

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO DHSVM AOS PARÂMETROS DE SOLO

Nadiane Smaha Kruk¹; Iria Fernandes Vendrame²; Francisco S. B. Ladeira³ & Chou Sin Chan⁴

RESUMO --- O modelo *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) foi aplicado à bacia do Rio Bocaina, localizada na Serra do Mar no Estado de São Paulo. A modelagem hidrológica da região da Serra do Mar apresenta uma grande importância estratégica tanto na questão econômica, por ligar importantes cidades ao Oceano Atlântico, quanto na questão ambiental, por abrigar os remanescentes de Mata Atlântica. Por ser um modelo fisicamente baseado e distribuído, o modelo DHSVM demanda uma grande quantidade de parâmetros físicos. Este trabalho tem como objetivo analisar a sensibilidade do modelo DHSVM aos parâmetros de solo. Conhecer a sensibilidade das respostas hidrológicas aos parâmetros é de fundamental importância para direcionar pesquisas de campo e também para selecionar parâmetros para possíveis calibrações. Dentre os parâmetros de solo, o modelo apresentou-se mais sensível à condutividade hidráulica lateral, ao expoente de decaimento deste parâmetro com a profundidade do solo e à máxima infiltração.

ABSTRACT --- The *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) was applied to the Bocaina watershed, located in Serra do Mar in São Paulo State, Brazil. Hydrological modelling of this region has a great strategic importance as much in the economic view, due its position connecting important cities to the Atlantic Ocean, as in the environmental view, due its portions of remained native forest, called Mata Atlântica. Distributed hydrological models have many physical parameters, and knowing the most relevant of them in simulated outflows may guide future investments on experimental researches to determine them, and may also indicate the most relevant to be calibrated. This article proposes to analyse the DHSVM sensitivity to the soil parameters. Among the soil parameters, the model presented more sensitivity to lateral hydraulic conductivity and its exponential decrease with depth, and maximum infiltration.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, parâmetros de solo, teste de sensibilidade.

1) Doutoranda do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Pç. Mal. Eduardo Gomes, 50. São José dos Campos - SP, 12228-900. e-mail: nsmaha@ita.br.

2) Professora Adjunta do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. e-mail:hiria@ita.br.

3) Professor da Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências, Departamento de Geografia.

4) Pesquisadora titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos.

1 - INTRODUÇÃO

A ocorrência de chuvas intensas, enxurradas e enchentes na Serra do Mar no Estado de São Paulo tem um grande impacto nas atividades sócio-econômicas dessa região. A Serra do Mar possui um papel estratégico na região tanto na questão econômica, por ligar importantes cidades ao Oceano Atlântico, quanto na questão ambiental, por abrigar os remanescentes de Mata Atlântica.

A modelagem hidrológica dessa região apresenta-se como uma ferramenta importante para o estudo dos impactos de ações antrópicas, além de poder ser utilizada como parte de um sistema de alerta de eventos extremos.

Entretanto, regiões de topografia complexa como a Serra do Mar, apresentam comportamento específico com relação à modelagem matemática, o que força a necessidade de testarmos ferramentas próprias, adequadas e ajustadas para essa região. As elevadas declividades e a presença da Mata Atlântica, demandam um modelo hidrológico que considere os efeitos da topografia e da cobertura vegetal. Outra característica importante é o tempo de concentração muito curto, onde o monitoramento da precipitação exclusivo das cabeceiras não forneceria tempo suficiente para alertas de enchentes nas partes mais baixas das bacias.

O modelo hidrológico utilizado neste trabalho é o *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM), o qual será descrito na Seção 2 deste artigo.

O objetivo deste trabalho é testar a sensibilidade do modelo hidrológico aos parâmetros de solo. Os parâmetros que serão analisados são: condutividade hidráulica lateral, expoente de decrescimento da condutividade com a profundidade, máxima infiltração, albedo da superfície, e para cada camada de solo a porosidade, distribuição da poro-pressão, pressão de borbulhamento, capacidade de campo, ponto de murchamento, densidade aparente, condutividade hidráulica vertical, condutividade térmica e capacidade térmica.

Conhecer a sensibilidade das respostas hidrológicas aos parâmetros é de fundamental importância para direcionar pesquisas de campo e também para selecionar parâmetros para possíveis calibrações.

Os objetivos deste estudo se encaixam dentro do Projeto Temático FAPESP “Estudos da Previsibilidade de Eventos Meteorológicos Extremos na Serra do Mar”, do qual este trabalho faz parte.

2 – O MODELO DHSVM

O *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) é um modelo hidrológico distribuído, fisicamente baseado, que representa os efeitos da topografia, solo e vegetação nos fluxos de água de uma bacia hidrográfica. Esse modelo começou a ser desenvolvido no começo da

década de 1990 por Mark Wigmosta na Universidade de Washington. Posteriormente, muitas outras pessoas dessa universidade e do *Pacific Northwest National Laboratory* contribuíram para o desenvolvimento do modelo.

Esse modelo pode ser aplicado em bacias de até 10.000 km² com um passo de tempo inferior ao diário e um período de vários anos. Sua aplicação deu-se predominantemente nas bacias localizadas nas montanhas do noroeste dos Estados Unidos. Esse fato torna-se muito relevante uma vez que a nossa área de interesse de estudo é a Serra do Mar.

O código do DHSVM, desenvolvido em linguagem C, é disponibilizado pela Universidade de Washington (DHSVM, 2004) e pode ser executado no sistema operacional LINUX.

A descrição do modelo apresentada a seguir está baseada nos artigos de Wigmosta *et al.* (1994) e Wigmosta *et al.* (2002).

A discretização da bacia hidrográfica a ser modelada é feita dividindo-a em grades (células) computacionais, com uma resolução horizontal tipicamente entre 10 e 150 metros, centradas nos nós do modelo digital do terreno (MDT). A resolução a ser utilizada neste trabalho é de 100 metros que, de acordo com a literatura, parece ser adequada ao tamanho da bacia a ser estudada.

A caracterização da topografia é utilizada no controle da radiação solar absorvida, precipitação, temperatura do ar e na direção do movimento da água. As características da vegetação e as propriedades do solo são designadas para cada célula e essas propriedades podem variar ao longo da bacia. Em cada passo de tempo, o modelo fornece soluções simultâneas das equações de balanço de água e energia para cada grade computacional.

As grades são hidrologicamente interligadas através de escoamento lateral superficial e sub-superficial (Figura 1).

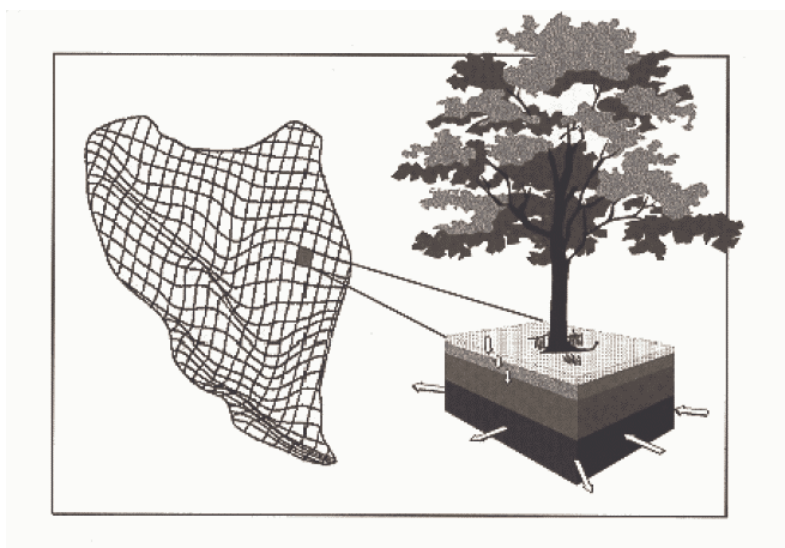


Figura 1 – Representação esquemática da discretização e fluxos calculados pelo modelo DHSVM. Fonte: Wigmosta, Nijssen e Storck (2002).

O módulos que compõem o modelo DHSVM são: cálculo de evapotranspiração; movimento da água em solo não saturado; escoamento sub-superficial em solo saturado; escoamento superficial; escoamento em canais; e cálculo de interceptação, acumulação e derretimento de neve.

3 – A ÁREA DE ESTUDO

A micro-bacia do Rio Bocaina, com uma área de drenagem 251,36 km², faz parte da bacia do Rio Paraíba do Sul, que possui uma área de drenagem de 55.300 km² (PLANO DE BACIAS, 2003). O Rio Bocaina tem um comprimento de aproximadamente 30 km e deságua no Rio Paraíba do Sul no município de Cachoeira Paulista, em seu curso médio-superior.

Existe uma captação no Rio Bocaina da SABESP para abastecimento público da cidade de Cachoeira Paulista em um ponto a jusante da estação hidrológica da ANA. As vazões captadas, portanto, não entrarão no cálculo do balanço hídrico da bacia, que será delimitada até a estação de medição de vazão (234 km²). A Figura 2 à esquerda apresenta a localização da bacia de estudo e à direita a delimitação da bacia e localização das estações de monitoramento meteorológicas e hidrológicas com dados recentes e adequados à aplicação do modelo DHSVM.

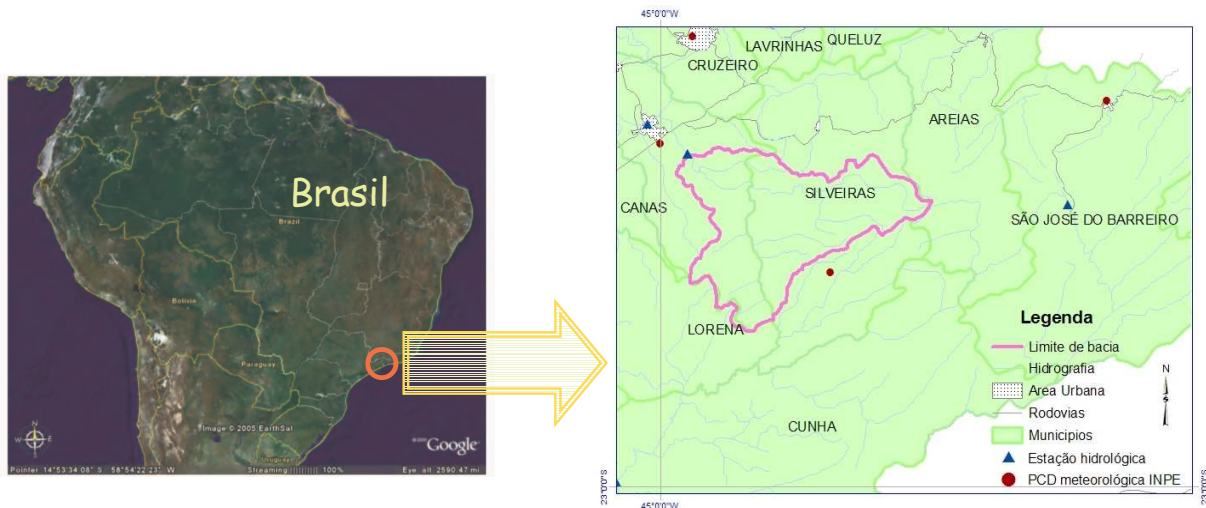


Figura 2 – Localização da bacia de estudo e das estações de monitoramento.

Sob o aspecto visual, a região da Bacia da Bocaina está praticamente toda devastada com algumas porções remanescente de Mata Atlântica já alterada. A paisagem predominante é de pastagens e o relevo forma o conhecido mar de morros.

A seguir serão apresentados os dados espaciais levantados necessários para a execução do modelo hidrológico.

3.1 – Modelo Digital do Terreno

Os dados de topografia foram obtidos das imagens topográficas do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM2) com resolução de 3", ou cerca de 90m. Esse foi um projeto da *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Esses dados estão disponíveis no sítio eletrônico da NASA (2006). Esses dados estão georreferenciados ao *Datum* WGS-84 (*World Geodetic System* 1984) e em sistema de coordenadas geográficas. Para adequá-los ao padrão adotado neste trabalho, foi feita a conversão para o *Datum* SAD-69, e o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). Optou-se ainda por gerar uma grade com resolução de 100 metros por interpolação bilinear, para não precisar trabalhar com valores fracionados. O modelo digital do terreno para a área de estudo está apresentado na Figura 3.

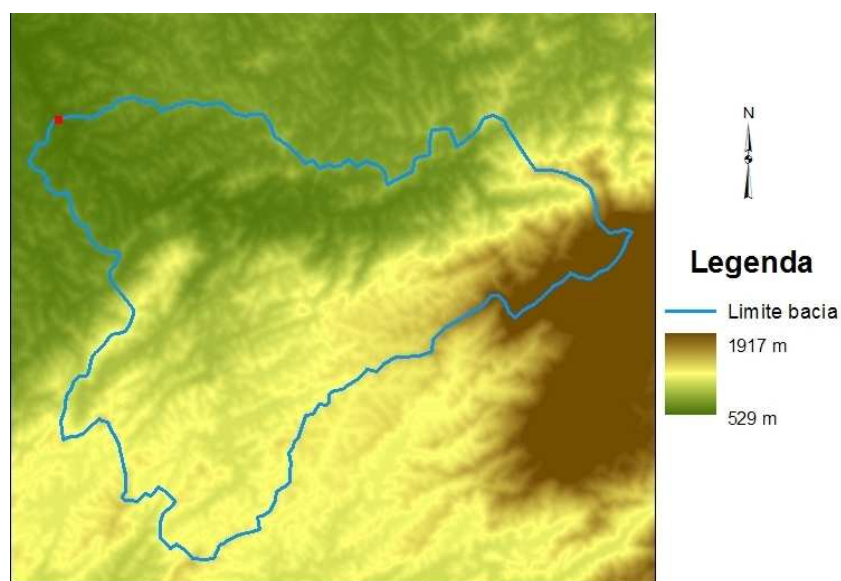


Figura 3 – Modelo digital do terreno com resolução de 100 m, gerado a partir dos dados do SRTM2. Ponto em vermelho, localização da estação hidrológica.

3.2 – Rede de drenagem computacional

A rede de drenagem foi gerada utilizando arquivos de comandos para o ArcInfo, escritos em *Arc Macro Language* (AML) e disponíveis no endereço eletrônico DHSVM (2004). A Figura 4 apresenta a rede de drenagem computacional gerada para a bacia do Rio Bocaina classificada segundo o ordenamento de Strahler (MAIDMENT, 1992).

3.3 – Vegetação

O mapa de vegetação utilizado foi o Atlas dos Remanescentes Florestais de Mata Atlântica da Fundação SOS Mata Atlântica/INPE que foi resultado de trabalhos de fotointerpretação. O

referencial utilizado (*Datum*) foi o Córrego Alegre e o sistema de coordenadas UTM. A Figura 5 apresenta esse mapa já convertido para a grade de 100 metros e para o referencial SAD-69 (*South American Datum 1969*). Nessa figura, os remanescentes, áreas de reflorestamento e sucessões secundárias de floresta em estágio intermediário de desenvolvimento, presentes no mapa original, foram agrupadas na classe de remanescentes de mata atlântica.

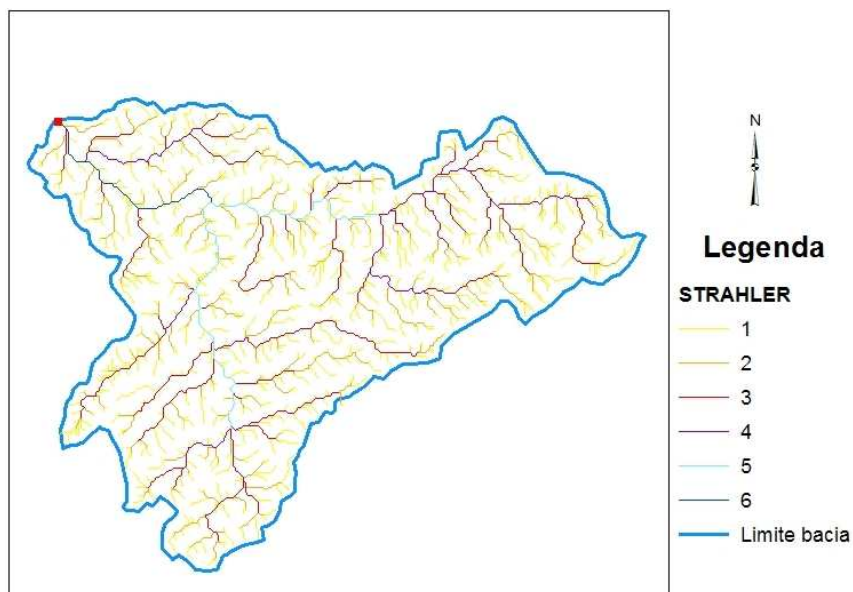


Figura 4 – Rede de drenagem gerada a partir da topografia do SRTM2 e classificada segundo o ordenamento de Strahler. Ponto em vermelho, localização da estação hidrológica.

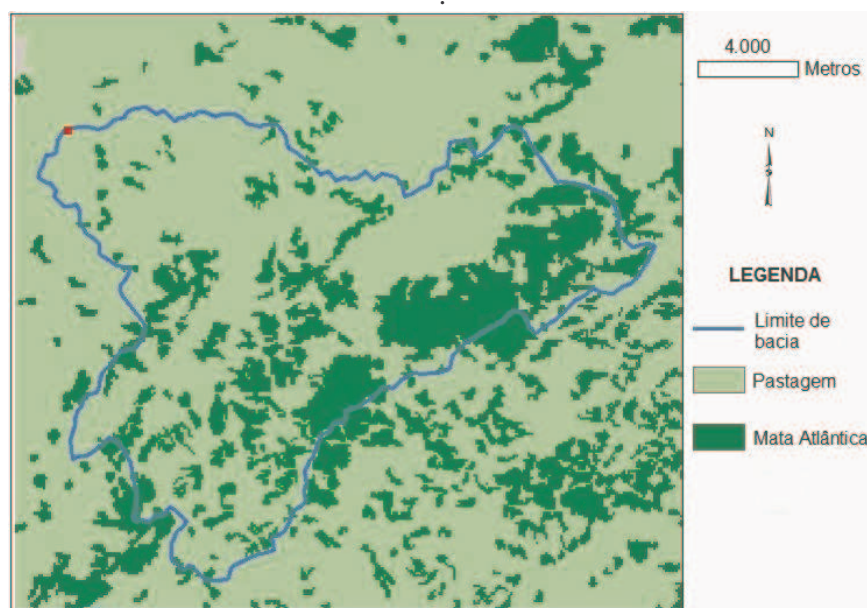


Figura 5 – Atlas dos Remanescentes Florestais de Mata Atlântica da Fundação SOS Mata Atlântica/INPE (ATLAS. . . , 2003). Ponto em vermelho, localização da estação hidrológica.

3.4 – Solos

O mapa pedológico foi determinado a partir do mapa de elevação do terreno e pela descrição morfológica de 46 perfis na bacia. A Figura 6 apresenta o resultado desse trabalho.



Figura 6 – Mapa pedológico. Ponto em vermelho, localização da estação hidrológica.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de sensibilidade do modelo hidrológico aos parâmetros de solo foi feita a partir de 45 simulações, variando-se um parâmetro de cada vez e mantendo os demais constantes. Porosidade, capacidade de campo e ponto de murcha foram variados juntos por serem correlacionados entre si.

Embora o modelo seja altamente não linear, é importante conhecer a sensibilidade do modelo à variação de cada parâmetro, pois obtenção desses é muitas vezes bastante difícil, acarretando grandes incertezas.

A variação dos parâmetros em cada simulação foi feita dividindo-se o intervalo de possíveis valores de cada parâmetro em 5 partes iguais.

O modelo não foi calibrado. Neste trabalho só está sendo estudado o impacto da variação de cada parâmetro nas respostas de vazão do modelo. Para a calibração, faz-se necessário ainda, avaliar os parâmetros de vegetação, não abordados neste artigo.

Os parâmetros de referência (Quadro 1), sobre os quais foram aplicadas as variações, foram retirados da literatura para solos de mesma rocha, topografia e climatologia. Chamaremos a simulação feita com os parâmetros de referência de *controle*.

Os resultados estão apresentados nas Figuras 7 a 17.

Quadro 1 – Parâmetros de referência não calibrados. Valores retirados da literatura para solos de mesma rocha, topografia e climatologia.

Parâmetro	Hor.	Argissolo/ Cambissolo	Cambissolo/ Neo. Litólico	Gleis- solo	Neo. Litólico/ Cambissolo	Argis- solo
Condutividade lateral (m/s)		3,0E-05	5,5E-05	1,8E-06	5,0E-05	3,0E-05
Expoente de decaimento		2	2	3	3	2
Infiltração máxima (m/s)		3,0E-05	3,0E-05	1,0E-05	3,0E-05	3,0E-05
Albedo da superfície		0,3	0,2	0,1	0,2	0,3
Porosidade	A	0,50	0,38	0,35		0,50
	B	0,38	0,26	0,25	0,38	0,38
	C	0,38	0,23	0,25	0,23	0,38
Distribuição de poro-pressão	A	0,26	0,20	0,18		0,26
	B	0,19	0,15	0,10	0,19	0,19
	C	0,19	0,15	0,10	0,10	0,19
Pressão de borbulhamento	A	0,29	0,30	0,30		0,29
	B	0,32	0,28	0,35	0,30	0,32
	C	0,32	0,28	0,35	0,32	0,32
Capacidade de campo	A	0,21	0,21	0,28		0,21
	B	0,27	0,15	0,20	0,21	0,27
	C	0,27	0,15	0,20	0,15	0,27
Ponto de murchamento	A	0,10	0,10	0,15		0,10
	B	0,17	0,10	0,15	0,10	0,17
	C	0,17	0,10	0,15	0,10	0,17
Densidade aparente (kg/m ³)	A	1600	1500	1345		1600
	B	1350	1500	1400	1500	1350
	C	1350	1500	1400	1500	1350
Condutividade vertical (m/s)	A	0,01	0,01	0,01		0,01
	B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	C	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Condutividade térmica (W/m ² °C)	A	1,5	1,5	1,5		1,5
	B	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	C	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Capacidade térmica (J/m ³ °C)	A	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06		1,4E+06
	B	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06
	C	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06	1,4E+06

O modelo apresentou-se bastante sensível à variação da condutividade hidráulica lateral. De acordo com a Figura 7, pode-se observar que a medida que o valor desse parâmetro diminuiu, na maioria dos casos, os picos de vazões máximas diminuem. Porém esse comportamento não se deu de maneira uniforme, como podemos observar em junho, julho e novembro de 2004, onde os valores de máximas vazões aumentaram com a redução do parâmetro.

O modelo apresentou-se sensível à variação do expoente de decaimento da condutividade hidráulica lateral. De acordo com a Figura 8, pode-se observar que à medida que o valor desse parâmetro aumenta, os picos de vazões máximas aumentam, e à medida que diminui, as vazões mínimas aumentam.

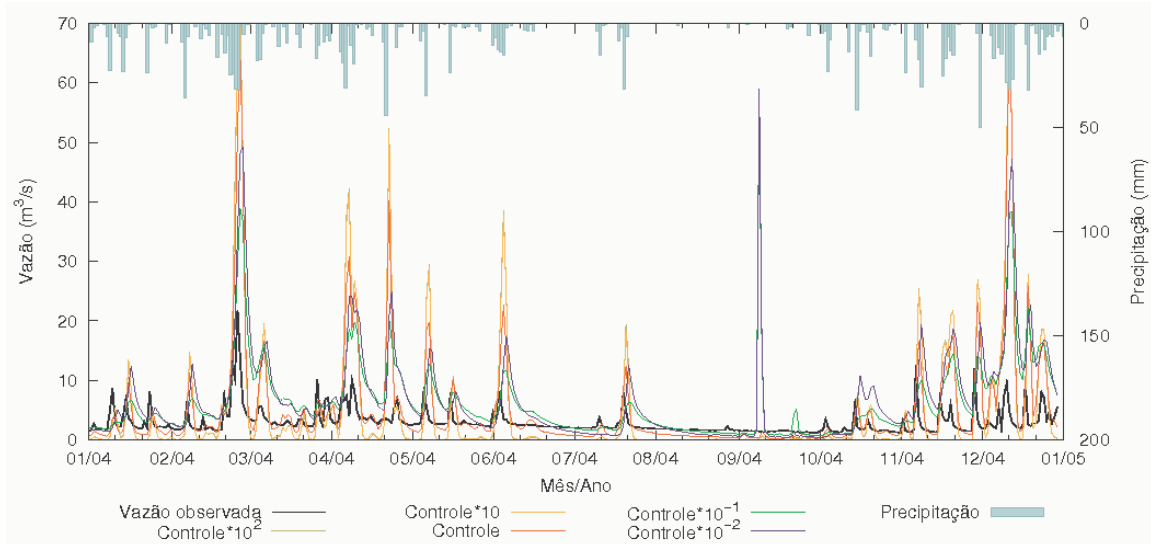


Figura 7 – Simulações com variação da condutividade hidráulica lateral.

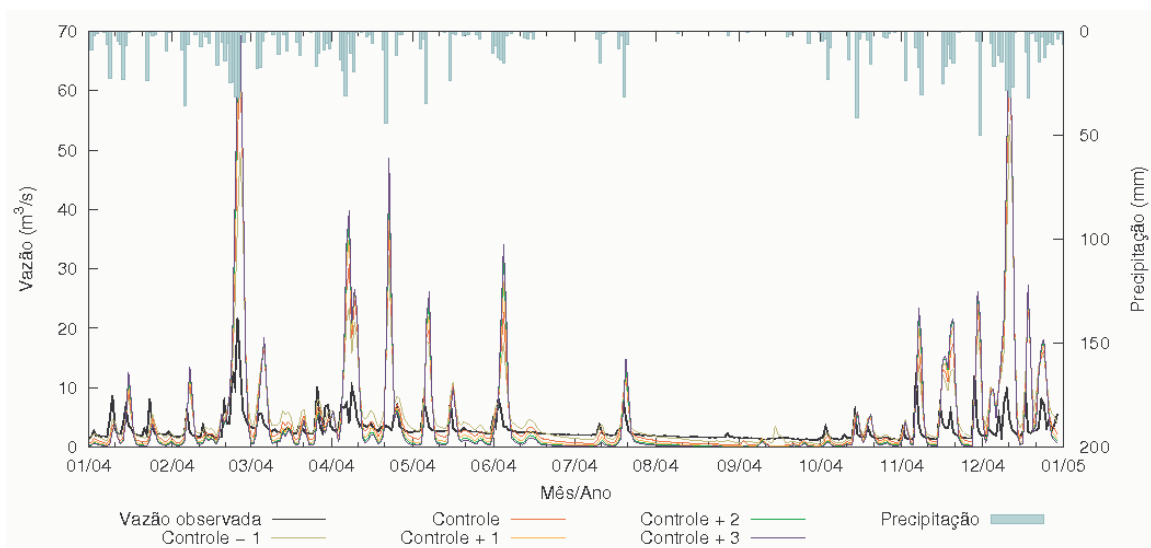


Figura 8 – Simulações com variação do expoente de decaimento da condutividade hidráulica lateral.

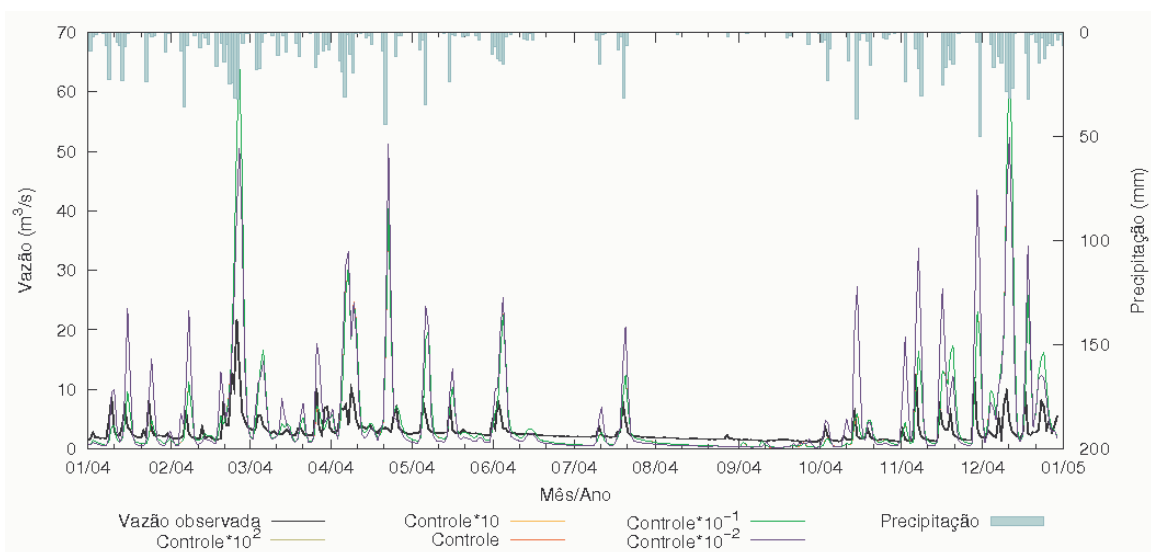


Figura 9 – Simulações com variação da infiltração máxima.

O modelo apresentou um comportamento bastante não linear com relação à variação da infiltração máxima. De acordo com a Figura 9, apenas a última simulação (controle* 10^{-2} – linha azul) diferenciou-se das demais simulações, onde todas as demais linhas estão sob a verde.

A variação dos valores de albedo da superfície não impactaram nas respostas obtidas pelo modelo. Na Figura 10, as linhas das simulações estão todas sob a azul.

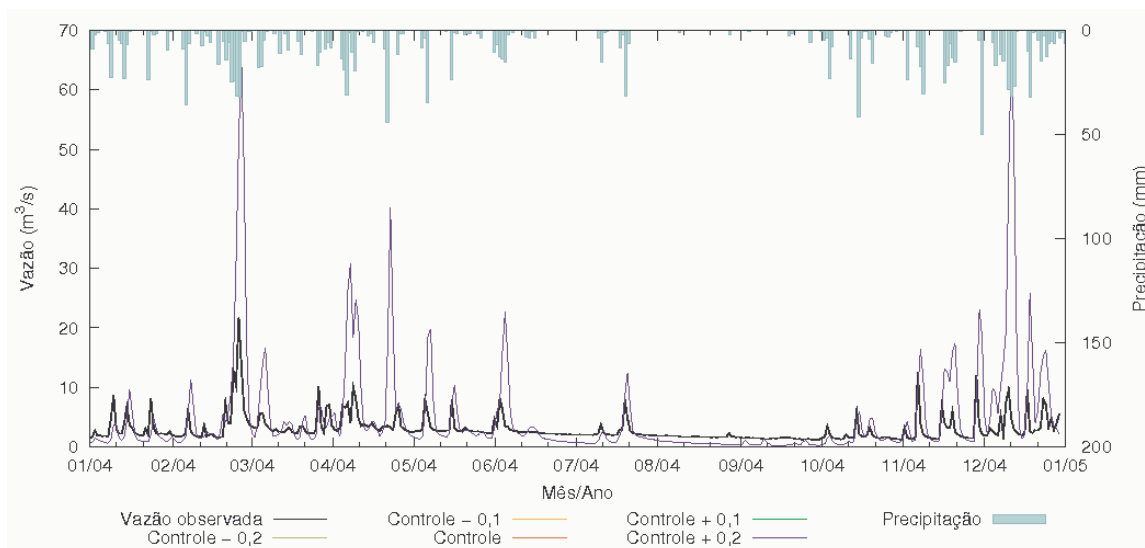


Figura 10 – Simulações com variação do albedo da superfície.

A variação dos valores de porosidade, capacidade de campo e ponto de murchamento impactaram somente nos pontos de máximas vazões. De acordo com a Figura 11, a medida que esses parâmetros aumentaram, os picos de vazão diminuíram.

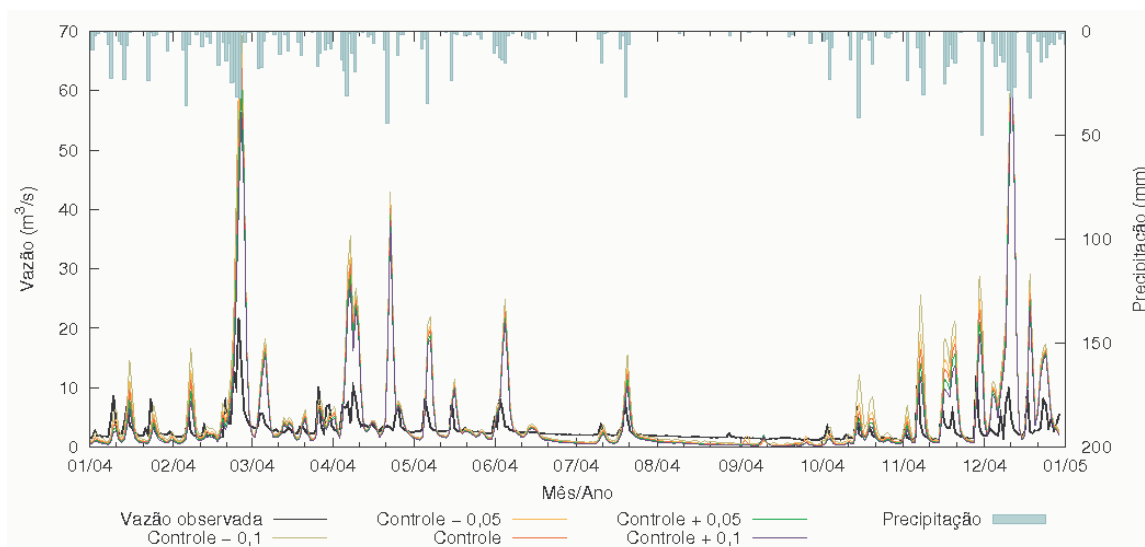


Figura 11 – Simulações com variação da porosidade, capacidade de campo, ponto de murchamento.

A variação dos valores de distribuição de poro-pressão, pressão de borbulhamento e densidade aparente não alteraram as respostas de vazão do modelo hidrológico (Figuras 12, 13 e 14, respectivamente, onde todas as linhas coloridas estão sob a azul).

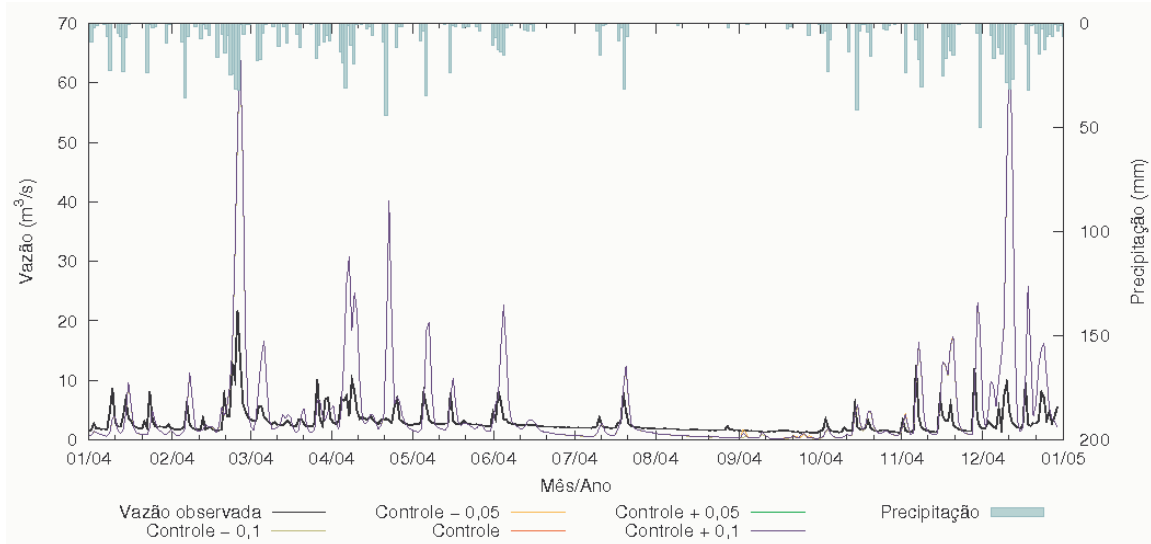


Figura 12 – Simulações com variação da distribuição de poro-pressão.

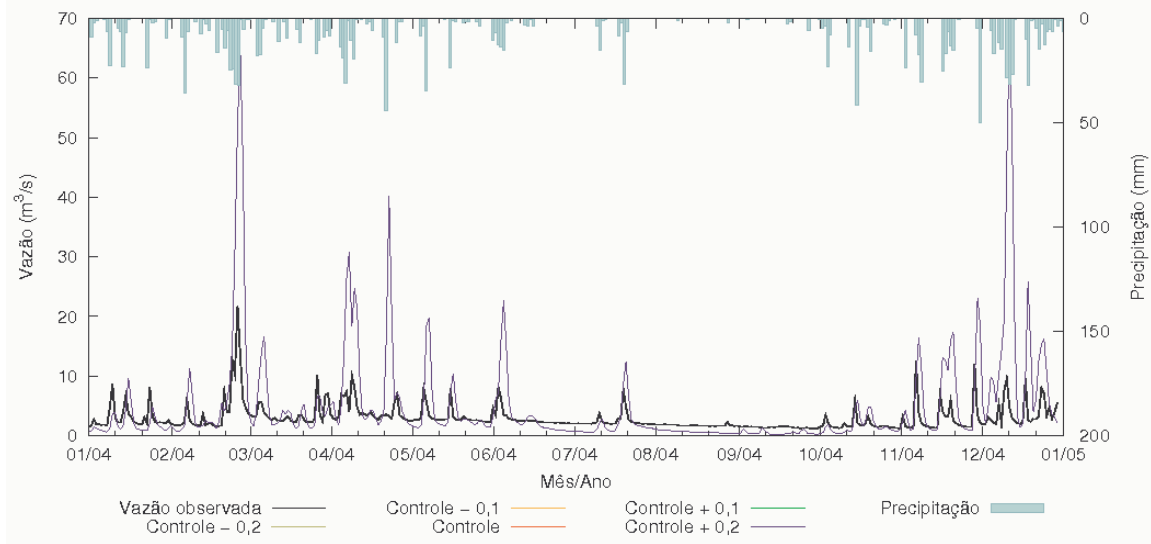


Figura 13 – Simulações com variação da pressão de borbulhamento.

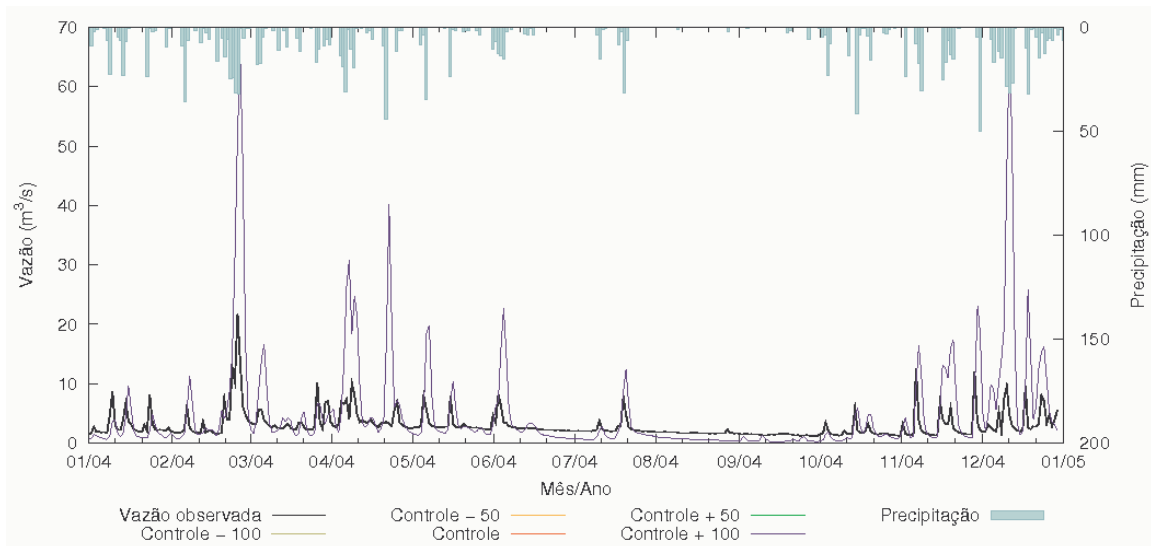


Figura 14 – Simulações com variação da densidade aparente.

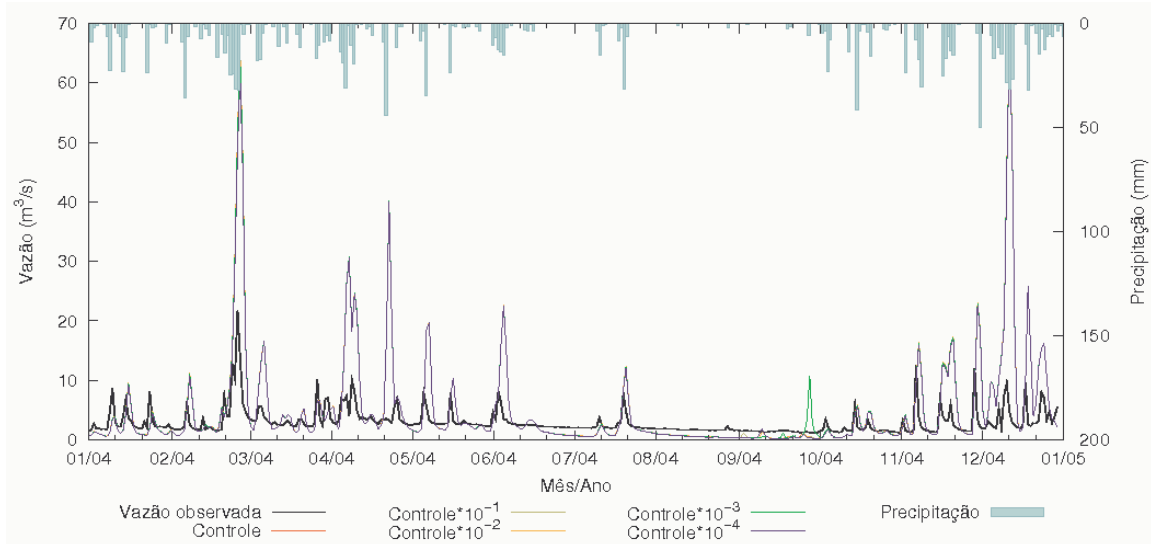


Figura 15 – Simulações com variação da condutividade hidráulica vertical.

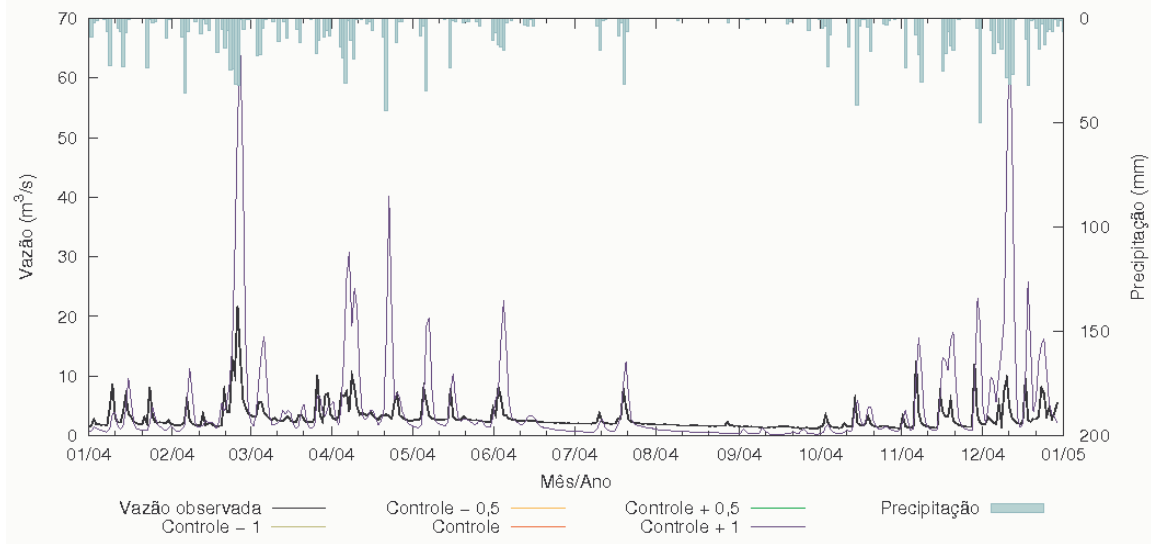


Figura 16 – Simulações com variação da condutividade térmica.

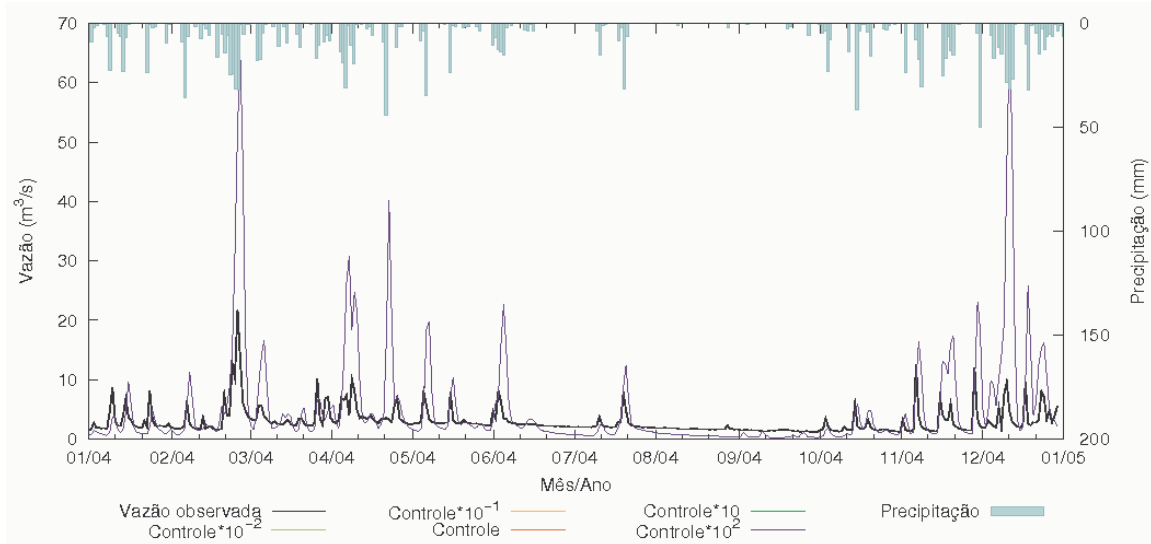


Figura 17 – Simulações com variação da capacidade térmica.

O modelo apresentou-se praticamente insensível à variação da condutividade hidráulica lateral (Figura 15). De acordo com as Figuras 16 e 17, onde as linhas de todas as simulações estão sob a azul, a variação dos parâmetros de condutividade térmica e capacidade térmica não impactaram nas respostas de vazão do modelo hidrológico.

5 – CONCLUSÕES

A análise de sensibilidade de parâmetros em modelo distribuídos é de fundamental importância para direcionar trabalhos de campo, selecionar parâmetros para calibração e para analisar o impacto de incertezas dos valores de cada parâmetro nas respostas modeladas.

Os resultados retrataram uma superestimação das vazões de pico pelo modelo e uma subestimação das vazões nos períodos de recessão. Entretanto, não buscou-se neste trabalho a calibração do modelo hidrológico e sim analisar a sensibilidade do mesmo com relação à variação dos parâmetros de solo. Para realizar a calibração, faz-se necessário ainda, avaliar os parâmetros de vegetação, não abordados neste artigo.

De acordo com os resultados apresentados, as vazões simuladas pelo modelo hidrológico DHSVM apresentaram-se mais sensíveis à variação dos parâmetros de condutividade hidráulica lateral, expoente de decaimento deste e máxima infiltração. A variação dos valores de porosidade, capacidade de campo e ponto de murchamento impactaram somente nos pontos de máximas vazões.

A variação dos parâmetros de condutividade hidráulica lateral, albedo, condutividade térmica, capacidade térmica, distribuição de poro-pressão, pressão de borbulhamento e densidade aparente não alteraram as respostas de vazão do modelo hidrológico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro ao Projeto Temático e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro em forma de bolsa de doutorado.

BIBLIOGRAFIA

ATLAS dos Remanescentes Florestais de Mata Atlântica (2003). Fundação SOS Mata Atlântica/INPE.

DHSVM (2004). Distributed Hydrology Soil Vegetation Model. Disponível em: <<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/>>. Acesso em: 17 set. 2004.

MAIDMENT, D. R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill. New York, 1424 p.

NASA (2006). National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: 07 fev. 2006.

PLANO DE BACIAS 2000-2003 (2003). UGRHI 2 Paraíba do Sul.: CPTI - Cooperativa de Serviços, Pesquisas Tecnológicas e Industriais. Disponível em: <http://www.comiteps.sp.gov.br/mapas.html>. Acesso em: 05 mar. 2006.

WIGMOSTA, M. S.; NIJSSEN, B.; STORCK, P. (2002) “*The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*”, in *Mathematical models of small watershed. Hydrology and applications*. Org. Singh, V. P. e Frevert, D. K. Ed. Water Resource Publications, Littleton – CO, pp. 7–42.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. (1994). “*A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain*”. *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, pp. 1665–1679.