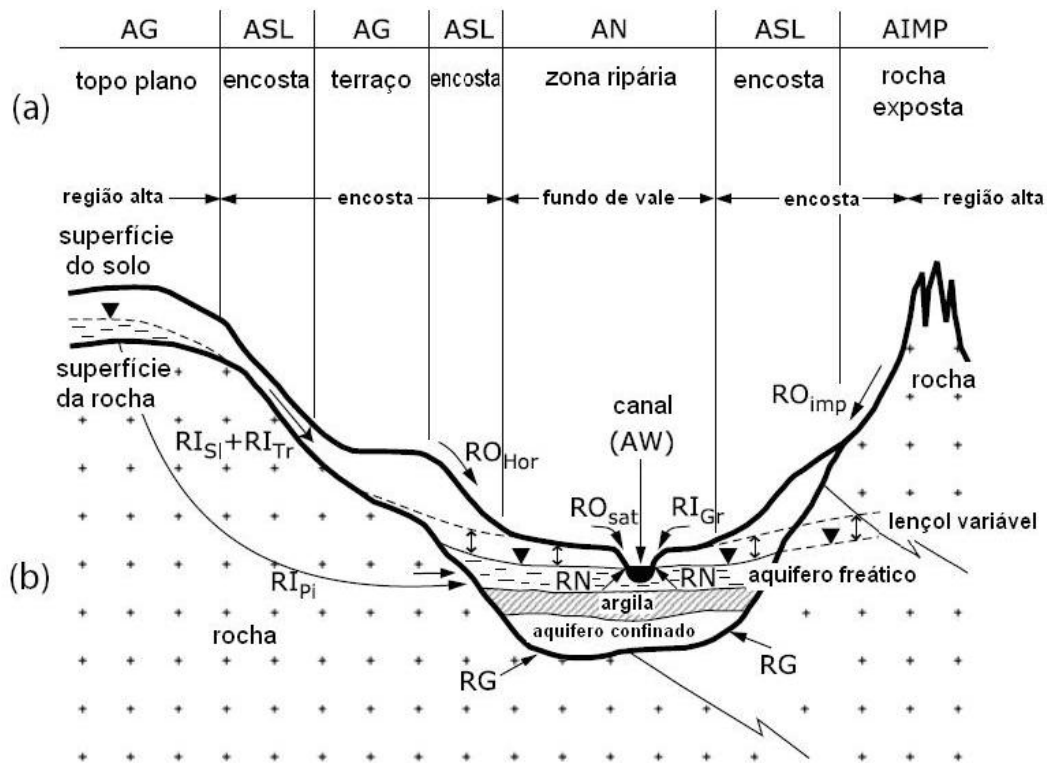
- É distribuído, possibilitando a divisão da bacia em sub-bacias e essas em unidades de resposta hidrológica (HRU) a fim de considerar a variação espacial das características hidrológicas.

- As funções básicas do modelo podem ser simuladas com um conjunto pequeno de dados, geralmente disponíveis nas agências governamentais.

- É computacionalmente eficiente, sendo possível simular longos períodos de tempo em bacias de diferentes escalas com grande variedade de usos e manejo.

Becker (2005) afirma que os mecanismos que controlam os processos hidrológicos são complexos, possuem grande variabilidade espacial e são controlados por fatores climáticos, pedológicos e geológicos, e de uso do solo ou vegetação. Unidades de paisagem com combinação similares desses fatores tendem a ter comportamento hidrológico similares, como ilustrado na Fig.3, sendo definidos como “hidrótopos” (BECKER, 2005) ou unidades de resposta hidrológica (KIRKBY *et al*, 2002). Neste sentido, assemelha-se ao conceito de geótopo, definido como a menor unidade do geossistema (SOTCHAVA, 1977) e de “unidade de paisagem”, menor unidade de planejamento utilizada em zoneamento ambiental (BECKER e EGLER, 1997)

Este artigo tem como objetivo demonstrar a potencialidade de utilização da modelagem distribuída e de base física como forma de simular o comportamento do geossistema, por meio da aplicação do modelo SWAT para simulação de série hidrológica na bacia do Alto Rio Negro.



Hidrótópos: AG Áreas permeáveis com lençol freático profundo que o sistema radicular não alcança; NA Áreas úmidas, com lençol freático próximo à superfície; AW Superfície líquida; ASL Áreas de encosta com elevado potencial de geração de escoamento superficial e subsuperficial; AIMP Área impermeáveis ou com baixa permeabilidade. Processos hidrológicos: RO_{Hor} Escoamento superficial por exceder a infiltração; RO_{imp} Escoamento superficial de áreas impermeáveis; RO_{sat} Escoamento superficial por saturação; $RIS_I + RI_{Tr}$ Escoamento subsuperficial por caminhos preferenciais; RI_{Tr} Translação de “onda de pressão”; RI_{Pi} Fluxo de pistão; RN Escoamento subsuperficial direto do aquífero raso; RI_{Gr} Incremento do escoamento subsuperficial direto para o canal; RG Escoamento subterrâneo.



Figura 3 – Hidrótopos e processos dominantes. Fonte: (BECKER, 2005 *apud* SANTOS,2009)

2-MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo SWAT foi aplicado na bacia hidrográfica do Alto Rio Negro que se localiza ao norte do estado de Santa Catarina e ao sul do estado do Paraná, entre as latitudes $25^{\circ}59'29''S$ e $26^{\circ}21'32''S$; e, entre as longitudes $49^{\circ}10'12''W$ e $49^{\circ}36'53''W$, com área de drenagem de 3.530 km^2 (Fig. 4).

Os dados utilizados no modelo incluem planos de informação e séries de dados hidrológicos. O mapa de solos e seu banco de dados de características hidrológicas foram elaborados pelo Laboratório de Hidrogeomorfologia - LHG da UFPR. O mapa de uso do solo foi produzido pelo LABHIDRO/UFSC por classificação automática de imagem do satélite Landsat, sensor TM-5, com data de julho de 2007 e o banco de dados utilizado foi o disponível do SWAT para cada uso. As curvas de nível, utilizadas para gerar o MDT, e a hidrografia, foram digitalizadas de cartas topográficas do IBGE de 1992, em escala 1/50000.

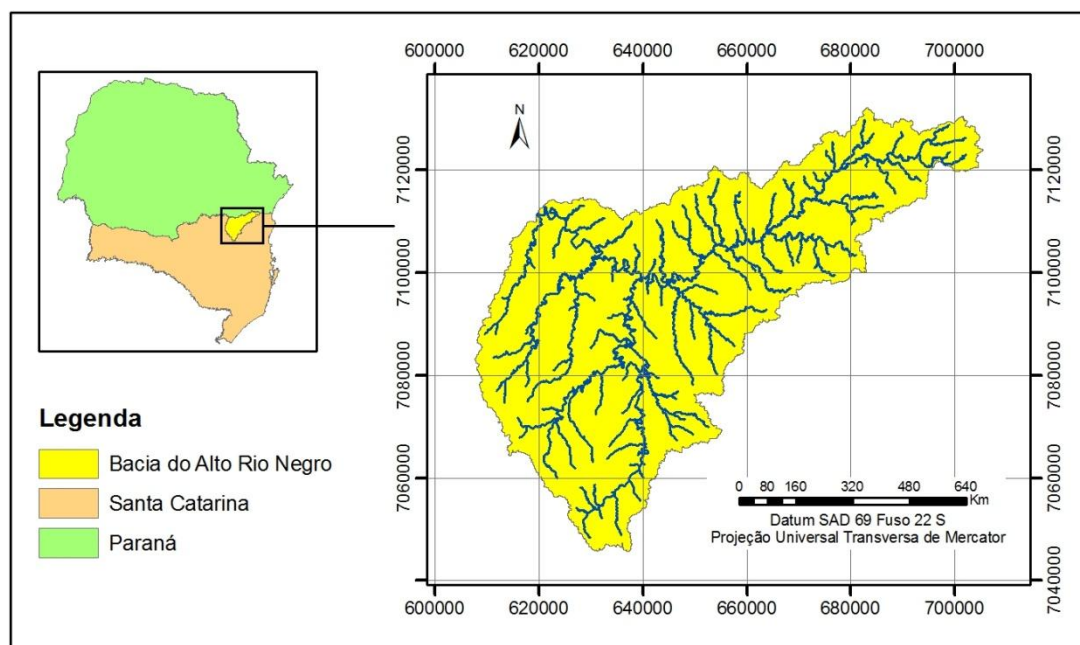


Figura 4 – Localização da área de estudo



Foram utilizados dados pluviométricos provenientes das estações 2549003, 2649016, 2649054, 2649055, 2649056, 2649057, 2649006, 2649018, e 2549008, e série de vazão diária da estação hidrossedimentométrica Rio Negro (65100000). As séries de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar são provenientes da estação climatológica Rio Negrinho, do INMET.

Utilizando a ferramenta de delimitação de bacias do SWAT a bacia do Alto Rio Negro foi dividida em 245 sub-bacias, sendo estas bacias posteriormente divididas em 1727 HRU's, que são definidas pelo cruzamento dos mapas de solos, uso do solo e declividades. A HRU é a menor unidade utilizada pelo modelo para a geração de escoamento.

As simulações foram realizadas para séries diárias entre os anos de 1991 e 1998. O período entre 01/01/1991 e 31/12/1993 foi utilizado como tempo de auto-ajuste do modelo, necessário para compensar condições iniciais de umidade não mensuradas.

O hidrograma simulado foi avaliado por comparação visual com o hidrograma observado e pela utilização do coeficiente de eficiência (COE) proposto por Nash & Sutcliffe (1970):

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

onde: Q_{sim} é a vazão simulada; Q_{obs} é a vazão observada; e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas.

O COE pode variar de $-\infty$ a um, sendo um o resultado que indica ajuste perfeito. Valores de COE acima de 0.7 são considerados satisfatórios.

Quando o resultado da simulação não é satisfatório é necessário fazer a calibração do modelo. A calibração consiste no ajuste dos valores dos parâmetros para que o modelo produza um resultado suficientemente próximo do observado.

O SWAT possui um conjunto grande de parâmetros (Tab. 1) que possibilitam ajuste no processo de calibração.

Tabela 1 – Parâmetros calibráveis do modelo SWAT.

Parâmetro	Definição	Unidade
-----------	-----------	---------



Alpha_Bf	Constante de recessão do escoamento de base	dias
Biomix	Eficiência da atividade biológica	adimensional
Canmx	Interceptação máxima da vegetação	mm
Ch_Cov	Fator de cobertura do canal	adimensional
Ch_K2	Condutividade hidráulica na base do canal principal	mm/h
Ch_N2	Coeficiente de rugosidade do canal principal	adimensional
Cn2	Curva Número	adimensional
Epc0	Fator de compensação para uso de água pelas plantas	adimensional
Esco	Coeficiente de compensação da evaporação do solo	adimensional
Gw_Delay	Tempo de recarga do aquífero	dias
Gw_Revap	Coeficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada	adimensional
Gwqmn	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	mm
Rchrg_Dp	Fração de percolação para o aquífero profundo	adimensional
Revapmn	Limite de água no aquífero raso para ocorrer percolação	mm
Sftmp	Temperatura para ocorrer a precipitação de neve	°C
Slope	Declividade	m/m
Ssubbsn	Comprimento da vertente	m
Smfmn	Taxa mínima de derretimento de neve	mm/°C/dia
Smfmx	Taxa máxima de derretimento de neve	mm/°C/dia
Smtmp	Temperatura base para ocorre o derretimento da neve	°C
Sol_Alb	Albedo do solo	adimensional
Sol_Awc	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	mm/mm
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada	mm/h
Sol_Z	Profundidade da superfície até a base do horizonte do solo	mm
Surlag	Atraso do escoamento superficial	dias



Timp	Fator de atraso na temperatura do pacote de neve	adimensional
Tlaps	Lapso de temperatura na relação temperatura/altitude	°C/Km

Fonte: NEITSCH *et al* (2004)

3-RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para demonstrar a similaridade entre os elementos do geossistema (Fig. 1) e os processos considerados pelo modelo SWAT, a Tab. 2 mostra os dados de entrada e os parâmetros que representam cada elemento do sistema.

Tabela 2 – Relação entre o geossistema e o modelo SWAT

Elementos do Geossistema	Variáveis de Entrada do SWAT		Parâmetros Calibráveis
Sociedade e Biosfera	Uso e ocupação do solo	Urbano (9 opções de uso com 15 variáveis cada) Rural (97 opções de uso com 42 variáveis cada)	Biomix, Cn2, Canmx, Epc0, Ch_Cov
Clima	Séries Meteorológicas	Precipitação Temperatura Umidade Relativa do Ar Velocidade do Vento Radiação Solar	Sftmp, Smfmn, Smfmx, Smtmp, Timp, Tlaps
Pedosfera e Litosfera	Mapa de Solos	Características por horizonte (12 variáveis)	Alpha_Bf, Esco, Gw_Delay, Gwqmn, Gw_Revap, Rchrg_Dp, Revapmn, Sol_Alb, Sol_Awc, Sol_K, Sol_Z



Relevo	Modelo Digital do Terreno (MDT) e Hidrografia	Declividade e extensão (canal e encosta) Delimitação das Sub-bacias	Ch_K2, Ch_N2, Slope, Slsubbsn, Surflag
Água	Séries Hidrológicas	Vazão	

A simulação inicial, sem calibração, apresentou COE igual a -3,50, portanto não satisfatório, como mostra a Fig. 5. Na comparação dos hidrogramas é possível perceber que mesmo sem a calibração o modelo reproduziu uma resposta hidrológica similar à observada, porém superestimando os picos de vazão e apresentando resposta pouco eficiente nas recessões.

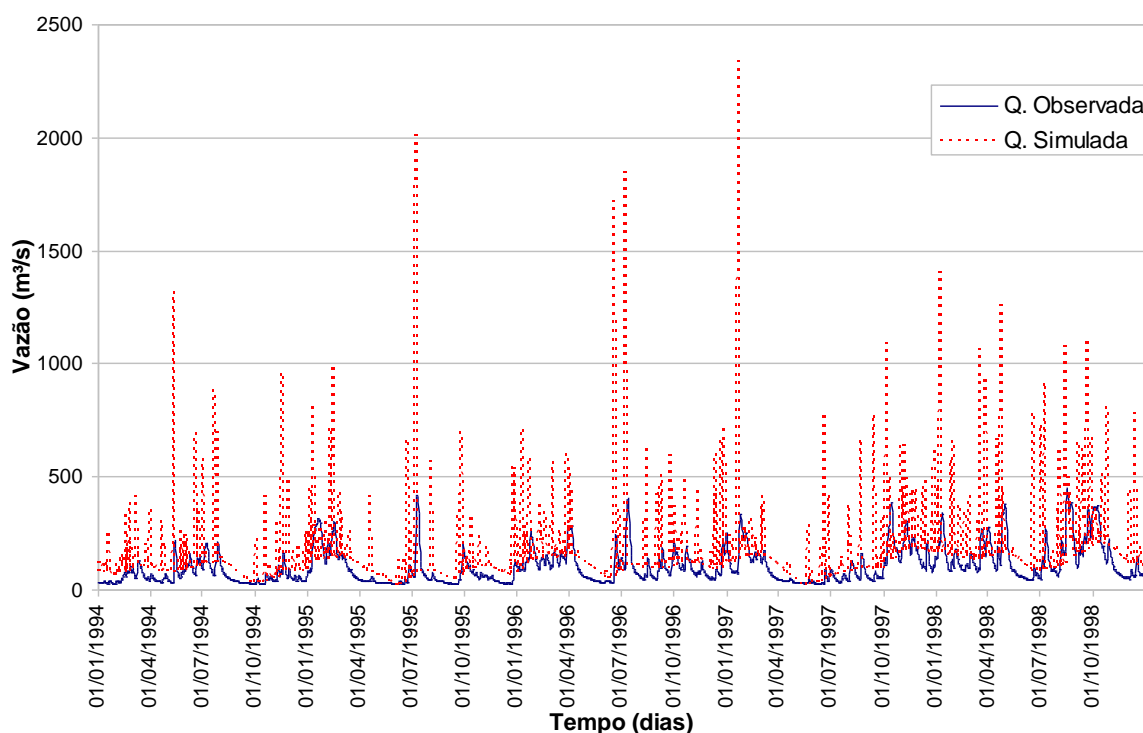


Figura 5 – Hidrogramas comparativos com vazão observada e simulada sem calibração

A vazão simulada após a calibração dos parâmetros (Tab.3) é mostrada na Fig. 6, apresentando COE igual a 0,71.

Tabela 3 – Parâmetros calibrados

Parâmetro	Tipo de modificação	Valor
-----------	---------------------	-------



Alpha_Bf	Atribuição de novo valor	0,9
Canmx	Atribuição de novo valor	9,85
Ch_N2	Atribuição de novo valor	0,15
Cn2	Multiplicação	0,1
Esco	Atribuição de novo valor	0,01
Gw_Delay	Atribuição de novo valor	60
Gw_Revap	Atribuição de novo valor	0,2
Slope	Multiplicação	5
Ssubbsn	Multiplicação	0,7
Sol_Awc	Multiplicação	4
Sol_K	Atribuição de novo valor	2

Nota-se que o modelo, após a calibração, foi capaz de reproduzir o funcionamento do sistema no que se refere aos processos relacionados ao ciclo hidrológico, pois a entrada de água de precipitação na bacia hidrográfica sofre a influência dos elementos do geossistema até chegar ao exutório.

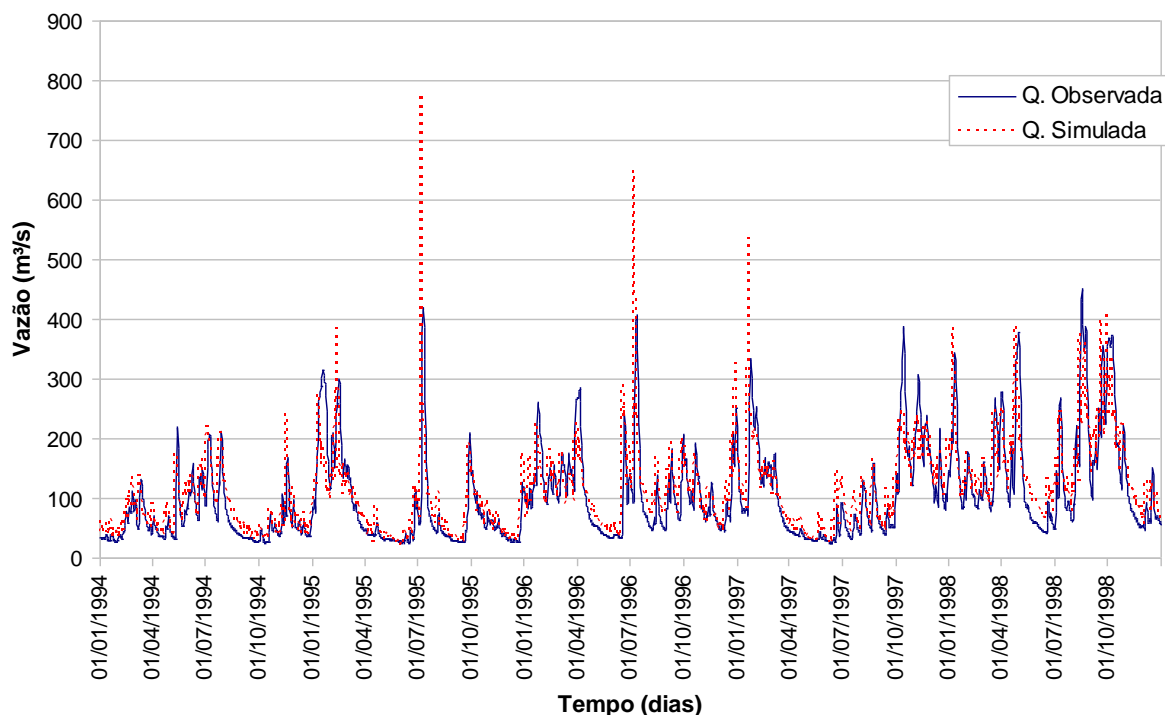


Figura 6 – Hidrogramas comparativos com vazão observada e simulada após a calibração

O processo de calibração foi necessário para ajustar a estrutura do modelo às condições particulares da bacia. Dessa forma, modelos de base física e distribuídos com parâmetros calibráveis tornam-se aplicável em bacias com características variadas.

4-CONCLUSÃO

1. O avanço do conhecimento permitiu o desenvolvimento de modelos matemáticos altamente complexos, levando em consideração grande número de variáveis representativas dos sistemas ambientais naturais. Neste sentido, modelos hidrológicos distribuídos e de base física permitem uma representação objetiva e complexa da bacia hidrográfica, aproximando-se assim de uma estrutura de representação similar ao geossistema, que possibilitam considerar a espacialidade das variáveis e utilizar valores de parâmetros fisicamente mensuráveis.

2. O modelo SWAT representa o sistema bacia hidrográfica por meio de grande número de variáveis e parâmetros de entrada. A comparação da simulação com os dados observados e a



possibilidade de calibração dos parâmetros, permite um ajuste adequado do modelo na representação do comportamento, no espaço e no tempo, das características do sistema modelado.

3. O resultado da simulação sem calibração, com COE igual a -3,50, demonstra que mesmo havendo uma estrutura representativa do sistema natural, os valores de parâmetros definidos a priori, com base no conhecimento das características físicas de cada variável, não são capazes de reproduzir a dinâmica da reposta hidrológica da bacia de forma adequada.

4. A simulação realizada após calibração dos parâmetros demonstra que o modelo SWAT apresentou um desempenho satisfatório na reprodução do comportamento das vazões médias diárias, com COE igual a 0,71.

5-REFERÊNCIAS

BECKER, A. **Runoff processes in mountain headwater catchments: recent understanding and research challenges.** In: HUBER, et al (Ed.). *Global change and mountain regions.* Netherlands, p. 283-295, 2005.

BECKER, B.K.; EGLER, C.A.G. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos estados da Amazônia Legal.** Brasília, MMA, 43 p., 1997.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; HERNANDEZ FILHO,P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial.** São José dos Campos: INPE, 124 p., 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** São Paulo: Edgard Blücher, 236 p. 1999.



GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. **Spatial modeling of catchment dynamics.** In: GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. *Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modeling.* Published by Cambridge University Press, p.51-81.2000.

KIRKBY, M.J.; BRACKEN, L.J.; REANEY, S. **The influence of landuse, soils and topography on the delivery of hillslope runoff to channels in SE Spain.** *Earth Surface Landforms and Processes*, 27, p.1459–1473, 2002.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. **River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles.** *Journal of Hydrology*, 10, p.282-290.1970.

NEITSCH, S.L.;ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.;SRINIVASAN, R.;WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment Tool.** Input/Output Documentation: Version 2005. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA, 2004

ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.** *Revista do Departamento de Geografia*. n.8, p.63-74. 1994.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR.** Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR, 2001

SANTOS, I. **Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrogeomorfológicos: Mecanismos de Geração de Escoamento e Conectividade Hidrológica.** Tese de Doutorado. Florianópolis: UFSC, 2009.

SOTCHAVA, V. B. **O Estudo dos geossistemas.** *Métodos em Questão*. São Paulo, n. 16, 50p. 1977.