Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Ciência e Tecnologia
Faculdade de Engenharia

Willker Figueirêdo da Luz Júnior

Implementação e Estudo da Aplicabilidade do Modelo Hidrológico DHSVM à Micro-Bacia Representativa em Mata Atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro

Rio de Janeiro
2016

Willker Figueirêdo da Luz Júnior

Implementação e Estudo da Aplicabilidade do Modelo Hidrológico DHSVM à Micro-Bacia Representativa em Mata Atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial (Linha de Pesquisa: Gestão Sustentável de Recursos Hídricos).

Orientadora: Profª. Dr ª. Luciene Pimentel da Silva

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

L979 Luz Júnior, Willker Figueirêdo da.
Implementação e estudo da aplicabilidade do modelo hidrológico DHSVM à micro-bacia representativa em mata atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro / Willker Figueirêdo da Luz Júnior. - 2016.
142f.

Orientador: Luciene Pimentel da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Hidrologia - Modelos - Dissertações. 3. Mata Atlântica - Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 556

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Willker Figueirêdo da Luz Júnior

Implementação e Estudo da Aplicabilidade do Modelo Hidrológico DHSVM à Micro-Bacia Representativa em Mata Atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial (Linha de Pesquisa: Gestão Sustentável de Recursos Hídricos).

Aprovado em:

Banca Examinadora:

_____

Prof.ª Dr. ª Luciene Pimentel da Silva (Orientadora)

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Júlio Domingos Nunes Fortes

Faculdade de Engenharia – UERJ

_____

Prof. Dr. Francisco Jacomé Gurgel Júnior

Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, a luz de nosso mundo.

A minha orientadora Professora Ph.D. Luciene Pimentel da Silva que esteve comigo em todos os momentos difíceis desta caminhada.

Aos Professores Júlio Fortes e Gurgel por suas contribuições para o texto final da dissertação.

Aos colegas do PEAMB, Dayana, Wagner e Márcio.

Aos professores do PEAMB e a todos os professores que estiveram presentes até hoje em minha formação acadêmica.

Ao parque de água Rio *Water Planet* por permitir a locação de equipamentos de monitoramento hidrológico em suas dependências.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa DTI no contexto do Projeto HIDROCIDADES que compõe a Rede de Pesquisa Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM).

À Financiadora de Estudos e Projetos (MCT/FINEP) pelo apoio financeiro à pesquisa, desenvolvida no contexto do Projeto HIDROCIDADES que compõe a Rede de Pesquisa Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM).

Aos colegas e Professores que integram a Rede de Pesquisa MCT/FINEP/BRUM por suas sugestões e críticas à dissertação, sobretudo UNICAMP, UFRN, UFMG, UFG, UFScar, USP-São Carlos.

Aos funcionários da FUNCAMP pelo apoio na gestão dos recursos financeiros da Rede BRUM.

Viver é enfrentar um problema atrás do outro.
O modo como você o encara é que faz a diferença.

Benjamin Franklin

RESUMO

LUZ JÚNIOR, Willker Figueirêdo da. *Implementação e estudo da aplicabilidade do modelo hidrológico DHSVM à micro-bacia representativa em mata atlântica, Jacarepaguá, Rio de Janeiro.* 2016. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

As florestas prestam importantes serviços ambientais como contribuir para o equilíbrio térmico da água, reduzindo os extremos de temperatura e mantendo a oxigenação do meio aquático, absorção de nutrientes pelas árvores, arbustos e plantas herbáceas evitando a lixiviação excessiva dos sais minerais do solo para os cursos d'agua e assegurando a disponibilidade de água amortecendo eventos de cheias e garantindo a manutenção dos níveis d'água fluviais nos períodos de seca. No Brasil destaca-se o Bioma Mata Atlântica onde vivem cerca de 120 milhões de pessoas, sendo também um dos mais ameaçados, restando apenas 8,5 % de sua cobertura inicial. A incerteza acerca dos efeitos das mudanças climáticas sobre as florestas deixa dúvidas sobre seu futuro. Neste sentido é importante entender os processos hídricos, para o manejo adequado e preservação de seus remanescentes. Neste trabalho foi apropriado o processo metodológico para a Implementação e análise exploratória da aplicabilidade do DHSVM para uma micro-bacia experimental (2,55 km²) de Mata Atlântica localizada no Parque Estadual da Pedra Branca, Jacarepaguá, Rio de Janeiro. A metodologia envolveu a aquisição do código computacional, bem como documentação do sistema hidrológico no sítio da Universidade de Washington. Observou-se a existência de listas de discussão, cuja participação, facilitou a implementação e a realização dos testes do modelo. O modelo foi implementado no laboratório de estudos hidrológicos da UERJ e foi realizada uma análise exploratória do mesmo. Além dos testes disponíveis na documentação, foram realizadas análises de incertezas na concepção do modelo e na base de dados implementada para a micro-bacia em mata atlântica, objeto do estudo. A análise exploratória compreendeu ainda estudo de sensibilidade para parâmetros do modelo. Foram também realizadas algumas tentativas de calibração e ajuste dos parâmetros. Observou-se que o modelo apresenta alta complexidade e algumas incertezas em sua concepção. Na análise dos dados, identificou-se a necessidade do prolongamento da observação das séries climatológicas e hidrológicas, assim como da ampliação da base de dados sobre parâmetros físico-hídricos dos solos, que geraram algumas incertezas no processo de calibração do modelo. Na análise de sensibilidade destacou-se o parâmetro capacidade de campo. Observa-se a necessidade de aprofundamento dos estudos para melhorar a calibração do modelo, como também garantir a identificabilidade física dos parâmetros. A continuidade dos estudos com o modelo DHSVM poderá, entre outros, permitir estudos de cenários envolvendo a análise do impacto das mudanças climáticas na conservação da mata atlântica, bem como na distribuição e disponibilidade de água fornecida pela mesma.

Palavras chave: DHSVM; Análise exploratória; Mata Atlântica.

ABSTRACT

LUZ JR, Willker Figueirêdo da. *The implementation and application of the hydrological model DHSVM to a small-scale representative catchment in atlantic forest, Jacarepaguá, Rio de Janeiro*. 2016. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The forests provide important ecosystem services as they contribute to the thermal balance of the water, reducing the extremes of temperature and maintaining the oxygenation of the water environment, nutrient uptake by trees, shrubs and herbaceous plants avoiding excessive leaching of mineral soil salts into river streams and ensuring the availability of water by dampening events of floods and ensuring the maintenance water levels during dry weather periods. In Brazil the Atlantic Forest where about 120 million people lives, is one of the most threatened biomes, with only 8.5% of its initial coverage. Uncertainty about the effects of climate change on forests contributes to higher risks towards their preservation in the future. In this sense it is important to deeper understanding of hydrological processes for better water management and preservation of their remaining. This work appropriated methodological process for the Implementation and exploratory analysis of the applicability of DHSVM to an experimental small-scale catchment (2.55 km²) in Atlantic Forest located in the Pedra Branca State Park, Jacarepaguá, Rio de Janeiro. The methodology involved the acquisition of the computer code as well as the hydrological system documentation in the website of the University of Washington. It was also observed mailing lists, which the participation, facilitated the implementation and execution of the model tests. The model was implemented in the laboratory of hydrological studies of UERJ and an exploratory analysis was carried out. In addition to the tests available in the documentation, it was performed an uncertainty analyzes of the model design and of the small-scale catchment's database, object of the study. The exploratory analysis also involved a sensitivity study of model parameters. It was also carried out some calibration attempts and adjustment of the parameters. It was observed that the model is of high complexity and some uncertainties in its design were observed. In the data analysis, it was identified the need for prolonged observation of climatological and hydrological series, as well as the expansion of basic data on physical soil water parameters, which generated some uncertainties in the model calibration process. In the sensitivity analysis the field capacity parameter emerged as the most sensible among parameters studied. It was observed the need for further studies in order to improve the model's calibration and improve parameters physical identifiability. The continuation of studies with DHSVM model may allow studies of scenarios involving the analysis of the impact of climate change on conservation of the atlantic forest, as well as in the water distribution and availability.

Keywords: DHSVM; Exploratory analysis; Atlantic forest.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo hidrológico florestal 24
Figura 2 - Curvas de temperatura, velocidade de vento e concentração de vapor sob uma floresta (b) e sobre solo nu (a) 31
Figura 5 - Localização da bacia representativa e dos equipamentos para monitoramento 48
Figura 3 - Curvas de nível Bacia de Estudo 49
Figura 4 - Vertedouro de seção retangular bacia do Rio Sacarrão, PEPB, Rio de Janeiro. 53
Figura 6 - Torre de fixação do data-logger, painel solar e pluviômetro 54
Figura 7 - Estação Climatológica SOLAR 2000 no Rio *Water Planet* 55
Figura 8 - Estrutura e fluxo de processos do DHSVM Fonte: Adaptado de Wigmosta et al. (2002) e Cuartas (2008) 58
Figura 9 - Representação no modelo do movimento da água na direção do rio. As partes em marrom claro mostram as áreas não saturadas e, em marrom escuro, as áreas saturadas. As setas verticais indicam a percolação da zona de raízes e a recarga do lençol freático da célula local. As células trocam água com suas vizinhas próximas resultando em um movimento descendente de água (setas horizontais) na direção do curso de água. 67
Figura 10 - Modelo escoamento 69
Figura 11 - Estrutura site 71
Figura 12 - Conteúdo DHSVM 78
Figura 13 - Compilação myconvert 81
Figura 14 - Conversão ascii para binário 82
Figura 15 - Compilação DHSVM 86
Figura 16 - Execução DHSVM 87
Figura 17 - Mapa da bacia hidrográfica do caso- teste 88
Figura 18 - Precipitações caso teste 89
Figura 19 - Hidrograma de vazões do caso-teste do DHSVM 90
Figura 20- Diretório implementação DHSVM 91
Figura 21 - Modelo Digital do Terreno (MDT) - Rede Triangular Irregular 92
Figura 22 - Levantamento Cobertura do Solo 93

Figura 23 - Cobertura do solo 95
Figura 24 - Profundidade solo..... 96
Figura 25 - Histograma dados fluviométricos e climatológicos para a micro-bacia .. 98
Figura 26 - Precipitação Water Planet x Grota Funda 99
Figura 27 - Vazões observadas período outubro 2008 - fevereiro 2009 100
Figura 28 - Hidrograma Taxa de Infiltração Máxima variação entre -20 % e + 20 % 101
Figura 29 - Hidrograma Taxa de Infiltração Máxima variação entre -20 % e + 20 % (Escala Detalhada) 102
Figura 30 - Hidrograma Coeficiente decaimento exponencial variação entre -20 % e + 20 % 103
Figura 31 - Hidrograma Coeficiente decaimento exponencial variação entre -20 % e + 20 % 103
Figura 32 - Hidrograma Condutividade lateral variação entre -20 % e + 20 % 104
Figura 33 - Hidrograma Condutividade lateral variação entre -20 % e + 20 % (Escala Detalhada) 104
Figura 34 - Hidrograma Controle 2010 105
Figura 35 - Hidrograma variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 106
Figura 36 - Hidrograma Detalhado variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 106
Figura 37 - Umidade do solo na camada superior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 107
Figura 38 - Umidade do solo na camada superior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 107
Figura 39- Umidade do solo na camada inferior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 108
Figura 40 - Evapotranspiração variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50% 109
Figura 41 - Hidrograma variação Decaimento exponencial -50 % e +50%..... 110
Figura 42 - Hidrograma (Detalhado) variação Decaimento exponencial -50 % e +50% 110
Figura 43 - Umidade do solo na camada superior variação Decaimento exponencial máxima -50 % e +50%..... 111
Figura 44 - Umidade do solo na camada intermediária variação Decaimento exponencial -50 % e +50% 111

Figura 45 - Umidade do solo na camada inferior variação Decaimento exponencial - 50 % e +50% 112
Figura 46 - Evapotranspiração variação Decaimento exponencial -50 % e +50%.. 112
Figura 47 - Hidrograma variação Condutividade lateral -50 % e +50% 113
Figura 48 - Hidrograma (Detalhado) variação Condutividade lateral -50 % e +50% 114
Figura 49 - Umidade do solo na camada superior variação Condutividade lateral -50 % e +50% 114
Figura 50 - Umidade do solo na camada intermediária variação Condutividade lateral -50 % e +50% 115
Figura 51 - Umidade do solo na camada inferior variação Condutividade lateral -50 % e +50% 115
Figura 52 - Evapotranspiração variação Condutividade lateral -50 % e +50% 116
Figura 53 - Hidrograma variação Capacidade de campo .18 e .38..... 117
Figura 54 - Hidrograma (Detalhado) variação Capacidade de campo .18 e .38..... 117
Figura 55 - Umidade do solo na camada superior variação Capacidade de campo .18 e .38..... 118
Figura 56 - Umidade do solo na camada intermediária variação Capacidade de campo .18 e .38 118
Figura 57 - Umidade do solo na camada superior variação Capacidade de campo .18 e .38..... 119
Figura 58 - Evapotranspiração variação Capacidade de campo .18 e .38..... 119
Figura 59 - Hidrograma Controle outubro 2008 - fevereiro 2009 120
Figura 60 - Simulação Série dobrada 121
Figura 61 - Tentativa de calibração DHSVM..... 122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água..... 39
Quadro 2- *Softwares* de apoio para implementação e execução do DHSVM..... 77
Quadro 3- Funções diretórios DHSVM 78
Quadro 4- Estruturação base espacial..... 79
Quadro 5- Formatos de dados para conversão em binário..... 82
Quadro 6- Arquivos rede de drenagem e estradas..... 83
Quadro 7- Unidades métricas dos dados climatológicos que alimentam o DHSVM. 84
Quadro 8- Dados iniciais DHSVM..... 84
Quadro 9 - Códigos Raster Cobertura do Solo 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação USDA segundo a textura dos solos da micro-bacia no Rio Sacarrão (Rio de Janeiro)..... 50
Tabela 2 - Coordenadas geográficas de instalação dos equipamentos da estação fluviométrica..... 52
Tabela 3 - Parâmetros solo..... 72
Tabela 4 - Parâmetros áreas de afloramentos rochosos e matacões..... 73
Tabela 5 - Parâmetros Floresta Ombrófila Densa Submontana 73
Tabela 6 - Parâmetros Floresta Ombrófila Densa Montana..... 74
Tabela 7 - Parâmetros regiões de macega..... 75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRACOS	*Anglo Brazilian Amazonian Climate Observational Study*
ArcGIS	*Software de Sistemas de Informações Geográficas da ESRI*
AML	*Arc Macro Language*
DHSVM	*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
HIDROCIDADES	Cidades, qualidade de vida e recursos hídricos
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IFSP	Instituto Florestal de São Paulo
IPP	Instituto Pereira Passos
LBA	Experimento de Larga Escala na Biosfera-Atmosfera na Amazônia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
NSE	Coeficiente de Nash & Sutcliffe
PEPB	Parque Estadual da Pedra Branca
PBIAS	Percentual de tendência bias
R^2	Coeficiente de determinação
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RSR	Razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SVAT	Sistema Solo-Vegetação-Atmosfera
SWAT	*Soil and Water Assessment Tool*
TIN	*Triangulated Irregular Network*
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
USDA	*United States Department of Agriculture*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 16
1 **HIDROLOGIA FLORESTAL** 23
1.1 **Caracterização das florestas** 23
1.2 **Interceptação vegetal** 25
1.3 **Precipitação interna** 27
1.4 **Evapotranspiração** 28
1.5 **Serapilheira, macro-poros e infiltração** 32
1.6 **Componentes dos escoamentos fluviais nas florestas** 32
2 **SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA** 34
2.1 **Modelos hidrológicos** 34
2.2 **Exemplos de modelos e de aplicações envolvendo simulação hidrológica** 36
2.3 **Avaliação, interpretação e comunicação da performance de um modelo hidrológico** 44
3 **METODOLOGIA** 47
3.1 **Caracterização da área de estudo** 47
3.1.1 Topografia 48
3.1.2 Solos 49
3.1.3 Vegetação 51
3.1.4 Série temporal de vazões 51
3.1.5 Séries Temporais de variáveis climatológicas 54
3.2 **Concepção do modelo hidrológico DHSVM** 56
3.2.1 Estrutura do DHSVM 57
3.2.2 Evapotranspiração 58
3.2.3 Resistência Aerodinâmica 62
3.2.4 Resistência dos dosséis 64
3.2.5 Infiltração e percolação da água no solo não saturado 66
3.2.6 Escoamento saturado 69
3.2.7 Escoamento em rios e canais 70
3.3 **Implementação do modelo DHSVM** 71

3.4 **Análise exploratória do modelo** 71
3.5 **Ajuste e calibração de parâmetros** 72
4 **APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS** 77
4.1 **Implementação do modelo DHSVM** 77
4.1.1 Softwares de apoio 77
4.1.2 Código DHSVM 78
4.1.3 Conversão de Raster para Bin 80
4.1.4 Rede de drenagem e estradas 83
4.1.5 Arquivos de dados climatológicos/meteorológicos 83
4.1.6 Inicialização das variáveis de estado do DHSVM 84
4.1.7 Arquivo de configuração 85
4.1.8 Compilação do código-fonte 85
4.1.9 Execução do código computacional do modelo DHSVM 86
4.2 **Análise exploratória** 87
4.2.1 Processamento do caso-teste do DHSVM 87
4.2.2 Preparação e análise base de dados da micro-bacia no Rio Sacarrão 90
4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros do DHSVM 100
4.3 **Ajuste de parâmetros para estudo de cenários** 120
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 123
REFERÊNCIAS 128
APÊNDICE A 134

INTRODUÇÃO

Problemática e Justificativa

O Brasil é formado por seis biomas com características próprias definidas pelo macro clima, fitofisionomia, tipo de solo e altitude, sendo estes: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal. A vegetação exerce um papel importante nas características dos biomas, seu estado de conservação e continuidade definem a existência ou não de hábitats para as espécies, a manutenção de serviços ambientais e o fornecimento de bens essenciais à sobrevivência de populações humanas.

Dentre estes a Mata Atlântica tem importância vital para cerca de 120 milhões de brasileiros, em uma região onde são gerados aproximadamente 70 % do PIB brasileiro, prestando importantes serviços ambientais como regular o fluxo dos mananciais hídricos, assegurar a fertilidade do solo, proteger as encostas e controlar o equilíbrio climático (Ministério do Meio Ambiente, 2015).

Entretanto, hoje restam apenas 8,5% de remanescentes florestais acima de 100 hectares (SOS Mata Atlântica, 2015) da floresta original de Mata Atlântica que desde o século XIV vem sofrendo os impactos das atividades antrópicas. Devido ao índice de destruição deste bioma, pouco se sabe sobre os processos hidrológicos que ocorrem na Mata Atlântica.

Uma das áreas mais expressivas de remanescentes da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro é o Parque Estadual da Pedra Branca, que ocupa cerca de 10% da área do município do Rio de Janeiro, representando a maior floresta urbana do país. Por estar inserido no domínio do Bioma Mata Atlântica, apresenta ampla diversidade biológica e alto endemismo.

Por muitos anos, o Maciço da Pedra Branca sofreu com o processo de ocupação e devastação da região, iniciado no período colonial com a extração do pau-brasil e com os sucessivos ciclos econômicos que o sucederam como o da cana-de-açúcar, café e pecuária, o que significou o desmatamento de grande parte de sua flora. As primeiras iniciativas de proteção da área foram relacionadas à necessidade de preservação dos mananciais que abasteciam alguns dos bairros da Cidade como o Camorim e Vargem Grande, na Baixada de Jacarepaguá.

O Parque foi criado pela Lei Estadual nº 2.377 de 28 de junho de 1974, compreendendo todas as áreas situadas acima da linha da cota de 100 m do Maciço da Pedra Branca e seus contrafortes, com área aproximada de 12.492 hectares, localizado na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro, em partes de 17 bairros: Jacarepaguá, Taquara, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes, Grumari, Padre Miguel, Bangu, Senador Camará, Jardim Sulacap, Realengo, Santíssimo, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Guaratiba e Barra de Guaratiba.

O Parque Estadual da Pedra Branca se encontra localizado no interior da malha urbana e por isso, está sujeito a diferentes pressões, tendo como principal ameaça à preservação dos ecossistemas à expansão urbana que tem aumentado nas encostas em torno dos seus limites, através da favelização e da construção de residências de alto padrão, além de sofrer entre outros impactos, extrativismo (banana), caça, queimadas, biopirataria e outros.

O Parque possui uma importante rede hidrográfica, já que parte dela contribui para o abastecimento de água da região circunvizinha, destacando-se as represas do Pau da Fome, do Sacarrão, do Camorim (século XIX), das Taxas e do Engenho Novo. Nesta área situam-se os principais divisores de grandes bacias do município do Rio de Janeiro, são 08 bacias principais e 53 micro-bacias. Pode-se desta forma identificar as três grandes bacias que dividem o maciço em suas vertentes norte (Baía de Guanabara), leste (Lagoas Costeiras e Oceano Atlântico) e oeste (Baía de Sepetiba).

Embora a Cidade do Rio de Janeiro seja emblematicamente conhecida por suas graves enchentes urbanas (destacam-se 1966, 1988, 1996, 2010, 2016), nos anos de 2014 e 2015 a cidade do Rio de Janeiro, assim como toda a região sudeste do Brasil, já evidenciando os riscos condicionados pelas mudanças climáticas, viveram a pior crise de escassez hídrica da história. Neste período foram observados níveis críticos nos reservatórios da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul que colocaram em risco o reservatório do Guandu, responsável pelo abastecimento de mais de 80% da Cidade do Rio de Janeiro. E ainda, que se observe a estratégia dos anos recentes que antecedem 2016, de ampliação do Sistema Guandu para abastecimento de um percentual ainda maior de usuários, com possível desativação

dos sistemas isolados de abastecimento de água da Baixada de Jacarepaguá, como o que existe na área objeto de estudo (do Sacarrão), a crise hídrica chamou atenção das Agências e do Poder Público para a importância de pequenos mananciais no aumento da segurança hídrica na Cidade.

Destaca-se ainda, que entre os objetivos, as Políticas Nacional e Estadual de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, incluem a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, sendo fundamental o entendimento das relações dos processos envolvidos na fase terrestre do ciclo hidrológico condicionados pelos elementos climáticos.

Os ecossistemas naturais são sistemas moldados pela natureza, os quais o homem não tem total controle sobre seu comportamento, portanto uma das formas de melhor entender a dinâmica dos processos hidrológicos é o estudo de bacias experimentais representativas, onde é possível através da observação de vários dos elementos do ciclo hidrológico, melhor compreender o comportamento destes sistemas.

Desde 2008 o Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos – GRHIP, mantém no contexto do Projeto “Cidades, Qualidade de vida e Recursos Hídricos” – HIDROCIDADES (com apoio financeiro do CNPq, FAPERJ e FINEP), uma bacia representativa com duas estações fluviométricas: uma localizada em um dos córregos formadores do Rio Sacarrão no interior do Parque Estadual da Pedra Branca, e outra no Rio Morto (para o qual drenam as águas do Sacarrão) pouco antes do Rio interceptar a Estrada dos Bandeirantes na altura do Parque de Águas Rio *Water Planet.* Além do monitoramento fluviométrico, o Projeto HIDROCIDADES mantém também, duas estações climatológicas localizadas no parque aquático *Rio Water Planet* ,um tanque evaporimétrico tipo Classe A, e realiza campanhas de medição de vazões, de análise da qualidade da água e levantamento de propriedades físico-hídrica dos solos, assim como dados para detalhamento do mapeamento. O Projeto está atualmente associado à Rede de Pesquisa MCT/FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia) de Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM) que tem apresentado contribuições importantes para a melhoria do planejamento e da gestão dos recursos hídricos.

A hidrologia envolve a análise integrada de fenômenos naturais complexos como precipitação, evaporação, infiltração, e escoamentos nos solos, superficiais e em rios, os quais dependem de características do clima e da superfície (incluindo os solos que a constituem) e das ações de origem antrópica, que constituem um importante desafio para as análises quantitativas e dos parâmetros determinantes da qualidade das águas.

Os processos hidrológicos em regiões florestadas têm características específicas em relação àqueles observados em regiões urbanas, onde o escoamento superficial assume papel preponderante, ou das regiões agrícolas onde as culturas são bem conhecidas, a vegetação está em crescimento e o manejo da drenagem do terreno é bem definido. Nas regiões de floresta a interceptação pelos dosséis, assim como o armazenamento nos solos e a evapotranspiração assumem papel preponderante. Nas florestas, a serapilheira presente na superfície dos terrenos e os macro-poros no interior dos solos facilitam a infiltração e a percolação das águas pluviais não evaporadas e não interceptadas pelo dossel, e que atingem a superfície. Assim, o escoamento superficial é minimizado e os rios e canais são alimentados preponderantemente pelas contribuições dos escoamentos sub-superficial e subterrâneo.

Embora o monitoramento hidrológico permita o registro de alguns dos elementos do ciclo hidrológico. Nem todos os elementos podem ser monitorados em qualquer escala espacial ou de tempo. Além disso, a complexidade desses fenômenos, dificultam sua análise integrada e de suas inter-relações. As técnicas de simulação hidrológica permitem a representação matemática e computacional dos processos envolvidos no ciclo hidrológico através das equações físicas que os descrevem, integrando-os e representando suas interdependências, permitindo assim o cálculo de vazões fluviais e de outros elementos das relações chuva-vazão. Os modelos chuva-vazão permitem também estudos de cenários para situações críticas, permitindo assim aos gestores, análises tipo “causa-efeito”, que contribuem para a diminuição da vulnerabilidade e aumento da resiliência dos sistemas hídricos em tempos de mudanças climáticas, além de suporte na proposta de políticas públicas, marcos regulatórios e nas comunicações das questões associadas à água.

Em termos relativos, são poucos os estudos hidrológicos em regiões florestadas no Brasil, destacando-se os esforços mais recentes sobretudo no Bioma Amazônia, como os estudos conduzidos por Cuartas et al. (2012) na microbacia Asu localizada dentro da reserva de Cuieiras. Com relação à Mata Atlântica destacam-se os estudos de Arcova, Cicco e Rocha, (2003), Cicco (2009), Donato et al. (2008) e inclusive de modelagem hidrológica Kruk et al. (2009), desenvolvidos para quatro bacias experimentais, localizadas no Estado de São Paulo, na Serra da Bocaina, no município de Cunha.

Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar de forma exploratória a aplicabilidade do modelo hidrológico físico-distribuído DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*) à representação dos processos envolvidos no ciclo hidrológico em uma micro bacia experimental e representativa, nos domínios da Mata Atlântica, localizada dentro dos limites do Parque Estadual da Pedra Branca, em Vargem Grande, Jacarepaguá, município do Rio de Janeiro.

Objetivos específicos

- Implementar o Modelo DHSVM;
- Elaborar roteiro em forma de tutorial detalhado em português para implementação do modelo e manual para aplicação do DHSVM;
- Realizar avaliação exploratória do modelo DHSVM (processar casos-teste do modelo DHSVM; formatar e implementar a base de dados para a bacia objeto do estudo no Sistema de Informações Geográficas; analisar as incertezas;implementar o caso objeto de estudo da Bacia do Rio Sacarrão;analisar a sensibilidade dos parâmetros do DHSVM);
- Processar o modelo DHSVM e ajustar os parâmetros do modelo para a micro-bacia no Rio Sacarrão;
- Avaliar a aplicabilidade do modelo DHSVM.

Estrutura da dissertação

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação foi organizada da seguinte forma:

Inicialmente apresenta-se a introdução, onde são apresentados a problemática, a justificativa da pesquisa, os objetivos gerais e específicos. Seguem-se então os capítulos 1, 2, 3 e 4, e as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, lista de referências e apêndice A.

No capítulo 1 é apresentado o referencial teórico sobre os processos hidrológicos que ocorrem nas florestas, explicitando suas características

No capítulo 2 são apresentados conceitos de modelagem hidrológica, assim como diferentes modelos, suas concepções e diferenças.

No capítulo 3 são apresentados os elementos metodológicos da pesquisa da dissertação:

1. A caracterização do maciço da Pedra Branca com destaque para a micro-bacia experimental e representativa no trecho superior do Rio Sacarrão, objeto de estudo da pesquisa;
2. O modelo DHSVM, a descrição e concepção dos módulos do modelo, dados de entrada e processamento, assim como os casos-teste disponíveis e análise de sensibilidade;
3. Implementação da base de dados da bacia de estudo, calibração e validação dos parâmetros.

No capítulo 4 são descritos e discutidos os resultados da pesquisa: processamento dos casos-teste; análise de sensibilidade dos parâmetros do DHSVM; o tutorial para implementação e processamento do DHSVM; base de dados da micro-bacia objeto do estudo; calibração e validação dos parâmetros; aplicabilidade do modelo DHSVM à micro-bacia representativa em Mata Atlântica (Maciço da Pedra Branca vertente Jacarepaguá).

Seguem-se então a apresentação das conclusões e sugestões para trabalhos futuros e lista de referências.

No Apêndice A é apresentado o tutorial completo para implementação e processamento do DHSVM, e o manual de usuário.

1 HIDROLOGIA FLORESTAL

1.1 Caracterização das florestas

As florestas são caracterizadas pela cobertura densa de árvores. Além da biodiversidade, fornecem um número de riquezas ou recursos importantes no desenvolvimento humano como a madeira, frutos, plantas medicinais, caça, piscicultura e reservas hídricas. Podem ser naturais, originadas do reflorestamento (matas secundárias) ou plantadas (em geral com objetivo do fornecimento de madeira). Por isso, boa parte das florestas do mundo foram desmatadas para retirada dessas riquezas ou para dar lugar a cultivos agrícolas, criação de animais e ocupações humanas. A simples remoção das matas expõe a superfície dos solos à agentes naturais como ventos e chuvas, e acelera o processo de erosão. Os sedimentos daí originados, além de empobrecerem os solos por carrearem a matéria orgânica, acabam se depositando nas partes mais baixas do relevo ou convergindo para os leitos fluviais, levando em última instância ao assoreamento de seus leitos.

O problema do aquecimento global e das mudanças climáticas também chamaram atenção para a importância das florestas no clima. As florestas armazenam grandes quantidades de carbono, tanto no dossel quanto nos solos. Quando a vegetação é removida, sobretudo pelas queimadas, a maioria desse carbono armazenado é emitido de volta à atmosfera, contribuindo para o aquecimento global. Além disso, grande parte do vapor presente na atmosfera tem origem no processo de evapotranspiração, que impacta a formação de nuvens e a ocorrência das chuvas, que por sua vez podem alterar a ocorrência das precipitações até mesmo em locais distantes. A interceptação e a precipitação interna nas florestas sobre a serapilheira, somado à formação típica de macro-poros nos solos das florestas, facilitam a infiltração, fazendo com que os solos constituam grandes reservas de água, que alimentam os lençóis freáticos, e mantém os escoamentos fluviais.

O uso e cobertura do solo afetam diretamente a dinâmica do ciclo hidrológico de uma região, alterando o grau de contribuição e magnitude dos processos envolvidos, assim como os meios e caminhos utilizados. Estudos (BRAGA, 2005; MATTOS JUNIOR, 2008) apontam que a presença de cobertura florestal em bacias hidrográficas promove a regularização do regime dos rios e a melhora na qualidade

da água. As altas taxas de infiltração e percolação são capazes de manter os escoamentos fluviais ainda em períodos de estiagem, impedindo que os cursos d'água sequem. Já em bacias sem a proteção florestal a infiltração no solo é menor, diminuindo as taxas de percolação que alimentam os lençóis freáticos, sobretudo nas bacias urbanas. O escoamento superficial aumenta em volume, fazendo com que a água da chuva atinja rapidamente a calha do rio, provocando inundações no período úmido e diminuindo a disponibilidade hídrica durante a estiagem. Nas áreas intensamente urbanizadas, observa-se que rios menores costumam apresentar leito seco durante a estiagem.

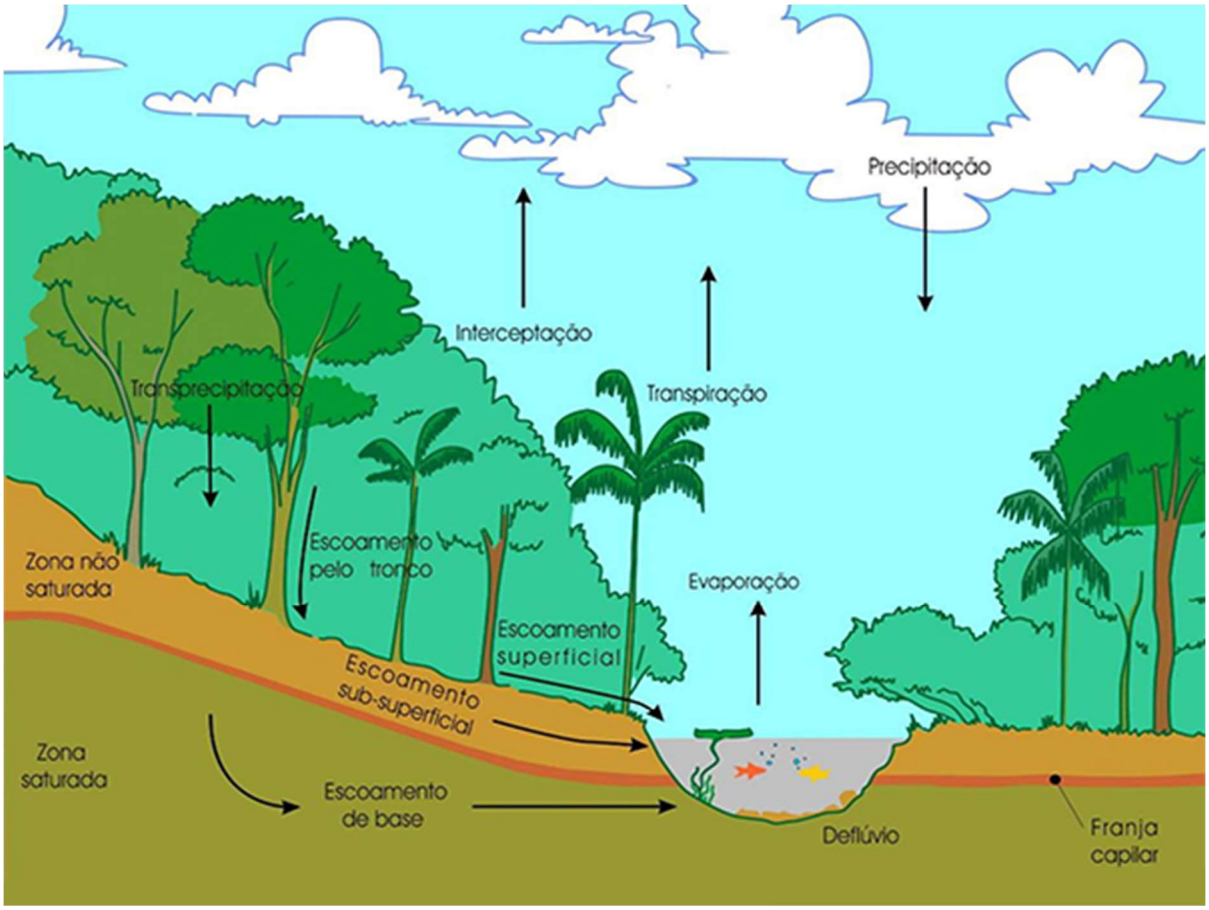
Nas bacias florestadas a erosão do solo ocorre a taxas naturais, pois o material orgânico depositado na superfície do solo, denominado serapilheira, junto com o dossel, impede o impacto direto das gotas de chuva na superfície dos solos. Já nas áreas desprovidas de vegetação há um intenso processo de carreamento de material para a calha do rio aumentando a turbidez e o assoreamento dos rios.

Para bacia em Mata Atlântica foram encontradas perdas de solos da ordem de 162 kg/hectare/ano, muito inferior aos valores médios encontrados para a região de Cunha, onde o estudo foi conduzido, que estão entre 6.600 a 41.500 kg/hectare/ano (INSTITUTO FLORESTAL SÃO PAULO, 2015).

As florestas ainda prestam outros inúmeros serviços ambientais como contribuir para o equilíbrio térmico da água, reduzindo os extremos de temperatura e mantendo a oxigenação do meio aquático, absorção de nutrientes pelas árvores, arbustos e plantas herbáceas, evitando a lixiviação excessiva dos sais minerais do solo para o rio.

Para ilustrar os efeitos da Floresta no ciclo hidrológico (Figura 1) assim como as particularidades das fases do ciclo nestas regiões, detalha-se a seguir aos processos de interceptação vegetal, precipitação interna, a evapotranspiração, a dinâmica do solo através da serapilheira, macro-poros, infiltração, percolação e os componentes do escoamento fluvial.

Figura 1: Ciclo hidrológico florestal



Fonte: Instituto Florestal de São Paulo, 2015

1.2 Interceptação vegetal

Conforme Helvey e Patric (1966) a interceptação é o processo pelo qual a precipitação é temporariamente retida pela copa das árvores ou dossel, e posteriormente evaporada para a atmosfera. É função das características da precipitação, da espécie vegetal, da densidade de cobertura vegetal (associada ao índice de Área Foliar – IAF) e da estação do ano (sobretudo para cultivos nas diferentes fases de crescimento). Para chuvas de curta duração e pouco volume, muitas vezes toda a chuva será interceptada e evaporada de volta à atmosfera. Para áreas densamente vegetadas, a interceptação é bastante significativa, e pode atingir até 25% da precipitação anual total (BRAS, 1990, p. 232; TUCCI, 2005, p.243). A precipitação interceptada é posteriormente evaporada para a atmosfera, mas parte da água inicialmente interceptada acaba gotejando no solo e escoando pelos troncos. Assim, em estudos experimentais para quantificação da interceptação vegetal, insere-se aparatos para medir o gotejamento no solo e as quantidades que escorrem pelos troncos. Por diferença, estima-se a parcela da precipitação

interceptada. Pesquisas realizadas na região amazônica Brasileira no contexto dos Projetos ABRACOS e LBA relataram que percentuais da ordem de 11-12% da chuva total eram interceptados pela vegetação nos sítios experimentais de Ji-Paraná em Rondônia e Marabá no Estado do Pará (PIMENTEL DA SILVA, 2015, p. 104).

Arcova et al. (2003) encontrou um valor de interceptação de 412 mm para a Mata Atlântica na bacia experimental de Cunha-SP, resultando em 18,6 % do total precipitado em um ano.

Tanto a transpiração através das cavidades da superfície das folhas, como a evaporação da água livre depositada na superfície das mesmas, necessitam aproximadamente da mesma quantidade de energia para ocorrer. Dessa forma, a transpiração é consideravelmente reduzida, enquanto houver disponibilidade de água na superfície das folhas. Embora o componente da interceptação possa ser considerado uma “perda”, é importante ressaltar que enquanto a água interceptada é evaporada, ocorre menor transpiração e a interceptação interfere na manutenção dos níveis de umidade nos solos (RUTTER, 1975).

Durante os períodos secos as perdas de água são sobretudo decorrentes da transpiração vegetal e evaporação da água do solo, porém durante o período chuvoso a precipitação interceptada compõe de forma importante as taxas de evapotranspiração (RUTTER, 1968).

A expressão usual para cálculo da interceptação vegetal (I) é dada pela eq. 1

$$I = S_v + R.E.t_r \qquad \text{eq. (1)}$$

Onde:

S_v é a capacidade de armazenamento da vegetação para a área de dossel projetada na superfície em metros;

R é a fração da área da superfície coberta por vegetação %;

E a taxa de evaporação direta da superfície das folhas durante a precipitação em m h^{-1}(metros por hora);

t_r é a duração da precipitação em h (horas).

Conforme relatado por Bras (1990, p. 232) o armazenamento é diretamente proporcional aos volumes totais precipitados (P), que pode ser incorporado à eq 1 na forma da eq. 2

$$I = S_v(1 - e^{-P/S_v}) + R.E.t_r \qquad \text{eq. (2)}$$

De forma alternativa Bras (1990, p. 233) também apresenta a relação empírica dada pela eq. 3 para cálculo da interceptação vegetal (I). Nesse caso, o autor sugere o trabalho de Gray (1973) para estimativa dos valores dos parâmetros “a, b e n”. Gray (1973) apud Bras (1990, p.233) apresenta ainda estimativas dos percentuais interceptados do total precipitado, por tipo de vegetação (cultivo) de acordo com a altura precipitada, suas características (chuvas de curta duração com baixa intensidade, chuvas recorrentes e repetitivas, etc.).

$$I = a + b.P^n \qquad \text{eq. (3)}$$

Por exemplo para o carvalho (em florestas) a=0,05; b=0,18 e n=1). Ou seja, nesse caso, para uma chuva total de 10 mm, resultaria em uma interceptação de 1,85 mm, ou 18,5% do total precipitado.

O Índice de área foliar IAF é definido pela razão entre a área foliar da vegetação pela área ocupada por esta. O IAF é de extrema importância para diversos estudos ambientais, sobretudo para a modelagem hidrológica. Pode ser estimado por métodos diretos onde há retirada da vegetação para analise ou métodos indiretos como uso de imagens de satélites e equipamentos específicos. (BAMBI, 2007)

1.3 Precipitação interna

A precipitação incidente sobre uma bacia florestal é a quantidade total de chuva medida acima das copas ou em terreno aberto próximo a superfície. Parte desta precipitação é interceptada pelo dossel, como visto no item 1.2. Nas regiões densamente florestadas, sobretudo florestas tropicais, pode também ocorrer ainda o fenômeno denominado “precipitação oculta”, onde pela condensação da neblina ocorre precipitação dentro da floresta. (BRUIJNZEEL, 1990, p.6). A precipitação

interna é a quantidade de chuva que atravessa o dossel florestal, incluindo as gotas que passam diretamente pelos espaços existentes entre as folhas da copa, assim como as gotas que respingam da água retida na copa. Na prática é difícil diferenciar a precipitação que passa diretamente pelo dossel, sem ser interceptada, da precipitação por gotejamento e aquela escorrida pelos troncos. Dessa forma, considera-se como precipitação interna a soma destes componentes (BRUIJNZEEL, 1990, p.9)

Foi estimado que a água que escorre pelos troncos em florestas tropicais representa entre 1 e 2 % da precipitação que atinge o solo. Porém este componente é de extrema importância no que tange o fluxo de nutrientes no sistema (BRUIJNZEEL, 1990, p. 18).

1.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração consiste no processo de perda de água das superfícies vegetadas para a atmosfera. Correspondendo de forma integrada à evaporação (que ocorre da superfície) e à transpiração, que ocorre através de cavidades (estômatos) presentes na superfície das folhas.

A água que deixa a superfície terrestre integra a atmosfera na forma de vapor, sendo este diretamente associado à origem das precipitações. A evapotranspiração depende de elementos do clima, como a radiação solar, temperatura, velocidade do vento, e umidade relativa do ar. Mas também, das características da superfície evaporante, sobretudo da espécie vegetal, e de seu estágio de crescimento, também associado à taxa de recobrimento dos solos.

Nas florestas, a evaporação ocorre predominantemente da superfície das folhas (interceptação pluvial), dos solos e dos corpos hídricos. Na prática, não é trivial separar a evaporação da transpiração. A fração de evaporação dos solos depende principalmente da radiação que penetra através do dossel e atinge os solos. A transpiração é controlada por características da espécie vegetal, como densidade de indivíduos, índice de área foliar (fração de cobertura de folhas); albedo (associado à refletividade da superfície); altura da planta (sua exposição à radiação);

profundidade, abrangência e densidade das raízes, entre outras características mais específicas.

A evapotranspiração real ao longo de um ano em uma bacia hidrográfica pode ser estimada pela diferença entre o total precipitado e o total escoado, o deflúvio, no exutório de controle da bacia. Estudos realizados por Cicco et al. (2009) nas bacias experimentais em Cunha, de domínio da Mata Atlântica, encontraram valores em torno de 763 mm (46,3 % da precipitação total anual) para a evapotranspiração total anual.

Cardoso et al. (2006) apresentaram um estudo hidro-ambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan em Nova Friburgo no Estado do Rio de Janeiro, também localizada nos domínios da mata atlântica. Para um período de três anos, encontraram a evapotranspiração média anual de 839 mm calculada pelo método de Thorthwaite e Mather (1955), ou seja, 38% do total anual médio precipitado.

Vários estudos no bioma Amazônico desenvolveram análises do processo de evapotranspiração (DA ROCHA; MANZI; SHUTTLEWORTH, 2013), geralmente envolvendo comparação com regiões desmatadas e instalação de torre de observação na floresta. Observa-se a aplicação recorrente da equação de Penman-Monteith (MENDONÇA; DANTAS, 2010) eq. 4, a partir de elementos medidos em estações climatológicas, vegetação e solos.

$$\lambda ET_o = \frac{(\Delta R_n - G) + \left[86{,}400 \frac{\rho_a c_p (e_s - e)}{r_{av}}\right]}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_{av}}\right)} \qquad \text{eq. (4)}$$

Onde,

ET_o é a taxa de evapotranspiração em m s^{-1};

Δ é a declividade da curva pressão de vapor saturado – temperatura em Pa $ºC^{-1}$;

R_n é a densidade do fluxo de radiação em rede em J m^{-2} h^{-1};

ρ_a é a massa específica do ar úmido em kg m^{-3};

c_p é o calor específico do ar a pressão constante em J Kg^{-1} $ºC^{-1}$;

e_s é a pressão de vapor saturada em Pa;

e é a pressão de vapor em Pa;

r_{av} é a resistência aerodinâmica do transporte de vapor entre o dossel superior e a altura de referência em s m^{-1};

r_s é a resistência do dossel ou resitência de superfície em s m^{-1};

λ é o calor latente de vaporização da água em J Kg^{-1};

e ɣ é a constante psicométrica em Pa ºC;

FAO 56 apresenta um roteiro detalhado para o cálculo da evapotranspiração pela equação de Penman-Monteith para níveis diários.

A temperatura do solo varia no espaço e no tempo, assumindo grande importância nos processos físicos do solo e nas trocas de energia com a atmosfera. A temperatura determina as taxas de evaporação e aeração do solo, assim como as reações químicas ocorrentes. A variação na temperatura influencia diretamente na germinação, crescimento radicular e na absorção de água e nutrientes. A taxa de crescimento radicular é influenciada pela temperatura do solo. Segundo Reichert et al. 2009 as raízes absorvem mais água à medida que a temperatura aumenta, até atingir o limite de 35 ºC, acima desta temperatura há redução na absorção de água.

O balanço energético das radiações incidentes torna-se uma forçante fundamental para o processo de evapotranspiração, pois fornece a energia necessária para que ocorram os fenômenos no sistema.

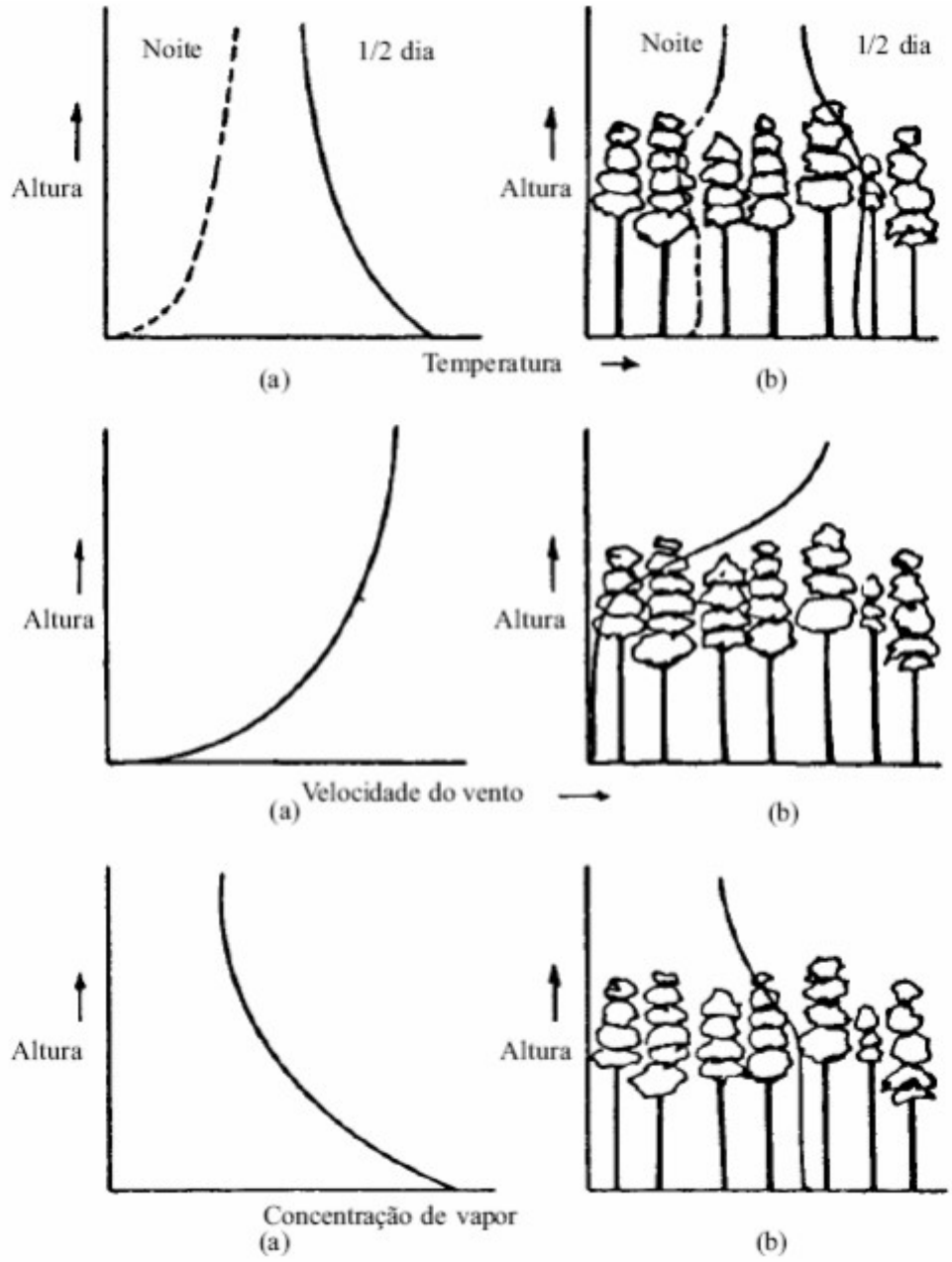
Todos os corpos emitem energia radiante, mas a qualidade da radiação emitida (espectro de comprimento de onda) depende da temperatura do corpo. A temperatura do sol, principal fonte energética de todos os sistemas terrestres, é de cerca de 6.000 K, emitindo ondas na faixa de 0,1 a 4,0 μm, que são chamadas de ondas curtas. Já a superfície terrestre apresenta temperaturas significativamente menores (em torno de 300 K) emitindo ondas na faixa de 4,0 a 100 μm que são consideradas ondas longas.

Uma floresta adulta consolidada se difere de vegetações de menor porte como culturas agrícolas e florestas em crescimento, devido a existência de um ambiente particular das florestas que é o espaço compreendido entre a copa das árvores e a superfície do solo. O micro clima deste ambiente florestal é basicamente diferente daquele que se observa sobre outras superfícies. Uma floresta pode reduzir de 73% a 86 % a quantidade de radiação de onda curta incidente, e este é

um dos principais efeitos da floresta sobre o clima. Por exemplo, no verão isto se reflete em uma redução de até 6ºC na temperatura do ar dentro da floresta (GEIGER, 2009).

Dentro da floresta, conforme mostra a Figura 2, a isotermia, a ausência de vento, e a inexistência de um gradiente de concentração de vapor contribuem para que praticamente não ocorra evaporação direta do solo. Ou seja, em período sem chuva, a evapotranspiração da floresta é praticamente só transpiração.

Figura 2: Curvas de temperatura, velocidade de vento e concentração de vapor sob uma floresta (b) e sobre solo nu (a)



Fonte: Satterlund e Adams (1992).

1.5 Serapilheira, macro-poros e infiltração

Uma característica particular dos solos florestais é a presença de uma camada orgânica em sua superfície, constituída de restos vegetais como folhas, caules, ramos, frutos, flores, sementes, por restos de animais, excretas e material fecal. Esta camada, denominada serapilheira, é responsável por proteger os solos da erosão, atuar como isolante térmico, reter quantidades significativas de água e fornecer nutrientes para o solo com a sua decomposição. Abreu (2006) quantificou a camada de serapilheira na Mata Atlântica encontrando valores entre 9,8 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ nas áreas de vale e 11,5 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ em áreas montanhosas (1Mg (lê-se Mega-grama = 1 tonelada).

Os solos florestais apresentam valores de porosidade acima da média, sobretudo pela presença de macro poros formados pelo sistema radicular, tocas de animais e a serapilheira. Com energia cinética reduzida, a precipitação interna ao entrar em contato com a superfície porosa e amortecedora da serapilheira impede o escorrimento superficial da água para as partes mais baixas do terreno, favorecendo a infiltração. Também a matéria orgânica decomposta é incorporada ao solo, proporcionando a ele excelente porosidade e, consequentemente, elevada capacidade de infiltração. Por esta a razão nas florestas o processo de escoamento superficial quando ocorre precipitação é quase nulo, ocorrendo um fenômeno denominado escoamento sub superficial, onde o escoamento rápido escorre através dos macro poros abaixo da superfície do solo (BRUIJNZEEL, 1990, p.9).

1.6 Componentes dos escoamentos fluviais nas florestas

O escoamento fluvial representa a água disponível nos rios, sobretudo na calha principal no exutório da bacia.

Os componentes do escoamento fluvial incluem os seguintes processos:

- Precipitação direta sobre os rios: É a precipitação que cai diretamente sobre a superfície líquida dos cursos d'água, sendo esta a primeira a deixar a bacia. Em termos de magnitude, trata-se de um componente que contribui pouco para a descarga da bacia, pois a proporção de área líquida em relação a superfície total da bacia é pequena. Embora constituindo fração desprezível

da chuva, este componente pode adquirir maior importância em situações de períodos chuvosos prolongados onde ocorre a expansão da rede de drenagem.

- Escoamento superficial: constitui a fração da precipitação que não se infiltra no solo, escoando de forma laminar pelas porções impermeáveis ou saturadas do terreno até atingir a rede de drenagem.
- Escoamento sub superficial: constitui a fração da precipitação que escoa lateralmente através dos macros poros presentes no solo, de acordo com a declividade do terreno.
- Escoamento de base: constitui o escoamento da zona saturada (água subterrânea). Após um evento de precipitação, quando o escoamento direto deixa a bacia, o escoamento de base é o único componente do escoamento fluvial.

2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A técnica da simulação hidrológica consiste na aplicação de um modelo hidrológico computacional com fins exploratórios (e.g. melhor entendimento da integração dos processos envolvidos no ciclo hidrológico); no estudo de cenários e como subsídio ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos; e ainda, na consolidação de políticas públicas e formulação de marcos regulatórios.

2.1 Modelos hidrológicos

O modelo em si, consiste de um código computacional que reúne um programa principal, várias sub-rotinas, em que são processados os cálculos de equações físicas e/ou empíricas, que representam os diferentes elementos que constituem o ciclo hidrológico: interceptação vegetal, evaporação, transpiração, infiltração, armazenamento de água nos solos e escoamentos. O processamento do modelo se dá à partir de um conjunto de dados que caracteriza a bacia hidrográfica, objeto do estudo. Entre outros, tipicamente: séries temporais de precipitação; observações climatológicas (radiação, temperatura, umidade, velocidade do vento) evapotranspiração; vazões observadas; parâmetros que caracterizem o uso e a ocupação dos solos; parâmetros físico-hídricos dos solos; e seções transversais de escoamento (BEVEN, 2001; TUCCI, 2005; PIMENTEL DA SILVA, 2015).

Os modelos hidrológicos, assim como os modelos de uma forma abrangente, buscam a representação de um objeto ou sistema numa linguagem ou forma facilitada de acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. No uso dos modelos é importante dominar a conceituação e equações envolvidas na representação dos processos hidrológicos, identificando as variáveis de estado, as variáveis “forçantes” (condicionantes), variáveis de fluxos e os parâmetros.

As variáveis de estado caracterizam os níveis e volumes de água em determinados estágios específicos, e.g. na representação do balanço de água interceptada. Uma variável de estado pode ser o volume de água interceptada presente no dossel.

As forçantes ou condicionantes são variáveis utilizadas pelo modelo, mas não são calculadas por ele, desta forma a variação desta variável deve ser explicitada ao modelo. Podem representar um fluxo de massa e/ou energia (fluxo forçante) ou um estoque externo ao modelo (estoque forçante) que alimentará o modelo funcionando como um propulsor. Nos modelos hidrológicos, normalmente a precipitação e outros dados climatológicos constituem estas variáveis condicionantes.

As variáveis de processo ou de fluxo resultam das variáveis forçantes ou são calculadas internamente no processamento do modelo. Representam as entradas e saídas para atualização das variáveis de estado. Por exemplo a taxa de evapotranspiração (calculada a partir dos forçantes climáticos) pode ser considerada uma variável de processo/fluxo que alterará o conteúdo da variável de estado “total interceptado”.

Os parâmetros não se constituem variáveis do modelo, mas caracterizam sistemas físicos associados aos entes que constituem a área de estudo: parâmetros físico-hídricos dos solos, Índice de Área Foliar (IAF), profundidade e densidade de raízes, parâmetros que condicionam o escoamento em rios e canais (área molhada, raio hidráulico, entre outros). De forma ideal, sobretudo nos modelos que buscam maior aderência a concepção física, os parâmetros são apropriados a partir de análise de amostras coletadas *in situ* em laboratórios, observação direta através de instrumentos e ensaios locais. Mas, frequentemente, na indisponibilidade da totalidade ou de alguns parâmetros, recorre-se ao processo de ajuste à calibração dos parâmetros.

Como o sistema hidrológico real é de alta complexidade, tipicamente multidimensional (incluindo processos difusos em meios porosos) e dependente do tempo, inclusive envolvendo a inclusão de comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço, frequentemente é preciso recorrer à simplificação destes processos na concepção dos modelos, podendo esta ser maior ou menor dependendo dos objetivos a serem alcançados no uso do modelo.

Muitas vezes a concepção do modelo hidrológico ou as opções de representação dos processos físicos envolvidos é condicionada ao problema ou questão a ser respondida, de acordo com os objetivos e necessidades de cada

estudo, assim como as particularidades locais do objeto de estudo – tipicamente uma bacia hidrográfica. A escolha e a aplicação dos modelos hidrológicos deve levar em conta sua concepção, pois de acordo com os objetivos requeridos, os dados e recursos disponíveis e as características regionais da bacia de estudo será possível realizar a escolha de um modelo apropriado aquela situação.

Devem ser levados ainda em consideração para aplicação dos modelos hidrológicos fatores como o custo da licença para operação de alguns modelos protegidos por propriedade intelectual, assim como a existência de manuais e suporte para operação. Modelos sob proteção intelectual tem como desvantagem os valores de licença de custo considerável e a impossibilidade de realizar ajustes nos códigos computacionais. Modelos de uso livre e código aberto tem como desvantagem a falta de manuais detalhados de uso e a inexistência de um suporte central, restando como fonte de consultas fóruns de discussão e pesquisa, espalhados pela rede internacional de computadores.

2.2 Exemplos de modelos e de aplicações envolvendo simulação hidrológica

De acordo com a concepção do modelo, os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo diversos critérios Zoppou (2001, p.195-231), De forma abrangente, os modelos são classificados dentre outras formas: (i) Determinístico - de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem; (ii) Estocástico - pelo tipo de relação entre estas variáveis; (iii) Empíricos; (iv) Conceituais; (v) Concentrados e distribuídos - pela discretização espacial; : (vii) Discretos, Eventuais ou contínuos - pela forma de representação dos dados.

Um modelo é considerado determinístico quando produz sempre o mesmo resultado de saída para determinado conjunto de valores de entrada, já quando o modelo observa um valor estatístico para produzir diferentes resultados através de um mesmo conjunto de entrada este modelo é dito estocástico.

Os modelos são classificados como empíricos quando sua concepção é baseada em observações científicas. Estes modelos utilizam relações de natureza empírica e não possuem nenhuma representação explicita dos processos físicos da bacia. São modelos simples, práticos e úteis. No entanto estes modelos são

específicos para a região e condições para qual estas relações foram estabelecidas. Não possibilitam fazer simulações de mudanças em condições para as quais o modelo não previu tais como precipitação extrema, mudança no uso do solo, etc. Modelos conceituais são aqueles baseados em processos físicos e, em geral, apresentam maior complexidade que os modelos empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado. Por exemplo, o cálculo da variação do nível do lençol freático é bastante complexo e tem a necessidade de envolver o uso de modelos detalhados e multivariados, que geralmente requerem um bom conjunto de informações e uma parametrização cuidadosa antes que eles possam ser executados.

É classificado como concentrado o modelo em que as variáveis de entrada são representativas para toda a bacia. Os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada, consequentemente cada elemento pode ser tratado como um ponto que representa homogeneamente toda sua área. Modelos distribuídos, mais realísticos, consideram também a existência de relação espacial entre elementos vizinhos, e.g. transporte de fluxos laterais.

Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados através de uma maior discretização temporal. A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. No geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados.

Modelos discretos são aqueles que trabalham com um intervalo de tempo determinado (passo). Ou seja, por menor que seja o intervalo de tempo considerado, o cálculo das variáveis será equivalente a um determinado passo de tempo – 15 minutos, 1 hora, 1 dia, 1 mês. Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos.

A evolução das tecnologias da informação e os desafios de fornecer respostas para os impactos da antropização e das mudanças climáticas no meio ambiente e nos

recursos hídricos, tornaram os modelos e a aplicação da técnica da simulação hidrológica cada vez mais abrangente, aumentando o nível de complexidade dos sistemas hidrológicos computacionais. No Quadro 1 são apresentados exemplos de modelos com suas principais características.

Quadro 1- Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água.

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
3D-Catchment Conceptual Multilayer Model (ArcEGMO)	Modelo 3D, determinístico, conceitual, multicamadas	Modelagem chuva-vazão; simulação de balanço hídrico; balanço de nitrogênio e carbono, se desejado, em escala regional; modelagem da vegetação (rotação de culturas, produção, desenvolvimento florestal com/sem distúrbios e/ou colheita); estudos de impacto das mudanças climáticas; estudos de impacto da mudança no uso do solo.	Bureau of Applied Hydrology, Germany	www.bah-berlin.de
Bochum Water Balance Model (BWBM)	Modelo espacialmente distribuído, contínuo, que leva em consideração a umidade do solo e a precipitação/degelo para a simulação do escoamento superficial	Simulação de vazão e estimativa espacial das variáveis hidrológicas para a previsão, gestão dos recursos hídricos, manejo do solo, modelagem da qualidade da água, os estudos de mudanças climáticas	U. S. Department of Agriculture	http://www.wcc.nrcs.usda.gov
CASCade of Planes, 2-Dimensional (CASC2D)	Espacialmente variado	Simulaçãohidrológica de bacias hidrográficas espacialmente variadas e erosão / transporte de sedimentos para estudos científicos hidrológicos e análises detalhadas de engenharia. Solução de problemas, onde a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas, precipitação, escoamento superficial e erosão são importantes.	US Army Research Office and US Army Corps of Engineers	
CEQUEAU	Determinístico distribuído. Precipitação contínua e escoamento de degelo	Simulação de vazão; previsões de curto e médio termo com várias opções de atualização. Balanço hídrico através de reservatórios interconectados	Institut National de la Recherche Scientifique. Québec, Canadá	
Central Valley Groundwater and Surface water model (C2VGSM)	Elementos finitos, Quasi 3D	Simular a distribuição de água / movimento ao longo de todo o Vale Central da Califórnia. Este modelo é realmente uma aplicação específica do IGSM mais geral (Integrated Groundwater/Surface Water Model). O CVGSM foi atualizado e migrou para um novo código IWFM (Integrated Water Flow Model)	Department of Water Resources of California	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/
Dynamic Watershed Simulation Model (DWSM)	O DWSM é de base física; baseado em eventos; distribuído; chuva-vazão em regime não permanente; propagação da inundação; erosão-transporte-deposição do solo/sedimentos; modela a mistura-transporte de agrotóxicos. Detalhes apenas o componente chuva-vazão (DWSM-Hydro) estão listados aqui. Para os componentes de sedimentos e agrotóxicos, em contato com o desenvolvedor do modelo	1. Avaliar as condições ambientais de uma bacia hidrográfica, como inundações, erosão do solo em montanhas e rios, sedimentação e contaminação da água por agrotóxicos. 2. Avaliar o uso da terra alternativo e melhores cenários de práticas de gestão na redução de enchentes, erosão de leitos, assoreamento de leitos e açudes (represas, lagos, lagoas de detenção, etc), e poluição de corpos hídricos. 3. Determinar parâmetros de projeto confiáveis (taxa de escoamento, velocidade do escoamento, profundidade, etc) para a concepção de medidas e estruturas de controle de enchentes e erosão.	Woolpert	

Fonte: Adaptado de Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation, 2013.

Quadro 1- Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água

CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
DHSVM	Modelo distribuido, escala regional	Representa explicitamente os efeitos da topografia e vegetação em fluxos de água através da paisagem.	University of Washington	http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml
Hydrological River Basin Environment Assessment Model (HydroBEAM)	Modelo distribuido com qualidade da água e ecossistema	i) modelo de escoamentode base física (onda cinemática, equilíbrio térmico e outros); ii) Modelo de escoamento distribuido usando DEM e GIS; iii) Cálculo da quantidade de água, qualidade (incluindo disruptor endócrino) e ecossistema para avaliação ambiental.	Water Resources Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University	
Hydrospheric Atmospheric Sciences Model (IHAS)	Modelo hidrológico numérico	Compreender a dimensão do aquecimento na bacia e regimes hídricos através de modelagem hidrológica	Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences (IHAS), Nagoya University, Japan	
Integrated Water Flow Model (IWFM)	Modelo hidrológico continuo integrado	Os objetivos do IWFM são simular: • necessidades de água para áreas agrícolas e urbanas, bem como da zona de raize processos de escoamento na superfície terrestre sob condições climáticas especificadas pelo usuário; • águas subterrâneas e dinâmica do escoamento sob tensões em termos de bombeamento e desvios, bem como recarga de aquífero e escoamento superficial em vazões geradas devido à irrigação e chuva. • a utilização conjunta das águas subterrâneas e das vazões de rios para atender às demandas agrícolas e urbanas.	California Department of Water Resources	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/index.cfm
Kinematic Runoff and Erosion Model, Version 2 (KINEROS2)	Um modelo distribuido de parâmetros, modelo chuva-vazão-erosão baseado em eventos	Interpola interrupção de chuvas espacialmente distribuidas e encaminha água e sedimento através de um sistema de cascatas de infiltração dinâmica e planícies erodidas, canais abertos trapezoidais, condutos fechados circulares e reservatórios de detenção.	Southwest Watershed Research Center. Tucson, Arizona	http://www.tucson.ars.ag.gov
Physically-Based Distributed Erosion Model (MEFIDIS)	Base física, distribuido espacialmente, modelo hidrológico para eventos climáticos extremos	1. Simular geração de escoamento e encaminhamento, juntamente com os padrões de desprendimento, transporte e deposição de solo para um evento climático extremo dentro de uma única bacia hidrográfica. 2. Simular os processos hidrológicos e de erosão mais importantes em bacias hidrográficas 1. Simular geração de escoamento e encaminhamento, juntamente com os padrões de desprendimento, transporte e deposição de solo para um evento climático extremo dentro de uma única bacia hidrográfica. 2. Simular os processos hidrológicos e de erosão mais importantes em bacias hidrográficas Mediterrânicas de médio a grande porte utilizando dados disponiveis localmente.	Center for Ecological Modeling, IMAR – Institute for Marine Research (hosted by the New University of Lisbon).	

Fonte: Adaptado de Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation, 2013.

Quadro 1- Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água

CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:	Site
MIKE SHE	Base física, distribuído e integrado	O objetivo do MIKE SHE é a simulação de processos hidrológicos com ênfase em águas superficiais - interações com águas subterrâneas, escoamento em canais, escoamento em zonas não-saturadas e escoamento subterrâneo.	DHI Inc.	http://www.dhigroup.com
Object Watershed Link Simulation (OWLS)	Modelo contínuo chuva-vazão. Modela escoamento de degelo e o encaminhamento de ondas de cheia em escoamento não-permanente	Simular fisicamente e visualmente o tempo real ou processos hidrológicos de curto prazo para as pequenas bacias hidrográficas florestadas e fornecer informações detalhadas sobre a resposta das bacias hidrográficas às mudanças ambientais.	Wilson Environmental Consulting	http://hydromodel.com
One-Dimensional Numerical Model (SVAT-HYCY)	Modelo numérico 1D	Entender o aquecimento e os regimes hídricos em uma escala de bacias hidrográficas através de modelagem hidrológica.	Frontier Research Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and	
Storm Water Management Model (SWMM)	Modelo de base física, distribuído, não-permanente, contínuo. Modelagem de escoamento de águas pluviais e qualidade da água em áreas urbanas	E um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão usado para um único evento ou simulação contínua da quantidade e qualidade do escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas. O componente de escoamento do SWMM opera sobre um conjunto de sub-bacias que recebem a precipitação e geram escoamento e cargas poluentes. O módulo de transporte do SWMM transporta este escoamento através de um sistema de tubos, canais, dispositivos de armazenamento / tratamento, bombas e reguladores. Permite a avaliação de dispositivos LIDs para atender às metas de sustentabilidade.	U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.	http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/swmm.html
TOPographic Kinematic Approximation and Integration (TOPIKAPI)	Modelo chuva-vazão semi-distribuído	1. Tirar proveito de modelos distribuídos contendo parâmetros significativos fisicamente; 2. Superar a inconsistência de negligenciar a fase transiente como no TOPMODEL; 3. Incorporar a possibilidade de obtenção de uma versão agrupada do mesmo modelo integrando os processos durante o aumento de tamanho de domínios, sem a necessidade de recalibração, e 4. Permitir a aplicação do modelo em escala crescente espacial de encosta a escala de captação para GCMs.	Department of Earth and Geo-Environmental Sciences, University of Bologna, Bologna, Italy	
WASH123D	Baseado no princípio da conservação de massa, de base física, modelo distribuído	Simular o escoamento de fluidos, o transporte térmico, transporte de salinidade, transporte de sedimentos, transporte da qualidade da água dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos em uma bacia hidrográfica.	University of Central Florida; ORD, U.S. EPA; and ERDC, US Army Corps	

Fonte: Adaptado de Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation, 2013.

Quadro 1- Descrição de alguns sistemas computacionais que envolvem a simulação do ciclo da água

CONTINUAÇÃO

Nome do modelo	Tipo	Objetivo	Desenvolvido por:
Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX)	Modelo contínuo de simulação chuva-vazão e qualidade da água	O modelo APEX foi construído para avaliar diferentes estratégias de manejo de solo, considerando sustentabilidade, erosão (eólica e fluvial), economia, oferta e qualidade da água, qualidade do solo, clima e pragas.	Texas AgriLife Research
Geomorphology-Based Hydrological Model (GBHM)	Modelo hidrológico distribuído de base física	Simulação chuva-vazão, análise de recursos hídricos em bacias com grandes rios	Institute of Industrial Science, University of Tokyo
Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)	O programa começou como um simulador chuva-vazão baseado em eventos para estudos hidrológicos da água superficial. Ele agora inclui evapotranspiração, degelo, e os modelos de infiltração para estudos de simulação contínua.	O programa é projetado para simular os processos do ciclo hidrológico na superfície terrestre. Consequentemente, contém componentes para a precipitação, evapotranspiração potencial, degelo, interceptação das copas, armazenamento superficial, infiltração, escoamento superficial, escoamento de base, transporte em canais, e as perdas no canal. Ele também inclui componentes para a simulação de reservatórios e desvios. Cada uma das fases do ciclo hidrológico podem ser descritas com um modelo de desses processos específicos. Sempre que possível, várias opções de modelo estão disponíveis para permitir que o programa se adapte a uma grande variedade de regiões geográficas, disponibilidade de dados, escalas espaciais, escalas temporais, e as exigências do projeto. Destina-se a ser usado isoladamente ou em combinação com outros softwares HEC para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de vazões, melhoria ambiental, impacto da urbanização futura , projeto de vertedouros de reservatórios, redução de danos causados pelas inundações, a regulação de planícies de inundação e operação do sistema	US Army Corps of Engineers
MIKE 11 RR (Rainfall Runoff)	É um modelo chuva-vazão contínuo, determinístico e concentrado	O modelo MIKE 11 RR é aplicado para: 1. Análise hidrológica geral; 2.Previsão de inundações (geralmente em combinação com o modelo hidrodinâmico MIKE 11); 3. Preenchimento de registros de vazões; 4.Previsão de vazões baixas	DHI Inc
Soil Conservation Service Curve Number Model (SCS-CN)	Modelo determinístico	Determinar infiltração, volumes do escoamento superficial, taxa de infiltração, e hidrograma de escoamento.	Natural Resources Conservation Service
Watershed Bounded Network Simulation Model (WBNM)	Modelo de simulação chuva-vazão, baseado em eventos. Modela bacias naturais e urbanas.	Estudos de cheias em bacias naturais e urbanas, mitigação de inundações.	Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia
IPH II	Concentrado	Perdas por evaporação e interceptação; separação do escoamento; propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo	Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fonte: Adaptado de Hydrologic Modeling Inventory Website/Texas A&M University and Bureau of Reclamation, 2013.

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e o DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*), por exemplo, são classificados como modelos de forte base física e semi-distribuídos. Operam de maneira contínua no tempo em intervalos discretos. No DHSVM, em sua versão atual, o menor intervalo de tempo permitido é de uma hora, e no SWAT é permitida a inserção de dados sub-horários, embora os resultados sejam explicitados apenas no nível diário. Têm código aberto e de domínio público. No caso do SWAT, o modelo é processado a partir de uma interface integrada ao Sistema de Informações Geográficas (SIG) *ArcGis.* Na aplicação do DHSVM, é pressuposta a existência de uma base de dados em SIG, a partir da qual são gerados arquivos com informação espacial sobre vegetação, solos, topografia/relevo, que alimentaram o modelo. As aplicações desses modelos envolvem geralmente uma extensa base de dados e a simulação do ciclo hidrológico e o impacto das mudanças climáticas e da alteração do uso e manejo do solo nas bacias hidrográficas, eventualmente não instrumentadas. Sendo assim, os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica são modelados por meio de equações matemáticas que levam em consideração aspectos do clima, solo, uso do solo, topografia e manejo florestal ou agrícola (BELLON, 2014; NEITSCH et al. 2005; NETO, 2013; WIGMOSTA et al, 1994).

O modelo SWAT apresenta facilidades para estudo e solução de questões no contexto de áreas de desenvolvimento agrícola. De fato, observa-se na literatura, que várias de suas aplicações envolvem a busca de técnicas de manejo do uso e ocupação do solo com foco na conservação de água e solo, e controle da poluição por químicos e nutrientes (CASTRO, 2013; BLAINSKI et al. 2010). Já no caso do modelo DHSVM, a maior parte dos estudos envolvem áreas florestadas. (CUARTAS et al. 2012; STORK et al 1998; WHITAKER et al, 2003) Uma das vantagens do DHSVM neste sentido, é que as relações Solo-Vegetação-Atmosfera (da sigla em inglês SVATS) são cruciais na hidrologia florestal é representado de forma mais robusta, já que a resistência do dossel (trocas entre superfície vegetada e atmosfera) baseiam-se na temperatura, déficit de pressão de vapor, e também no conteúdo de umidade do solo (WIGMOSTA et al, 1994).

2.3 Avaliação, interpretação e comunicação da performance de um modelo hidrológico

A finalidade ou objetivo do estudo, assim como a disponibilidade de dados e informações sobre a bacia hidrográfica em estudo, condicionam a escolha do modelo. Conforme descrito anteriormente, a técnica da simulação hidrológica, pode ser aplicada com fins exploratórios, no estudo de cenários e como subsídio ao planejamento e à gestão dos recursos hídricos, e ainda, na consolidação de políticas públicas e formulação de marcos regulatórios.

No contexto exploratório, a técnica da simulação hidrológica contribui no entendimento integrado do comportamento dos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Dependendo da concepção do modelo hidrológico, a aplicação pode elucidar incertezas em dados observados, ou contribuir no aprimoramento do entendimento por parte do analista das relações e interdependências entre os processos hidrológicos, suas relações de causa e efeito, assim como as susceptibilidades naturais e vulnerabilidades do sistema hidrológico de alta complexidade. Harmel et al. (2014) propõe que nestes estudos, sejam analisadas possíveis incertezas dos dados, na estrutura e características da representação dos processos naturais no modelo diante da realidade e problemática que se pretende abordar, sensibilidade de seus parâmetros não só nas vazões fluviais, mas em processos intermediários, analisando a coerência entre valores simulados e variáveis ou parâmetros diretamente observados ou obtidos em outros estudos da literatura para a mesma área de interesse.

Já os estudos de cenários, podem envolver a representação de mudanças de uso e ocupação do solo, características físicas ou antrópicas impostas à uma bacia hidrográfica ou até mesmo alterações dos condicionantes climáticos (no contexto de mudanças climáticas). Os estudos de cenários fornecem apoio importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. O estudo de cenários pode impactar também na proposição de políticas públicas e no desenvolvimento de marcos regulatórios. Neste último caso, é essencial fazer uma avaliação prévia da adequabilidade do modelo à representação de estágios médios e críticos (anos muito úmidos, resposta às tempestades extraordinárias, estiagens inesperadas ou

prolongadas). Para estes estudos é fundamental o foco no ajuste e calibração dos parâmetros do modelo, assim como sua validação em diferentes circunstâncias.

Nestas aplicações o processo de calibração e ajuste de parâmetros é essencial. O objetivo da calibração dos modelos hidrológicos é encontrar um conjunto de valores para os parâmetros do modelo que permitam uma boa representação do comportamento hidrológico na bacia estudada. É importante que o conjunto de parâmetros escolhido faça sentido de acordo com a faixa de valores esperadas para cada parâmetro naquela situação específica, sobretudo em modelos de base física que buscam representar os processos com melhor aderência à valores inferidos em laboratório ou *in situ*. A calibração pode ser em função de diferentes variáveis hidrológicas como evapotranspiração, interceptação, teor de umidade no solo, mas o mais comum é a vazão fluvial (daí decorre o termo modelos chuva-vazão). Quanto maior o número de elementos ajustados a valores observados, melhor será a qualidade da representação pelo modelo da realidade física-ambiental da bacia hidrográfica. Os resultados da calibração estão fundamentalmente ligados a qualidade e representatividade dos dados observados, pois estes se tornam a referência no ajuste ao modelo.

A calibração manual consiste no usuário realizar pessoalmente o ajuste dos parâmetros até encontrar uma saída satisfatória para o modelo. Geralmente este método é operado por tentativa e erro. É facilitada pela análise exploratória do modelo que envolve a chamada análise de sensibilidade. Sendo que nesta análise, varia-se o valor de um parâmetro mantendo ou não todos os demais constantes, de modo a avaliar quais parâmetros têm maior influência nos valores calculados pelo modelo. Mas a calibração pode ser facilitada com a aplicação de algoritmos de otimização, que são executados por computadores a fim de atingir um conjunto de parâmetros que satisfaça uma ou mais condições de ajuste. Tanto na calibração manual quanto na calibração automática são utilizados alguns indicadores para que possa ser possível mensurar a qualidade do ajuste diminuindo a subjetividade. O trabalho de Moriasi et al. (2007) têm sido usado como referência na análise de desempenho do processo de calibração de parâmetros. Os autores sugerem alguns índices: RMSE (RSR), a tendência percentual bias (PBIAS), o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE).

No contexto atual da gestão participativa dos recursos hídricos, a proposição de novas políticas públicas e marcos regulatórios, uma das aplicações de estudos de simulação em modelos hidrológicos, de forma ideal, deve ser pactuada entre os atores envolvidos. Neste contexto, assume um papel relevante a comunicação e difusão das informações sobre questões associadas à água. A metodologia empregada e os resultados criteriosamente obtidos, seja em análises exploratórias ou em estudos de cenários, associados à forma de comunicação do aprendizado e conhecimento adquiridos, serão determinantes no sucesso de novas medidas, políticas e normatizações visando o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos (HARMEL et al., 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica da Baixada de Jacarepaguá, em especial o Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB), na vertente que drena para a região oceânica. O clima segundo a classificação de Köppen é do tipo Af, Tropical Úmido, sem uma estação seca, megatérmico, com precipitação pluviométrica máxima de dezembro a março (verão) e o de precipitação mínima, de junho a agosto (inverno). Em geral, a pluviosidade varia de 1.500 a 2.500 mm, sendo os períodos mais chuvosos no verão e os mais secos no inverno (RIO DE JANEIRO, 2015). Foi estabelecida uma micro bacia experimental (2,55 km²) localizada em um dos formadores do Rio Sacarrão, dentro dos limites do Parque, que constitui área de conservação do bioma Mata Atlântica. O Rio Sacarrão é um dos principais afluentes do Rio Morto, que drena suas águas para o oceano, em um trecho, denominado Praia da Macumba. A bacia está localizada no bairro de Vargem Grande em Jacarepaguá, cidade do Rio de Janeiro. A Figura 5 apresenta um mapa com a localização da micro-bacia.

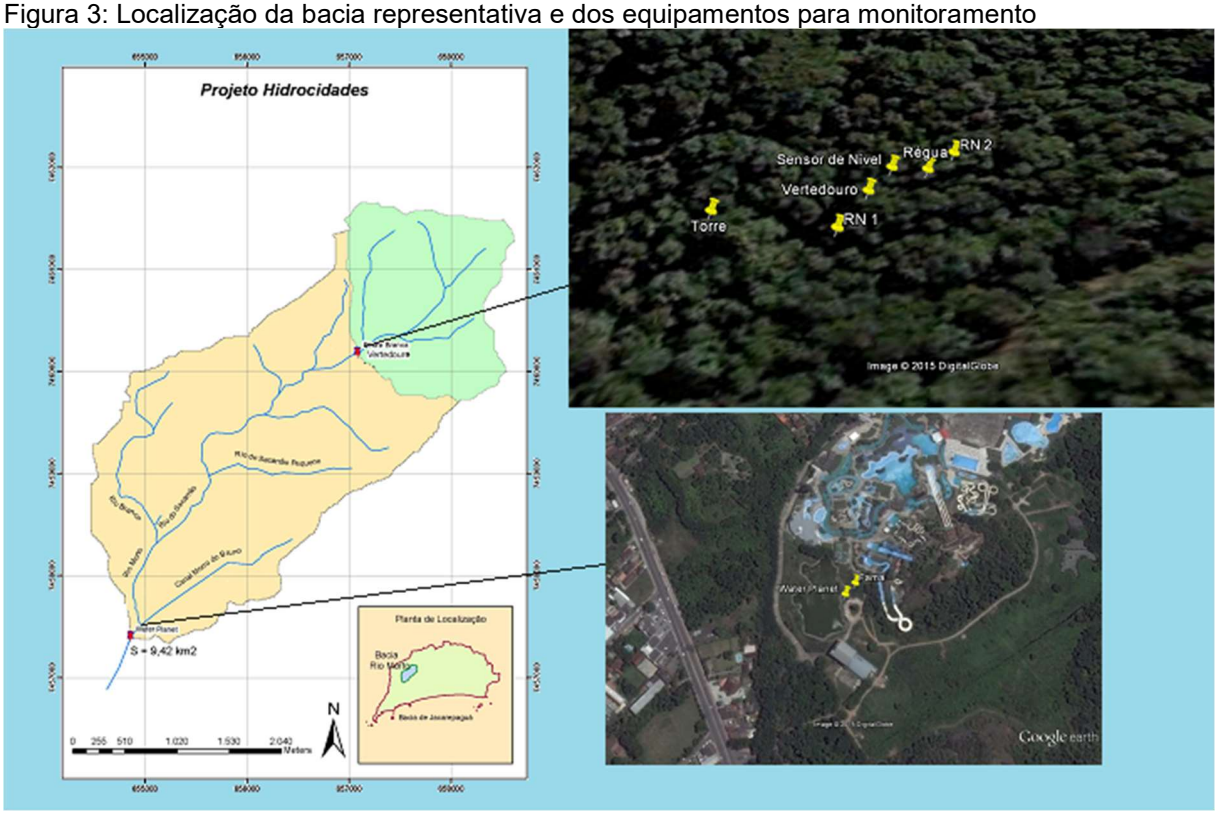
As altitudes dentro da bacia variam entre 162 m e 848 m acima do nível do mar, com o maciço da Pedra Branca chegando a 1024 m de altura. O maciço apresenta nítida concentração das declividades mais elevadas de suas encostas (acima de 80 % de inclinação). A serra do Quilombo e a serra de Santa Bárbara formam o divisor de águas entre as bacias hidrográficas dos rios Sacarrão, Pau da fome e Camorim. (RIO DE JANEIRO, 2015)

Para criação do modelo digital do terreno foram utilizadas curvas de nível com espaçamento de 2 m, fruto de uma reconstituição cartográfica desenvolvida no contexto do Projeto HIDROCIDADES. Como ponto de partida optou-se pelo uso de um vôo existente na área, e ortofotos na escala de 1:15000, do ano de 2004, realizada pela empresa Base de São Paulo; utilizando como base o apoio do levantamento executado pelo Instituto Pereira Passos (IPP), no ano de 1995.

A área da bacia foi delimitada e, a seguir, traçados a hidrografia e a altimetria, com equidistância das curvas de dois metros, pois a mesma ainda não havia sido restituída na escala pretendida (Figura 3). As cartas topográficas foram

reconstituídas por estereoscopia na escala 1:5000. Foram implantados também, alguns pontos auxiliares, através de um levantamento topográfico, desenvolvido pela empresa *Posição Cartography Surveying*, utilizando-se GPS geodésico e teodolitos.

Figura 3: Localização da bacia representativa e dos equipamentos para monitoramento



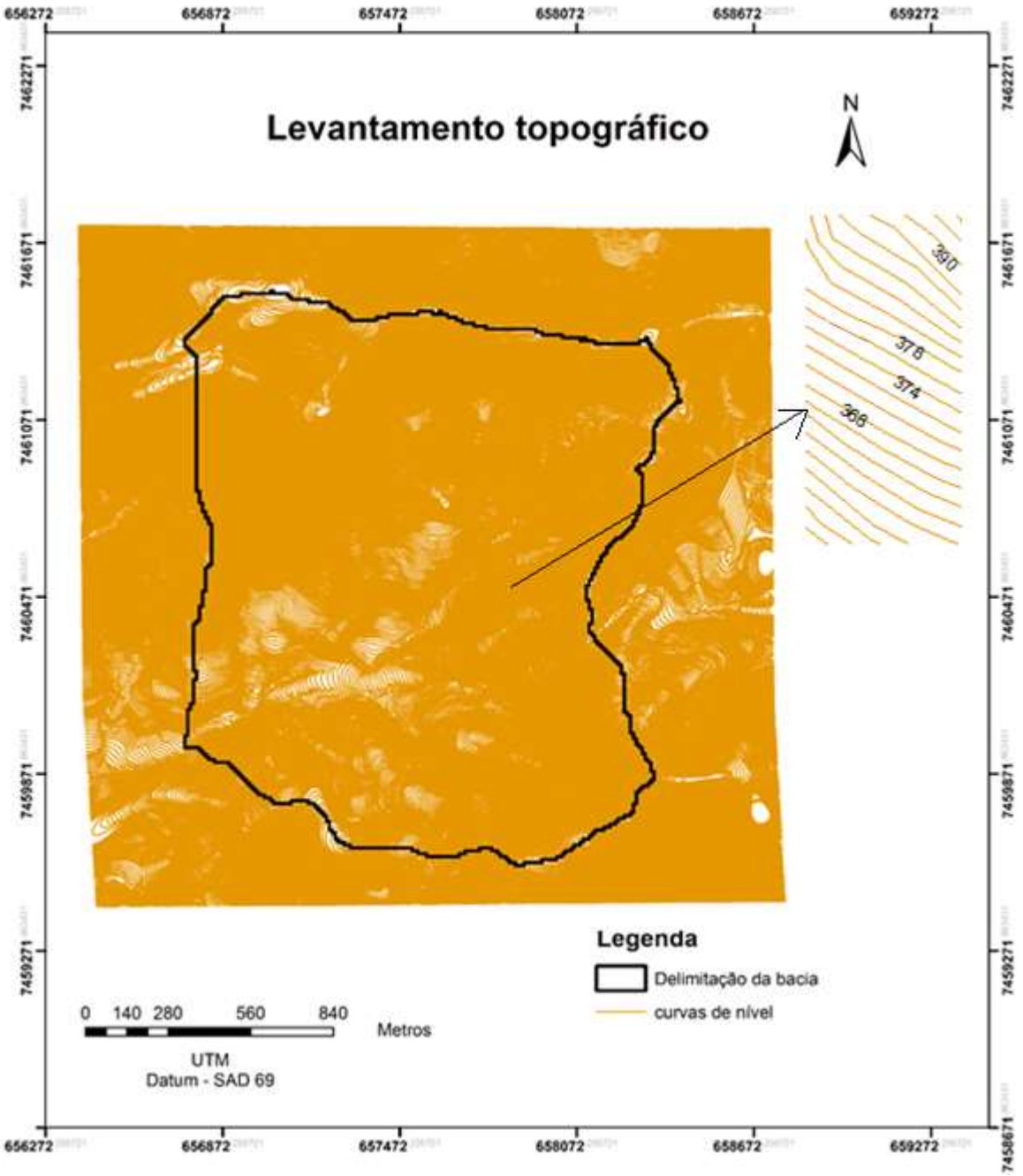
3.1.1 Topografia

O terreno apresenta uma superfície de característica dos morros da cidade do Rio de Janeiro, uma vez que se situa no maciço da Pedra Branca com feições morfológicas típicas costeira e presença de morros arredondados (“meias laranjas").

Após adicionar as curvas de nível no sistema de informação geográfica, foi criado uma *Triangulated Irregular Network – TIN* (rede triangular irregular). Este método realiza uma interpolação entre as cotas das curvas de nível para criar uma superfície de malha triangular de modo a representar de forma discretizada a superfície do terreno. As representações irregulares da superfície são baseadas no conhecimento das coordenadas planimétricas (x,y) e na altura de interesse (z) (Figura 21).

A partir da rede triangular irregular foi criado o Modelo Digital de Terreno – MDE, que consiste em uma matriz (Raster) numa malha quadricular onde cada quadrado (pixel) representa um valor de altura discretizado. Para a criação do Modelo Digital de Terreno foi utilizado o método linear de interpolação dos valores, com tamanho de célula de 10 m.

Figura 4: Curvas de nível Bacia de Estudo



3.1.2 Solos

A área do PEPB abriga cinco principais tipos de solos ou associações de solos: Argissolos Vermelho-Amarelos (PVAe5; PVAe2; PVAd5; PVAd2; PVAe3/ PVAe4); Neossolos e Cambissolos Flúvicos (RYBe); Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd4); Chernossolo Argilúvico (MTo), além de inúmeros afloramentos de rocha matriz. Como características marcantes esses solos se apresentam pouco ou medianamente desenvolvidos e fortemente atrelados ao relevo (INEA, 2015).

Em levantamento pedológico realizado pelo grupo do projeto HIDROCIDADES foram coletadas a partir de trincheiras abertas cobrindo horizontes A e B. As amostras de solo coletadas nesses quatro pontos foram analisadas no Laboratório da EMBRAPA SOLOS, Rio de Janeiro. De acordo com EMBRAPA (1986) foram determinados nas análises laboratoriais das amostras os percentuais de areia fina e grossa, de argila e silte; o percentual de umidade; a macro e a micro porosidade; a densidade do solo e das partículas.

Foi então utilizado o método de classificação proposto pela United States Department of Agriculture USDA (1987), que leva em conta as percentagens de areia, argila e silte da amostra. A Tabela 1 apresenta a classificação segundo a textura das amostras.

Tabela 1: Classificação USDA segundo a textura dos solos da micro-bacia no Rio Sacarrão (Rio de Janeiro)

Perfil	Horizonte	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Classificação USDA
P1	A1	56,5	30	13,5	*Sandy Clay Loam*
	A2	56,9	29,7	13,4	*Sandy Clay Loam*
	A3	60,4	23,8	15,8	*Sandy Clay Loam*
	AC	67,7	18,7	13,6	*Sandy Loam*
P2	A1	60	25,9	14,1	*Sandy Clay Loam*
	A2	66,2	21,4	12,4	*Sandy Clay Loam*
	BA	62,8	21,7	15,5	*Sandy Clay Loam*
	Bi	57,6	25,2	17,2	*Sandy Clay Loam*
P3	A	44,8	40,9	14,3	*Clay*
	AB	31,1	48,9	20	*Clay*
	Bw1	31,9	57	11,1	*Clay*
	Bw2	30,9	50,4	18,7	*Clay*
P4	A	61,8	24,8	13,4	*Sandy Clay Loam*
	BA	52,7	32	15,3	*Sandy Clay Loam*
	Bt1	46,6	37,6	15,8	*Sandy Clay*
	Bt2	45	41,8	13,2	*Clay*

3.1.3 Vegetação

Segundo levantamento realizado pelo INEA, a vegetação do PEPB apresenta-se como um grande mosaico vegetacional formado por manchas de vegetação em diferentes estágios sucessionais. Duas fitofisionomias foram encontradas (RIO DE JANEIRO, 2015):

- Floresta Ombrófila Densa Submontana – localizada entre as altitudes de 50 e 500 m. No PEPB esta fitofisionomia corresponde a 10.309,83 ha, o equivalente a 83,2% da área total.
- Floresta Ombrófila Densa Montana – localizada entre as altitudes de 500 e 1.500 m, que, no caso do PEPB, ocorrem entre 500 e 1.000 m, e compõem 2.084,01 ha ou 16,8%.

Em relação aos estágios sucessionais, foram identificadas cinco fisionomias distintas, sendo três decorrentes do processo de sucessão ecológica (naturais) e duas resultantes de plantios e/ou ações antrópicas: Floresta em estágio avançado de regeneração, Floresta em estágio médio de regeneração, Floresta em estágio inicial de regeneração, campos e pastagens e cultivos.

A partir do Modelo Digital de Elevação foram caracterizadas como Floresta Ombrófila Densa Submontana aquelas localizadas entre 50 e 500 m e como Floresta Ombrófila Densa Montana aquelas localizadas entre 500 e 1.000 m. Foram ainda consideradas as áreas de macega, afloramentos rochosos e matacões levantadas nas inspeções no campo durante o levantamento pedológico pela equipe do Projeto HIDROCIDADES.

3.1.4 Série temporal de vazões

Em 2008 foi instalado pelo grupo do projeto HIDROCIDADES uma estação fluviométrica na seção de controle da micro-bacia em um dos formadores do rio Sacarrão. A estação consiste em um vertedouro de seção retangular (Figura 4) assentado em rocha, com paredes delgadas de duas contrações e 1,80 m de largura na soleira, uma régua de 2 m de altura com precisão de 1 cm, uma sonda de nível hidrostática Sitron LH 840 para medição da altura da lamina d'água e um *data logger*

FLEX desenvolvido pela Hidromec Ltda para o registro dos dados. O *data-logger* foi locado em uma torre para facilitar a alimentação de energia, feita por conjunto bateria-painel solar. O painel solar de 20 V está locado no topo da torre, acima da copa das árvores, de forma a permitir autonomia enérgica no local que é remoto e de difícil acesso (Figura 6). A tabela 2 apresenta as coordenadas geográficas (Datum WGS 84) de instalação dos equipamentos (Figura 5).

Tabela 2: Coordenadas geográficas de instalação dos equipamentos da estação fluviométrica.

Equipamento	**Latitude**	**Longitude**
Vertedouro	-22º 57’ 32.608”	-43º 28’ 3.751”
Régua	-22º 57’ 32.613”	-43º 28’ 4.278”
Sonda	-22º 57’ 32.346”	-43º 28’ 3.578”
Torre com *data logger*	-22º 57’ 32.684”	-43º 28’ 4.944”

No *logger* são gravados dados relativos as alturas de lâminas d’água na unidade de centímetros, num intervalo temporal de 5 minutos. Periodicamente são realizadas visitas de campo para realizar a operação de *download* dos dados armazenados.

Para o cálculo das vazões foi utilizada a equação de Francis para vertedouros retangulares com duas contrações (eq. 5)

$$\mathbf{Q = 1,838\left(L - \frac{2H}{10}\right)H^{3/2}} \qquad \text{eq. (5)}$$

Onde,

Q é a vazão em m³/s;
L é a largura da soleira em m;
e H é altura de lamina d’agua em m.

As vazões foram utilizadas para algumas tentativas de calibração do modelo DHSVM e nas análises de sensibilidade.

Figura 5: Vertedouro de seção retangular bacia do Rio Sacarrão, PEPB, Rio de Janeiro.

Figura 6: Torre de fixação do data-logger, painel solar e pluviômetro

3.1.5 Séries Temporais de variáveis climatológicas

Em 2008 foi instalada uma estação climatológica SOLAR 2000 desenvolvida e fabricada pela SOLAR Instrumentação Ltda no parque aquático *Water Planet*. Esta estação está localizada dentro da bacia do Rio Morto onde se insere a micro-bacia

do Sacarrão[1]. A estação opera com intervalo de tempo de 5 minutos, registrando a altura pluviométrica acumulada, temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vendo, direção do vento, umidade relativa e pressão atmosférica. A estação conta ainda com um painel solar para recarregar sua bateria e um *logger* para o registro dos dados. A partir de fevereiro de 2015, passou a operar no mesmo local uma outra estação climatológica de fabricação DAVIS que também registra, entre outras, as mesmas variáveis que a outra estação, com registros também a cada 5 minutos. A partir de maio de 2015 passou a operar também um pluviômetro modelo Flex Chuva desenvolvido e fabricado pela Hidromec Ltda. na micro-bacia do PEPB, locada no topo da torre (acima da copa das árvores) onde também está o *data-logger* de dois canais (nível e altura pluviométrica) e o painel solar.

Figura 7: Estação Climatológica SOLAR 2000 no Rio *Water Planet*

[1] Na estação são registrados os valores referentes à pluviometria e outras variáveis para o cálculo das taxas evaporimétricas. No contexto do Projeto HIDROCIDADES buscou-se localizá-la dentro dos limites da bacia hidrográfica, e o Parque Rio *Water Planet*, que cedeu o espaço, garantiu maior vigilância e segurança para os equipamentos.

Nas estações climatológicas são registradas as radiações solares incidentes (de ondas curtas). Para o cálculo das radiações líquidas, foram estimadas as radiações de ondas de radiação de ondas longas pela equação 6 (SWINBANK,1963). As radiações de líquidas foram estimadas pela diferença entre as radiação de ondas curtas e a de ondas longas.

$$\boldsymbol{L = 9,2\ 10^{-6} \sigma T^{6}} \qquad \text{eq. (6)}$$

Onde,

L = é a radiação de onda longa W m^{-2};

Ϭ é a constante de Stefan-Boltzmann 5,6697x10^{-8} W m^{-2} K^{-4};

e T é a temperatura do ar em graus Kelvin.

As variáveis climatológicas foram usadas para alimentar o modelo hidrológico DHSVM para cálculo da evapotranspiração**.**

3.2 Concepção do modelo hidrológico DHSVM

Mendes et al. (2007) escreveu um trabalho com resultados preliminares da aplicação do modelo a bacia do Rio Claro localizada na serra do mar em São Paulo. A bacia de 70,2 km² está localizada no Bioma Mata Atlântica. No trabalho foram apresentados os mapas de solos, vegetação e modelo digital do terreno necessários para a aplicação do DHSVM.

Kruk et al. (2007) aplicou o DHSVM na bacia do Rio Bocaina localizada na serra do mar em São Paulo. A bacia de 251,36 km² está localizada no Bioma Mata Atlântica. O objetivo deste trabalho era avaliar a sensibilidade do modelo aos 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.

Cuartas et al. (2008) aplicou o modelo em três bacias de diferentes ordens, com respectivamente 0,95; 6,58 e 12,43 km², localizadas na reserva biológica do Rio Cuieiras na Amazônia central, com o objetivo de melhorar o entendimento das

complexas interações entre os processos de superfície e atmosféricos, numa micro-bacia em área de floresta não perturbada na Amazônia central, visando a melhoria das representações destes processos e do cálculo da evapotranspiração em modelos de interação superfície vegetada-atmosfera.

Kruk et al. (2009) aplicou o DHSVM na bacia do Rio Bocaina localizada na serra do mar em São Paulo. A bacia de 251,36 km² está localizada no Bioma Mata Atlântica. O objetivo deste trabalho era avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros de vegetação. O modelo apresentou-se mais sensível à variação do déficit de pressão de vapor, da resistência estomatal mínima, do índice de área foliar e da altura da vegetação.

Alvarenga et al. (2016) aplicou o modelo na Bacia hidrográfica Lavrinha (6,76 km²) localizada na Serra da Mantiqueira, em Minas gerais para avaliar os efeitos das possíveis mudanças hidrológicas devido alterações na cobertura do solo e aqueles relacionados a variações climáticas.

3.2.1 Estrutura do DHSVM

O DHSVM é um modelo hidrológico semi distribuído, baseado em leis físicas, que representam explicitamente os efeitos da topografia, solo e vegetação sobre os fluxos de água na bacia hidrográfica. Foi desenvolvido no começo da década de 1990 na Universidade de Washington em parceria com o *Pacific Northwest National Laboratory*.

Pode ser aplicado a pequenas bacias (até 100 km²) utilizando células de grade da ordem de 5 a 30 m e grandes bacias (100 até 10^4 km²) utilizando células de grade da ordem de 100 m. O modelo simula desde um único evento até período multianual com intervalos de tempo horário ou maior.

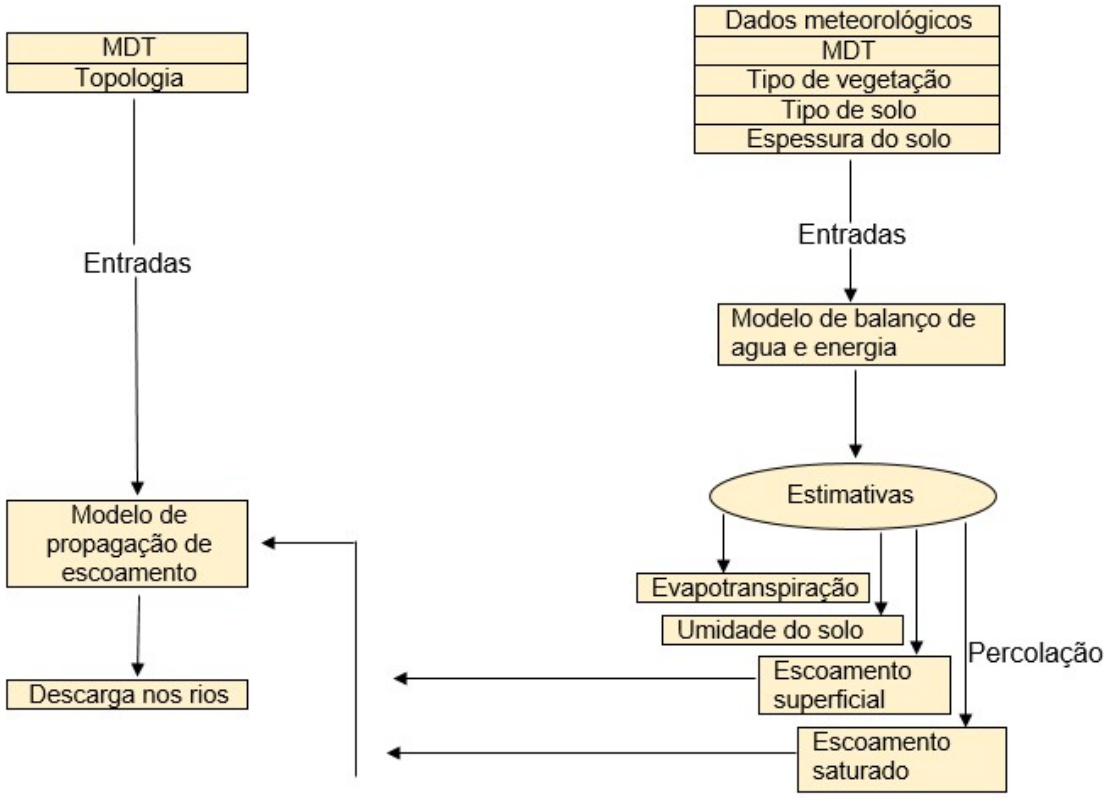
Trabalha com um sistema de módulos para o cálculo de evapotranspiração, infiltração e percolação da água em solo não saturado, escoamento sub superficial no solo, escoamento superficial, escoamento em canais, cálculo de interceptação e acumulação e derretimento de neve (Figura 8).

A discretização da bacia hidrográfica é feita subdividindo-a em células, como uma grade, com uma resolução horizontal típica entre 10 e 150 metros, centrada nos nós do modelo digital do terreno. As células são hidrologicamente interligadas permitindo o escoamento lateral superficial e sub superficial. Em cada instante de tempo o modelo expressa soluções para o balanço hídrico e energético para cada célula.

O DHSVM é um modelo de código aberto e está continuamente sob aprimoramento. O código desenvolvido na linguagem C, está disponível na página de internet da Universidade de Washington:

(http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml).

Figura 8: Estrutura e fluxo de processos do DHSVM



Fonte: Adaptado de Wigmosta et al. (2002) e Cuartas (2008)

3.2.2 Evapotranspiração

Cada célula individual contém duas camadas, a primeira representando o dossel superior e a segunda o dossel inferior ou a superfície do solo. A primeira camada, que representa o dossel superior pode cobrir uma célula completamente ou

uma fração desta, já a segunda camada, que representa o dossel inferior, cobre a célula completamente. Ambos, dossel superior e inferior, podem conter uma fração úmida e uma fração seca.

Inicialmente a evaporação potencial é calculada para o dossel superior representando a taxa máxima de água que pode ser removida da vegetação e do solo presentes em cada célula pela evapotranspiração (eq. 7). A água interceptada pelo dossel superior é então removida da fração úmida na taxa potencial, enquanto a transpiração da fração seca é modelada utilizando a equação de Penman-Monteith. A evapotranspiração calculada para o dossel superior (fração úmida e fração seca) é então removida da evaporação potencial e a evapotranspiração do dossel inferior é calculada a partir da taxa de evaporação potencial restante.

O modelo trabalha de forma que a evapotranspiração das duas camadas não exceda a umidade máxima que a atmosfera consegue receber, isto é a evaporação potencial.

A taxa de evaporação potencial para o dossel superior é dada por (WIGMOSTA et al., 1994)

$$E_{po} = \frac{\Delta R_{no} + \rho \ _p (e_s - e)/r_{ao}}{\lambda_v [\Delta + \gamma]} \qquad \text{eq. (7)}$$

Onde,

E_{po} é a taxa de evaporação potencial (m s^{-1});

Δ é a declividade da curva pressão de vapor saturado – temperatura (Pa. $ºC^{-1)}$;

R_{no} é a densidade do fluxo de radiação em rede (J m^{-2} h^{-1});

ρ é a massa específica do ar úmido (kg m^{-3});

c_p é o calor específico do ar a pressão constante (J Kg^{-1} $ºC^{-1}$);

e_s é a pressão de vapor saturada (Pa);

e é a pressão de vapor (Pa);

r_{ao} é a resistência aerodinâmica do transporte de vapor entre o dossel superior e a altura de referência (s m^{-1});

λ_v é o calor latente de vaporização da água (J Kg^{-1});

e ɣ é a constante psicométrica (Pa ºC);

Cada dossel é dividido em fração úmida (A_{wj}) e fração seca (1- A_{wj}) (eq. 8)

$$A_{wj} = \left(\frac{S_{lj}^{t} + P_j}{I_{cj}}\right)^{2/3} \quad \text{eq. (8)}$$

Onde,

A_{wj} é a fração úmida do dossel %;

S^{t}_{lj} é a profundidade de água armazenada no dossel no inicio do passo de tempo m;

P_j é a profundidade da precipitação durante o passo de tempo m;

I_{cj} é a capacidade máxima de interceptação m;

A capacidade máxima de interceptação é calculada de acordo com o índice de área foliar (LAI da sigla em inglês), através da eq. 9.

$$I_{cj} = r_j LAI_j F_j \quad \text{eq. (9)}$$

Onde,

I_{cj} é a capacidade máxima de interceptação (m);

r_j é a relação de I_{cj} com LAI_j (Em torno de 10^{-4} Dickinson et al., 1991)

LAI_j é o índice de área foliar;

F_j é a fração da superfície coberta pelo dossel (%).

A precipitação é armazenada no dossel de acordo com a capacidade máxima de interceptação, todo o excesso precipitado passa através do dossel sem nenhuma atenuação, constituindo uma parcela da precipitação interna.

O modelo calcula a evaporação e a transpiração de forma independente para cada camada de forma gradual. Inicialmente realiza a evaporação da fração úmida do dossel segundo a taxa de evaporação potencial (eq. 10).

$$E_{Ij} = E_{pj} A_{wj} \Delta t_w \quad \text{eq. (10)}$$

Onde,

E_{Ij} é a quantidade de água interceptada evaporada no passo de tempo (m T^{-1});

E_{pj} é a taxa apropriada de evaporação potencial (m s^{-1});

A_{wj} é a fração úmida do dossel (%);

Δt_w é o tempo necessário (em termos de intervalo de tempo definido para operação do modelo) para evaporar a água interceptada na taxa potencial.

Se a taxa potencial for insuficiente para remover toda a água armazenada por interceptação Δt_w será igual ao Δt do modelo. A transpiração total da parte seca da vegetação é calculada pela eq. 11.

$$E_{Tj} = E_{tj}\left(1 - A_{wj}\right)\Delta t + E_{tj} A_{wj} (\Delta t - \Delta t_w) \quad \text{eq. (11)}$$

Onde,

E_{Tj} é a transpiração total da parte seca (m s^{-1});

E_{tj} é taxa de transpiração (m s^{-1});

A_{wj} é a fração úmida do dossel (%);

Δt é passo de tempo do modelo (h);

Δt_w é o tempo necessário (em termos de intervalo de tempo definido para operação do modelo) para evaporar a água interceptada na taxa potencial h.

A transpiração das superfícies secas de vegetação é calculada segundo a equação de Penman-Monteith (eq. 12).

$$E_{tj} = \frac{E_{pj}\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_{cj}}{r_{aj}}\right)} \quad \text{eq. (12)}$$

Onde,

E_{tj} é a taxa de transpiração (m s^{-1});

E_{pj} é a taxa apropriada de evaporação potencial (m s^{-1});

Δ é a declividade da curva pressão de vapor saturado – temperatura;

γ é a constante psicométrica (Pa ºC);

r_{cj} é a resistência do dossel ao transporte de vapor (s m^{-1}).

ra_j é a resistência aerodinâmica do dossel (s m^{-1}).

A evaporação do solo é calculada somente quando não existe vegetação rasteira. Quando úmido, o solo pode fornecer água à superfície a uma taxa igual ou maior que a demanda de evaporação potencial, mas quando a umidade do solo diminui, a taxa de perda de água para a superfície é menor que a taxa de evaporação potencial. Nas condições anteriores e nos estados de baixo teor de umidade no solo, a taxa de evaporação é controlada pelo solo e é uma função não linear do conteúdo da umidade do solo. A evaporação da água do solo é dada pela eq. 13.

$$E_s = \min(E_{ps}, F_e) \qquad \text{eq. (13)}$$

Onde,

E_s é a evaporação solo (m s^{-1});

$E_{ps} = E_{po} - (E_{lo} + E_{To})$

F_e é a dessorção (perda da água do solo para a superfície), determinada pela taxa a qual o solo pode liberar água para a superfície. F_e é uma função do tipo do solo e condições de umidade na zona superior do solo.

3.2.3 Resistência Aerodinâmica

Para a modelagem do perfil vertical do vento através do dossel superior são assumidas condições de atmosfera neutra, utilizando 3 camadas. O perfil do vento sobre o dossel superior é representado através de um perfil logarítmico que vai da altura de referência até a camada de rugosidade acima do dossel superior. No

dossel assume-se um perfil vertical que é exponencial e no espaço entre os troncos se supõe que é novamente logarítmico. Estas considerações são feitas de acordo com a eq. 14.

$$R_{ao} = \frac{ln\left(\frac{z_r - d_o}{z_{oo}}\right)}{U_r k^2}\left\{\frac{h_0}{n(z_w - d_o)}\left[exp\left(n_a\left(1 - \frac{d_o - z_{doo}}{h_o}\right)\right) - 1\right] + \frac{z_w - h_o}{z_w - d_o} + ln\left(\frac{z_r - d_o}{z_w - d_o}\right)\right\} \quad \text{eq. (14)}$$

Onde,

R_{ao} é a resistência aerodinâmica s m^{-1};

z_r é a altura de referência m;

d_o é o deslocamento m;

z_o é a rugosidade do dossel superior m;

z_w é é a altura do limite entre o perfil logarítmico superior e a sub-camada de rugosidade m;

h_o é a altura do dossel superior m;

n_a é o coeficiente de extinção admensional;

U_r é a velocidade do vento na camada de referência m s^{-1};

k é a constante de Von Karman 0,4 adimensional.

$$r_{au} = \left. ln\left(\frac{z_a - d_u}{z_{ou}}\right)^2 \right/ U(z_a)k^2 \quad \text{eq. (15)}$$

Onde,

r_{au} é a resistência aerodinâmica para o solo ou dossel inferior;

$z_a = 2 + d_u + z_{ou}$

d_u é o deslocamento m;

z_{ou} é a altura de rugosidade m;

U_r é a velocidade do vento na camada de referência m s^{-1};

k é a constante de Von Karmen 0,4 adimensional.

3.2.4 Resistência dos dosséis

A resistência dos dosséis é calculada separadamente para o dossel superior e para o dossel inferior seguindo o proposto por Wigmosta et al. (1994). Para ambos os dosséis a resistência é representada como a soma da resistência estomatal de todas as folhas individuais. Assume-se que as folhas contribuem em paralelo eq. 16

$$r_{cj} = {\langle r_{sj} \rangle}/{c_j LAI_j} \qquad \text{eq. (16)}$$

Onde,

r_{cj} é a resistência do dossel j s m^{-1};

c_j é é a proporção apropriada de um total projetado (unilateral) LAI e os suportes angulares denotar uma média inverso ao longo da gama do índice de área foliar do dossel;

LAI_j é o índice de área foliar do dossel j.

r_{sj} é a resistência estomatal da folha j dada pela eq. 17:

$$r_{sj} = r_{smin} f_1(T_j) f_2(vpd_j) f_3(PAR_j) f_4(\theta_j) \qquad \text{eq. (17)}$$

Onde

f_1 função dependente da temperatura do ar eq. 18;

f_2 função dependente do déficit de pressão de vapor eq. 19;

f_3 função dependente do fluxo de radiação foto sinteticamente ativa eq. 20;

f_4 função dependente da umidade do solo eq. 21;

$$f_1 = [0{,}08T_a - 0{,}0016T_a^2]^{-1} \qquad \text{eq. (18)}$$

Onde T_a é a temperatura do ar ºC.

$$f_2 = [1 - (e_s - e)/e_c]^{-1} \qquad \text{eq. (19)}$$

Onde,

e_s é a pressão de vapor saturada Pa;

e é a pressão de vapor Pa;

e_c é a pressão de vapor que causa o fechamento dos estomatos (cerca de 4KPa).

$$f_3 = \frac{1+R_p/R_{pc}}{r_{smin}/r_{smax}+R_p/R_{pc}} \quad \text{eq. (20)}$$

f_4=0 quando $\Theta \leq \Theta_{wp}$ eq. (21)

$f_4 = \frac{\theta^*-\theta_{wp}}{\theta-\theta_{wp}}$ quando $\Theta_{wp} \leq \Theta \leq \Theta^*$

f_4 = 1 quando $\Theta^* \leq \Theta \leq \Theta_s$

Onde,

Θ é a umidade média do solo %;

Θ_{wp} é o ponto de murcha %;

Θ^* é o teor de umidade acima do qual as condições de transpiração não são restringidas %;

Θ_s é o teor de umidade quando o solo atinge a saturação %;

2.5. Radiação de ondas curtas e longas

As radiações de onda curta e onda longa são separadas para o dossel superior e dossel inferior ou solo. O dossel superior recebe a radiação solar direta (radiação de onda curta) e emite radiação de onda longa para o céu e para o dossel inferior ou solo. A rede de radiação absorvida no dossel superior R_{no} é dada pela eq. 22.

$$R_{no} = R_s[(1-\alpha_o) - \tau 0(1-a_u)]F + (L_d + L_u - 2L_o)F \quad \text{eq. (22)}$$

Onde,

R_{no} é a densidade do fluxo de radiação em rede J m^{-2} h^{-1};

R_s é a radiação de onda curta fornecida ao modelo W m^{-2};

α_o é o albedo do dossel superior;

τ_o é a fração de radiação de onda curta transmitida pelo dossel superior %;

α_u é o albedo do dossel inferior;

F é a fração da superfície do solo coberta pelo dossel superior %;

L_d é o fluxo de radiação longa para o céu W m^{-2};

L_u é o fluxo de radiação longa W m^{-2};

L_0 é o fluxo de radiação

A fração de ondas curtas transmitidas pelo dossel superior são calculadas de acordo com a lei de Beer (MonteithandUnsworth, 1990 citado por Wigmosta et al., 2002) eq. 23

$$\tau_o = \exp(-k_b LAI_o) \qquad \text{eq. (23)}$$

Onde,

τ_o é a fração de onda curta transmitida pelo dossel superior;

k_b é o coeficiente de atenuação do dossel;

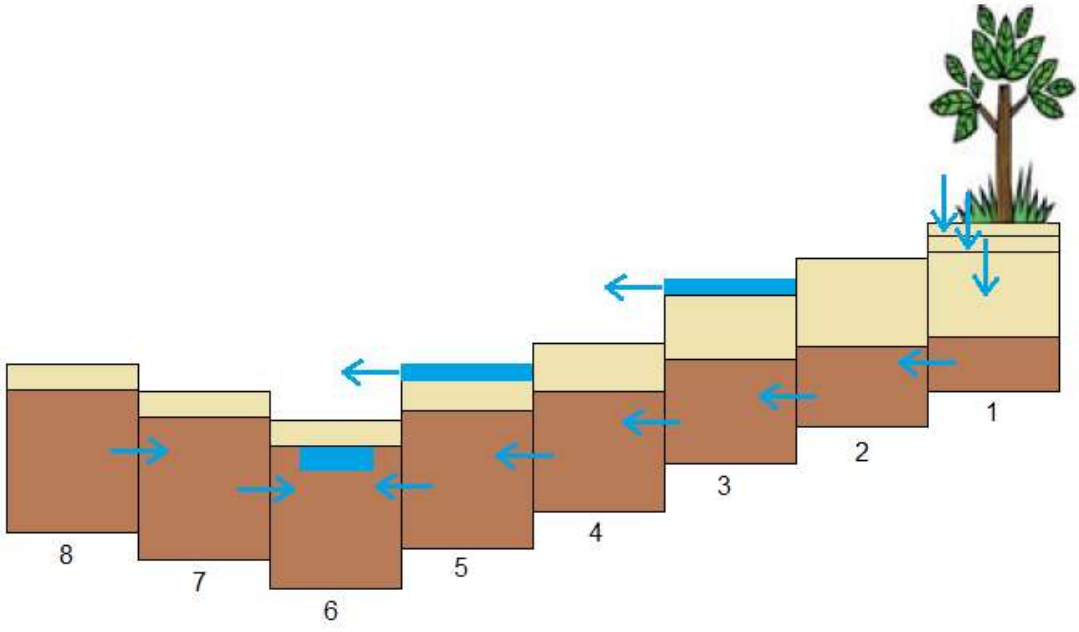
LAI_o é o índice de área foliar do dossel superior;

3.2.5 Infiltração e percolação da água no solo não saturado

O modelo trabalha com uma superfície do solo distribuída em células, sendo que cada uma possui n camadas de solo até atingir a zona de saturação. A água disponível para infiltração em cada célula provém da precipitação interna, isto é, aquela que supera a interceptação e do escoamento superficial recebido das células vizinhas. (Figura 9). Existindo água disponível, esta irá infiltrar desde que não

exceda a taxa máxima de infiltração (volume máximo de água que pode ser infiltrado a cada passo de tempo) e que o solo não esteja saturado. A água excedente na superfície da célula se transformará no escoamento superficial.

Figura 9: Representação no modelo do movimento da água na direção do rio. As partes em marrom claro mostram as áreas não saturadas e, em marrom escuro, as áreas saturadas. As setas verticais indicam a percolação da zona de raízes e a recarga do lençol freático da célula local. As células trocam água com suas vizinhas próximas resultando em um movimento descendente de água (setas horizontais) na direção do curso de água.



Fonte: Adaptado de Wigmosta et al. (2002) e Cuartas (2008)

Inicialmente o modelo calcula a infiltração na camada superior e transfere a umidade verticalmente (Q_v) de forma descendente desde a primeira camada da superfície até a camada inferior da coluna. Então o fluxo sub superficial (lateral) da zona saturada (Q_{Sin} - Q_{Sout}) é adicionado. Então é feita verificação para que a umidade da camada não supere o valor da porosidade. Caso o valor de umidade seja maior que a porosidade, o excesso é propagado para a camada logo acima. Se chegar atingir a superfície do solo, através do processo de exfiltração, este se transforma numa parcela do escoamento superficial.

As equações para o balanço de massa para as camadas superior eq. 24, intermediária eq. 25 e inferior eq. 26 são:

$$d_1\left(\theta_1^{t+\Delta t} - \theta_1^t\right) = I_f - Q_v(\theta_I) - \sum_{j=1}^{2} f_{rj1}E_{tj} - E_s + V_{ex2} - V_{ex1} \quad \text{eq. (24)}$$

$$d_k\left(\theta_k^{t+\Delta t} - \theta_k^t\right) = Q_v(\theta_{k-1}) - Q_v(\theta_k) - \sum_{j=1}^{2} f_{rjk}E_{tj} + V_{exk+1} \quad \text{eq. (25)}$$

$$d_{ns}\left(\theta_k^{t+\Delta t} - \theta_k^t\right) = Q_v(\theta_{ns-1}) + (Q_{Sin}^t - \theta_{Sout}^t)\Delta t \quad \text{eq. (26)}$$

Onde,

d_k é a espessura da camada m;

θ_k é a umidade média da camada k %;

I_f é o volume de água infiltrado durante o passo de tempo;

Q_v é a percolação (volume de água transferido na direção descendente) para a próxima camada m s^{-1};

f_{rjk} é a fração de raízes na camada de vegetação j na camada de solo k %;

V_{esk} é o volume da água devido à ascensão do lençol freático;

E_s é o volume de umidade do solo evaporada da camada superficial;

Q^t_{Sin} é o volume de fluxo lateral da zona saturada que entra na coluna de solo no intervalo de tempo m s^{-1};

Q^t_{Sout} é o volume de fluxo lateral da zona saturada que sai da coluna de solo no intervalo de tempo m s^{-1};

A taxa de movimento descendente da água na zona não saturada (Figura 9, setas verticais) é calculada pela Lei de Darcy, admitindo um gradiente hidráulico unitário, e usando a equação Brooks-Corey para estimativa da condutividade hidráulica eq 27

$$q_v(\theta) = K_s\left[\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r}\right]^{\left(\frac{2}{m}\right)+3} \quad \text{eq. (27)}$$

Onde,

K_s é a condutividade hidráulica saturada m s^{-1};

m é o índice de distribuição de tamanhos de poros;

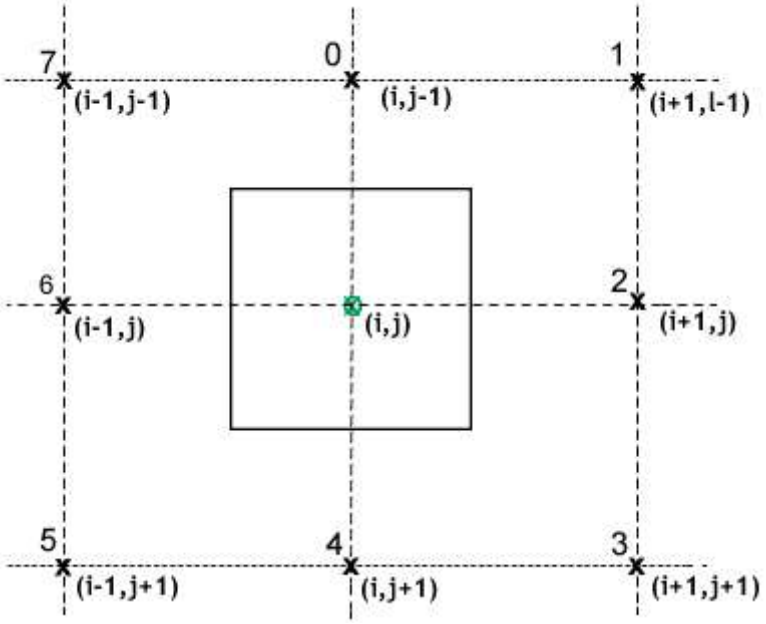
φ a porosidade do solo %;

θ_r o teor de umidade residual do solo, ou seja, umidade que permanece no solo a altas pressões %.

3.2.6 Escoamento saturado

O modelo usa uma aproximação “célula a célula” para direcionar o fluxo subterrâneo (Wigmosta et al., 1994; Wigmosta e Lettenmaier, 1999), utilizando uma aproximação cinemática, no caso de encostas íngremes com solo permeável e com pouca espessura na camada de solo (neste caso, os gradientes hidráulicos são aproximados às declividades da superfície local); ou uma aproximação de difusão, em áreas de relevo plano (os gradientes hidráulicos devem ser aproximados às declividades locais do lençol freático). As células de grade do modelo são centralizadas em cada ponto do MDT (Figura 10). As direções entre um nó e seus vizinhos são nomeadas pelo índice k e numeradas, em sentido horário, indo de 0 (direção norte) até 7 (Wigmosta et al., 2002).

Figura 10: Modelo escoamento



Fonte: Adaptado de Wigmosta et al. (2002) e Cuartas (2008)

3.2.7 Escoamento em rios e canais

Para o cálculo do escoamento nos canais dos rios é proposto um modelo de reservatórios em cascata linear. A rede de drenagem é formada por seguimentos individuais, cada qual com seus próprios parâmetros hidráulicos. Os canais recebem água do escoamento superficial e do escoamento sub-superficial. O escoamento que sai de um segmento pode drenar para outro segmento ou sair da bacia.

Como em muitos modelos hidrológicos, o DHSVM adota um algoritmo do tipo armazenamento linear simples para o modelo de transporte no canal, e no qual cada trecho do canal é tratado como um reservatório de largura constante. O escoamento calculado está associado de maneira linear com o armazenamento (V_c) do trecho. A velocidade de fluxo é calculada pela equação de Manning usando uma profundidade de referência do escoamento. Essa profundidade corresponde ao raio hidráulico (razão entre área molhada e o perímetro molhado), o que permite que o armazenamento no tempo t +1 seja calculado como na (eq 28):

$$V_c^{t+1} = \frac{Q_{in}}{k} + \left(V_c^t - \frac{Q_{in}}{k}\right)\exp(-k\Delta t) \qquad \text{eq. (28)}$$

Onde,

V_c é o armazenamento no trecho do canal;

Q_{in} é o fluxo da montante que alcança o trecho do canal no passo de tempo;

e k é o parâmetro de armazenamento do segmento obtido pela eq 29 abaixo:

$$k = \frac{{R_r}^{2/3}\sqrt{S_o}}{n\Delta L} \qquad \text{eq. (29)}$$

Onde,

K é o parâmetro de armazenamento do segmento;

R_r é o rio hidráulico para a profundidade de referência do fluxo;

S_o é a declividade m/m;

n é a rugosidade hidráulica (coeficiente de Manning) do canal

e ΔL é o comprimento do canal m.

A vazão média do segmento é obtida através do balanço de massa pela eq 30:

$$Q_{out} = Q_{in} - \frac{V_c^{t+1} - V_c^t}{\Delta t}$$ eq. (30)

Onde,

Q_{out} é a vazão de saída do segmento;

Q_{in} é o fluxo da montante que alcança o trecho do canal no passo de tempo;

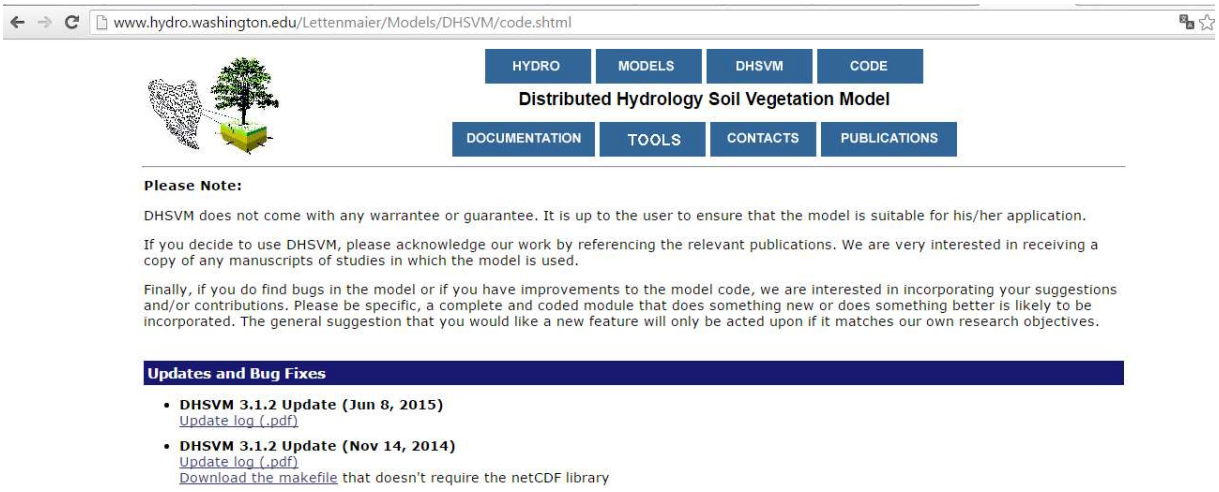
V_c é o armazenamento no trecho do canal;

3.3 Implementação do modelo DHSVM

Para implementação do DHSVM foram reunidas informações contidas no site da Universidade de Washington (Figura 11) disponível em:

http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml

Figura 11: Estrutura site



O site oferece as publicações da concepção do modelo (Wigmosta et al. 1994; Wigmosta et al 2002), o código fonte e documentação sobre os parâmetros, dados de entrada e equações.

Também foram levantadas informações nos fóruns de discussão. Tomou-se como base de apoio os trabalhos de Cuartas (2008) e Kruk et al (2009).

3.4 Análise exploratória do modelo

Conforme Harmel et al. (2014) foi desenvolvida uma análise exploratória do modelo. Foram analisadas possíveis incertezas dos dados, na estrutura e características da representação dos processos naturais no modelo diante da realidade e problemática

que se pretende abordar, sensibilidade de seus parâmetros não só nas vazões fluviais, mas em processos intermediários, analisando a coerência entre valores simulados e variáveis ou parâmetros diretamente observados ou obtidos em outros estudos da literatura para a mesma área de interesse.

Nesse sentido, conforme sugerido por Kruk et al. (2007) o enfoque do estudo de sensibilidade foram os parâmetros de solos estabelecidos como os mais sensíveis: condutividade hidráulica lateral dos solos; parâmetro que define o decaimento exponencial para a percolação da água nos solos; parâmetro que define a infiltração máxima para solo seco.

Inicialmente optou-se por realizar uma variação entre -20% e + 20%, assim como foi utilizado por Kruk et al. (2009) para os parâmetros de vegetação. Para esta análise inicial se utilizou o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009 como referência para estudo.

Depois tomando como base de estudo o ano de 2010 foram testadas variações entre -50 % e +50 %, assim como o valores utilizados por Kruk et al. (2009).

3.5 Ajuste e calibração de parâmetros

A partir da análise da base de dados foram selecionados dois períodos para estudo:

- Entre Outubro de 2008 e Fevereiro de 2009;
- O ano de 2010 completo

Para o período de 2009 além das análises exploratórias foi feito algum esforço de calibração. Os valores e referências dos parâmetros utilizados são descritos a seguir:

Para o solo identificado como *Sandy Clay Loam* pela metodologia do *USDA* foram utilizados os valores *default,* isto é pré-estabelecidos, sugeridos na documentação do DHSVM para este tipo de solo.

Tabela 3: Parâmetros solo

Parâmetro	Unidade	Valor
Condutividade lateral	m s^{-1}	0,01
Coeficiente decréscimo exp	-	3
Taxa Infiltração máxima	m s^{-1}	0,003

Albedo da superfície	-	0,1		
Número de camadas	-	3		
Porosidade	%	0,40	0,40	0,40
Distribuição dos poros	-	0,21	0,21	0,21
Pressão de borbulhamento	M	0,15	0,15	0,15
Capacidade de campo	%	0,21	0,21	0,21
Ponto de murcha	%	0,19	0,19	0,19
Densidade aparente	Kg m³	1569	1569	1569
Condutividade vertical	$m\ s^{-1}$	0,01	0,01	0,01
Condutividade térmica	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$	7,114	6,923	7,0
Capacidade térmica	$J\ m^{-3}\ ºC^{-1}$	1400000	1400000	1400000

Para as áreas identificadas como afloramentos rochosos e matacões foram utilizados os valores para rocha propostos pelo DHSVM:

Tabela 4: Parâmetros áreas de afloramentos rochosos e matacões

Parâmetro	**Valor**		
Condutividade lateral	0,01		
Coeficiente decréscimo exp	3		
Taxa Infiltração máxima	0,003		
Albedo da superfície	0,1		
Número de camadas	3		
Porosidade	0,40	0,40	0,40
Distribuição dos poros	0,21	0,21	0,21
Pressão de borbulhamento	0,15	0,15	0,15
Capacidade de campo	0,21	0,21	0,21
Ponto de murcha	0,19	0,19	0,19
Densidade aparente	1569	1569	1569
Condutividade vertical	0,01	0,01	0,01
Condutividade térmica	7,114	6,923	7,0
Capacidade térmica	1400000	1400000	1400000

Parâmetros da vegetação

Para as áreas de cobertura identificadas como floresta ombrófila densa sub montana os parâmetros foram preenchidos observando os valores utilizados propostos por Kruk et al. (2009), exceto onde indicado:

Tabela 5: Parâmetros Floresta Ombrófila Densa Submontana

Parâmetro	**Unidade**	**Valor**	
Presença de dossel superior	-	presente	
Presença de dossel inferior	-	presente	
Fração de cobertura dossel superior[1]	%	0,95	
Distância tronco a copa	M	0,5	
Atenuação aerodinâmica	-	2,5	
Atenuação da radiação	-	0,88	
Altura vegetação[1]	M	20,0	1,0
Máxima resistência estomatal		5000	3000

Mínima resistência estomatal		666,6	200	
Limiar de umidade	%	0,33	0,13	
Déficit de pressão de vapor	Pa	3663	3663	
Radiação foto sinteticamente ativa	W m^{-2}	0,108	0,108	
Índice Área Foliar Jan	-	4,89	1,66	
Índice Área Foliar Fev	-	4,60	1,56	
Índice Área Foliar Mar	-	4,13	1,40	
Índice Área Foliar Abr	-	3,73	1,27	
Índice Área Foliar Mai	-	3,26	1,11	
Índice Área Foliar Jun	-	3,15	1,07	
Índice Área Foliar Jul	-	3,03	1,03	
Índice Área Foliar Ago	-	2,97	1,01	
Índice Área Foliar Set	-	2,94	1,00	
Índice Área Foliar Out	-	2,88	0,98	
Índice Área Foliar Nov	-	2,97	1,01	
Índice Área Foliar Dez	-	3,15	1,07	
Albedo Jan	-	0,2	0,2	
Albedo Fev	-	0,2	0,2	
Albedo Mar	-	0,2	0,2	
Albedo Abr	-	0,2	0,2	
Albedo Mai	-	0,2	0,2	
Albedo Jun	-	0,2	0,2	
Albedo Jul	-	0,2	0,2	
Albedo Ago	-	0,2	0,2	
Albedo Set	-	0,2	0,2	
Albedo Out	-	0,2	0,2	
Albedo Nov	-	0,2	0,2	
Albedo Dez	-	0,2	0,2	
Número zona de raízes	-	3		
Profundidade raízes	M	0,10	0,25	0,40
Fração raízes dossel sup	%	0,80	0,10	0,10
Fração raízes dossel inf	%	0,20	0,80	0,00

[1] Valores levantados pelo projeto HIDROCIDADES

Para as áreas de cobertura identificadas como floresta ombrófila densa montana os parâmetros foram preenchidos observando os valores utilizados propostos por Kruk et al. (2009), exceto onde indicado:

Tabela 6: Parâmetros Floresta Ombrófila Densa Montana

Parâmetro	**Unidade**	**Valor**
Presença de dossel superior	-	Presente
Presença de dossel inferior	-	Presente
Fração de cobertura dossel superior[1]	%	0,95
Distância tronco a copa	M	0,5
Atenuação aerodinâmica	-	2,5
Atenuação da radiação	-	0,88

Altura vegetação[1]	M	20,0	1,0	
Máxima resistência estomatal		5000	3000	
Mínima resistência estomatal		666,6	200	
Limiar de umidade	%	0,33	0,13	
Déficit de pressão de vapor	Pa	3663	3663	
Radiação foto sinteticamente ativa	W m^{-2}	0,108	0,108	
Índice Área Foliar Jan	-	4,89	1,66	
Índice Área Foliar Fev	-	4,60	1,56	
Índice Área Foliar Mar	-	4,13	1,40	
Índice Área Foliar Abr	-	3,73	1,27	
Índice Área Foliar Mai	-	3,26	1,11	
Índice Área Foliar Jun	-	3,15	1,07	
Índice Área Foliar Jul	-	3,03	1,03	
Índice Área Foliar Ago	-	2,97	1,01	
Índice Área Foliar Set	-	2,94	1,00	
Índice Área Foliar Out	-	2,88	0,98	
Índice Área Foliar Nov	-	2,97	1,01	
Índice Área Foliar Dez	-	3,15	1,07	
Albedo Jan	-	0,2	0,2	
Albedo Fev	-	0,2	0,2	
Albedo Mar	-	0,2	0,2	
Albedo Abr	-	0,2	0,2	
Albedo Mai	-	0,2	0,2	
Albedo Jun	-	0,2	0,2	
Albedo Jul	-	0,2	0,2	
Albedo Ago	-	0,2	0,2	
Albedo Set	-	0,2	0,2	
Albedo Out	-	0,2	0,2	
Albedo Nov	-	0,2	0,2	
Albedo Dez	-	0,2	0,2	
Número zona de raízes	-	3		
Profundidade raízes[2]	m	0,10	0,25	0,40
Fração raízes dossel sup[2]	%	0,80	0,10	0,10
Fração raízes dossel inf[2]	%	0,20	0,80	0,00

[1] Valores levantados pelo projeto HIDROCIDADES

[2] Valores conforme Rosado et al (2011).

Para as áreas identificadas como macega foram utilizados os valores para o dossel inferior da Floresta Ombrófila Submontana:

Tabela 7: Parâmetros regiões de macega

Parâmetro	**Unidade**	**Valor**
Presença de dossel superior	-	não presente
Presença de dossel inferior	-	Presente
Fração de cobertura dossel superior	%	-

Distância tronco a copa	m	-		
Atenuação aerodinâmica	-	-		
Atenuação da radiação	-	-		
Altura vegetação	m	-	1,0	
Máxima resistência estomatal		-	3000	
Mínima resistência estomatal		-	200	
Limiar de umidade	%	-	0,13	
Deficit de pressão de vapor	Pa	-	3663	
Radiação foto sinteticamente ativa	W m^{-2}	-	0,108	
Índice Área Foliar Jan	-	-	1,66	
Índice Área Foliar Fev	-	-	1,56	
Índice Área Foliar Mar	-	-	1,40	
Índice Área Foliar Abr	-	-	1,27	
Índice Área Foliar Mai	-	-	1,11	
Índice Área Foliar Jun	-	-	1,07	
Índice Área Foliar Jul	-	-	1,03	
Índice Área Foliar Ago	-	-	1,01	
Índice Área Foliar Set	-	-	1,00	
Índice Área Foliar Out	-	-	0,98	
Índice Área Foliar Nov	-	-	1,01	
Índice Área Foliar Dez	-	-	1,07	
Albedo Jan	-	-	0,2	
Albedo Fev	-	-	0,2	
Albedo Mar	-	-	0,2	
Albedo Abr	-	-	0,2	
Albedo Mai	-	-	0,2	
Albedo Jun	-	-	0,2	
Albedo Jul	-	-	0,2	
Albedo Ago	-	-	0,2	
Albedo Set	-	-	0,2	
Albedo Out	-	-	0,2	
Albedo Nov	-	-	0,2	
Albedo Dez	-	-	0,2	
Número zona de raízes	-	3		
Profundidade raízes	m	0,10	0,25	0,40
Fração raízes dossel sup	%	-	-	-
Fração raízes dossel inf	%	0,20	0,80	0,00

Para as regiões de afloramentos rochosos e matacões foram marcados como não presente as presenças dos dosséis superior e inferior, não sendo necessário preencher os parâmetros de vegetação este caso, seguindo o proposto pelo DHSVM no caso de rochas em seu arquivo de *default* de entrada de dados.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Implementação do modelo DHSVM

A seguir apresenta-se o tutorial para implementação do código computacional do modelo hidrológico DHSVM.

O modelo DHSVM foi implementado no laboratório do Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos – GRHIP, localizado na Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 5º andar, Bloco E, Sala 5029. O diretório "DHSVM" está localizado diretamente no disco local, e também um atalho na área de trabalho. Na pasta "CÓDIGO FONTE DHSVM" está localizado o arquivo fonte do DHSVM obtido a partir do endereço:

http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml

4.1.1 Softwares de apoio

Para a implementação e execução do DHSVM são necessárias algumas soluções de apoio para compilar, executar códigos e preparar a base de dados. As soluções necessárias são respectivamente: um sistema de informações geográficas, um terminal capaz de executar *scripts Arc Macro Language* – AML, biblioteca java, descompactador de arquivos, editor de planilhas e um terminal para compilar e executar aplicações equivalentes a programas comuns em sistemas Unix. O ambiente onde o modelo foi implementado tem como sistema operacional o Windows 7 Professional. O Quadro 2 apresenta os softwares utilizados para implementação do DHSVM.

Quadro 2- *Softwares* de apoio para implementação e execução do DHSVM

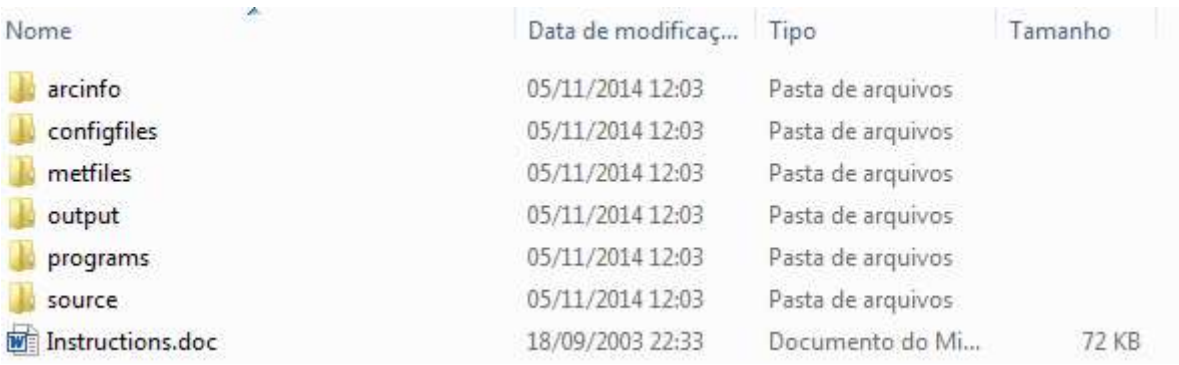
Solução	***Software* utilizado**	**Versão**	**Licença**
Sistema de informações geográficas	Esri ArcGIS	10.1	Licenciado pela UERJ
Terminal AML	Esri ArcInfo Workstation	10	Licenciado pela UERJ

Biblioteca java	Java Runtime Environment	1.8.0_51	Livre
Descompactador de arquivos	Winrar	4.10	Livre limitado
Editor de planilhas	Microsoft Excel	2013	Licenciado pela UERJ
Terminal (compilador e execução)	Cygwin	1.90.4	Livre
Sistema Operacional	Windows Professional	7	Licenciado pela UERJ

4.1.2 Código DHSVM

O arquivo do código fonte obtido no sítio do DHSVM é compactado e tem extensão "*.tar.gz*". Este arquivo foi descompactado utilizando o Winrar e seu conteúdo foi extraído dentro de uma pasta nomeada DHSVM. O conteúdo dessa pasta é apresentado na Figura 12. A versão do DHSVM utilizada neste trabalho foi a 2.0, pelo fato desta versão atender as necessidades do estudo e possuir um número maior de material disponível.

Figura 12 - Conteúdo DHSVM



Cada pasta tem uma função específica e estas foram organizadas no Quadro 3

Quadro 3- Funções diretórios DHSVM

Pasta	Função
Arcinfo	Pasta onde ficam localizadas as

	informações geográficas para execução do modelo.
Configfiles	Pasta onde fica localizado o arquivo de configuração do modelo quanto a execução e parâmetros.
Metfiles	Pasta onde ficam localizados os dados meteorológicos necessários para a execução do modelo.
Output	Pasta onde o modelo criará os arquivos de saída.
Programs	Pasta com programas auxiliares utilizados na formatação de arquivos que alimentam o modelo.
Source	Pasta contendo o código fonte do modelo.

O DHSVM lê os arquivos de informação geográfica em formato binário ".bin", necessitando portanto de um tratamento prévio destes dados para a leitura pelo modelo. Os arquivos de informação geográfica devem ser preparados no formato matricial (*Raster*), todos com o mesmo número de linhas e colunas, e tamanho de célula. O Quadro 4 mostra os mapas necessários para execução do DHSVM e seus respectivos tipos de dados.

Quadro 4- Estruturação base espacial

Raster	**Tipo de dados**
Modelo digital de terreno	Real
Mapa de cobertura do solo	Inteiro
Mapa de tipo do solo	Inteiro
Mapa de profundidade do solo	Real
Máscara da bacia	Inteiro

É necessário corrigir as depressões do Modelo Digital de Terreno (MDT) (operação *fill sinks*) para que seja possível executar posteriormente os *scripts* AML utilizados

na criação da rede de drenagem. Para esta correção foi utilizado a função "*fill sinks*" do *Arc Hydro*.

Para constituição do mapa de vegetação, a documentação sobre o DHSVM implica em código numérico que tipifica as características principais da vegetação, e.g. floresta ombrófila densa sub-montana > 1; montana > 2.

Para gerar o mapa de profundidade do solo foram utilizados os scripts AML do DHSVM, sendo necessária a definição das profundidades máxima e mínima.

Na preparação da máscara (malha) de cobertura da área da bacia, a malha definida deve "conter" a região de drenagem, avançando para fora dos limites da bacia hidrográfica. O valor "1" indica que a célula/grid é interior à bacia, e o valor "0" indica externo à mesma. Para preparar esta máscara foi utilizada a delimitação da bacia gerada pelas sub rotinas da extensão *Arc Hydro* operando no ArcGIS. Desta forma, a área da bacia será constituída de forma aproximada por bordas quadráticas.

4.1.3 Conversão de Raster para Bin

Para converter os dados para o formato de entrada no modelo, inicialmente utilizou-se a ferramenta "Raster to ASCII" do ArcMap localizada em: ArcToolBox>Conversion Tools>From Raster>Raster to ASCII. Com esta ferramenta é possível exportar o Raster em um arquivo com formato ".txt".

Antes de realizar a conversão de ASCII para binário é necessário retirar o cabeçalho dos arquivos .txt. O bloco de notas do Windows pode ser utilizado, deletando a parte do cabeçalho.

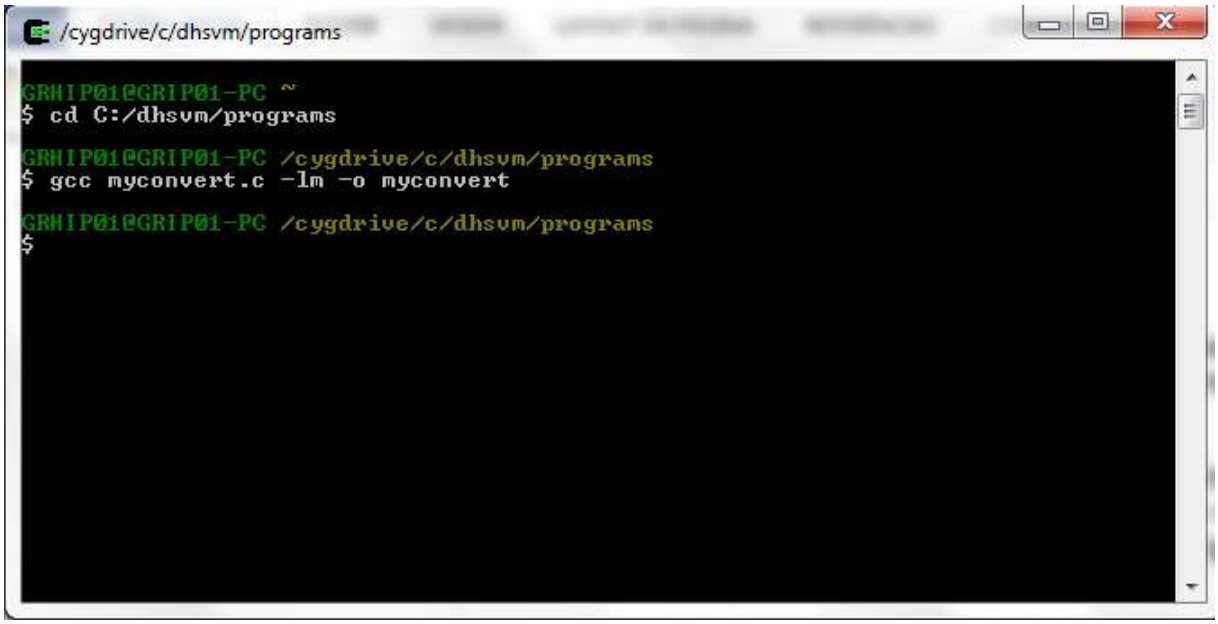
O DHSVM disponibiliza em seus arquivos um conversor de ASCII para binário, este programa se chama "myconvert" e seu código fonte pode ser encontrado na pasta programs. No entanto é necessário compilar seu código fonte e isto pode ser feito através de um terminal como o Cygwin com as seguintes linhas de comando:

1- cd .../dhsvm/programs

2- gcc myconvert.c –lm –o myconvert

A linha de comando 1 altera o espaço trabalho onde o terminal está operando naquele instante e a linha de comando 2 compila o código fonte do arquivo ”myconvert.c” utilizando a biblioteca gcc. Para tanto é necessário que a biblioteca gcc esteja corretamente instalada no terminal, um teste de verificação pode ser feito digitando gcc no terminal e apertando enter, a mensagem “gcc: no input files” deve aparecer neste caso. A mensagem “bash: gcc: comando não encontrado” indica que a biblioteca não está instalada no terminal. A Figura 13 exemplifica a execução dos comandos citados acima.

Figura 13 - Compilação myconvert



Após compilar o programa é criado na pasta programs um executável myconvert.exe. Este programa é utilizado para converter os arquivos ASCII para BIN, para tanto deve-se executar os seguintes comandos no terminal Cygwin

1- cd .../dhsvm/programs

./myconvert ascii char .../arcinfo/mask.txt .../arcinfo/mask.bin 239 231

A linha de comando 1 altera o espaço trabalho onde o terminal está operando naquele instante e a linha de comando 2 executa o programa myconvert com a seguinte estrutura de parâmetros:

./myconvert <formato de entrada> <formato de saída> <localização do arquivo> <arquivo de saída> <número de linhas> <número de colunas>

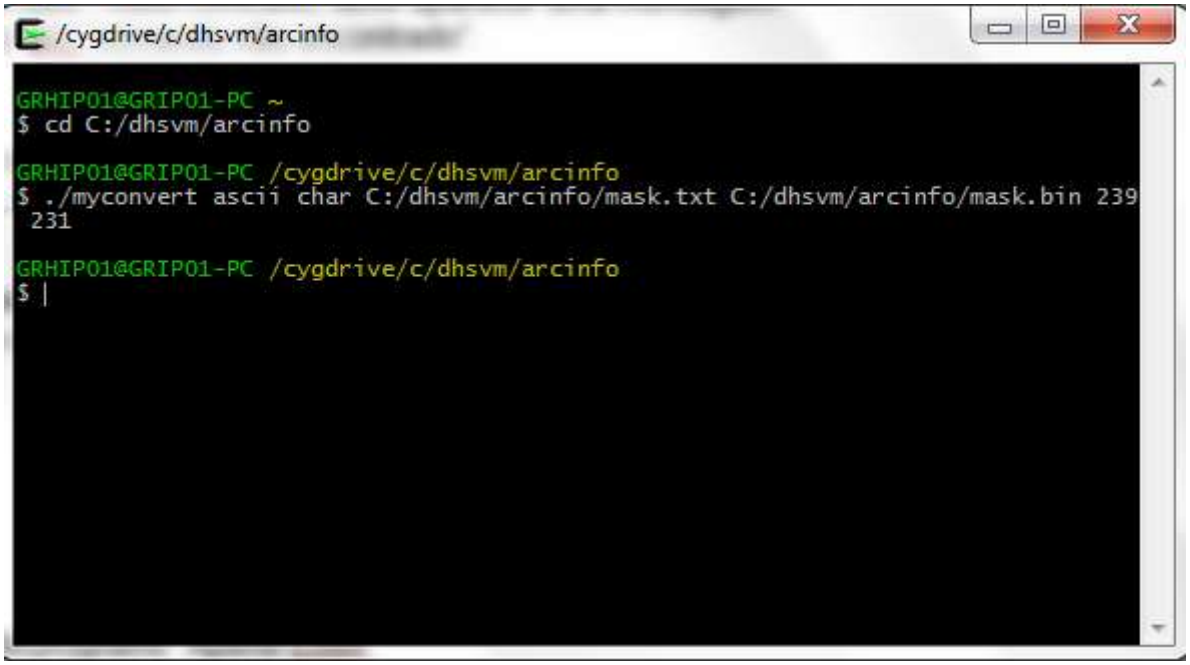
Os arquivos devem ter seus formatos de entrada especificados conforme o Quadro 5. Todos os arquivos tem 239 linhas e 231 colunas.

Quadro 5- Formatos de dados para conversão em binário

Arquivo	Formato
Modelo digital de Elevação	Float
Máscara da bacia	Char
Mapa de vegetação ou cobertura do solo	Char
Mapa dos tipos de solo	Char
Mapa profundidade do solo	Float

Cada arquivo deve ser convertido por linha de comando individual, a Figura 14 exemplifica a conversão para o arquivo de máscara da bacia.

Figura 14 - Conversão ascii para binário



4.1.4 Rede de drenagem e estradas

Os dados de entrada relativos a rede de drenagem e malha de estradas são organizados em tabelas textuais de arquivos “.dat”. No Quadro 6 estão organizados os arquivos de acordo com sua função.

Quadro 6- Arquivos rede de drenagem e estradas

Arquivo	**Função**
stream.network.dat	Informações individuais sobre os canais como profundidade, comprimento e classificação Stralher.
stream.map.dat	Localização e caracterização espacial da rede de drenagem.
stream.class.dat	Informações sobre classes de canais que são comum a todos como infiltração média, coeficiente de atrito.
road.network.dat	Informações individuais sobre as estradas como comprimento, largura.
road.map.dat	Localização e caracterização espacial da malha de estradas.
road.class.dat	Informação sobre classes de estradas que são comum a todos como granulometria dos asfaltos, coeficiente de infiltração.

Para criação dos arquivos relativos a rede de drenagem e malha de estradas são utilizados os scripts AML fornecidos junto ao modelo.

4.1.5 Arquivos de dados climatológicos/meteorológicos

Os arquivos das forçantes/condicionantes meteorológicos do modelo devem ser preparados em um arquivo, contendo a data e hora de cada dado (mm/dd/aaaa-hh) em uma coluna, e em seguida os dados nesta ordem: Temperatura, Velocidade do vento, Umidade relativa, Radiação solar (ondas curtas), Radiação de ondas longas e Precipitação. Cada coluna deve conter uma informação, por exemplo a primeira a

data, a segunda a temperatura e assim sucessivamente. Cada coluna deve ser separada por espaço ou tabulações. Importante ressaltar que para o DHSVM o ponto "." é responsável por separar as casas decimais. As unidades dos dados de entrada também devem ser observadas. O Quadro 7 apresenta as unidades para este conjunto de dados.

Quadro 7- Unidades métricas dos dados climatológicos que alimentam o DHSVM

Forçante	**Unidade**
Temperatura	ºC
Velocidade do vento	m/s
Umidade relativa	%
Radiação solar (ondas curtas)	W/m²
Radiação de ondas longas	W/m²
Precipitação	m

4.1.6 Inicialização das variáveis de estado do DHSVM

É necessário fornecer dados para que o modelo inicialize suas variáveis de estado. Estes dados representam o estado inicial do sistema no momento de início da simulação. Para criar arquivos de estado inicial para o solo e vegetação do DHSVM deve-se criar primeiramente um arquivo ".txt" com as informações conforme o Quadro 8. Cada linha deve conter uma informação. Para inicialização das variáveis de estado de rios e canais o procedimento é feito em separado, conforme a seguir.

Quadro 8- Dados iniciais DHSVM

Informação	**Formato**
Diretório onde será localizado o arquivo	.../diretório/
Data início da simulação	mm/dd/aaaa-hh
Número de linhas e colunas	Nº linhas Nº colunas
Número de camadas de vegetação	Nº de camadas (geralmente 2)
Precipitação interceptada	M
Neve interceptada	m (no caso de países tropicais 0)
Camada de cobertura de gelo	m (no caso de países tropicais 0)

Número de dias desde última nevasca	Nº de dias
Água equivalente em forma de gelo	M
Quantidade de água abaixo do gelo	M
Temperatura abaixo da camada	ºC
Quantidade de água acima do gelo	M
Temperatura acima da camada	ºC
Fração estável de gelo	%
Número de zona de raízes	número zona de raízes
Umidade do solo nas camadas	% (Um valor para cada camada)
Temperatura na superfície do solo	ºC
Temperatura do solo nas camadas	ºC (Um valor para cada camada)
Energia armazenada no solo (calor)	J/m³
Escoamento superficial	m³/passo de tempo

Uma vez preparado este arquivo ".txt", o DHSVM fornece um programa que executa a conversão destes valores para arquivos binários que o modelo lê.

4.1.7 Arquivo de configuração

O arquivo de configuração do modelo está localizado na pasta .../dhsvm/configfiles

Na versão utilizada o nome deste arquivo é "Input.rainycr"

Neste arquivo são colocadas informações para a execução do modelo como, data de inicio e final da simulação, passo de tempo utilizado, caminho para arquivos de entrada de dados, e ajuste de parâmetros do modelo.

4.1.8 Compilação do código-fonte

Para compilar o código fonte do DHSVM é necessário extrair o conteúdo do arquivo ".rar" localizado em .../dhsvm/source

Existem dois arquivos neste diretório, um da interface mwm e o outro nomeado "dhsvm". O arquivo a ser extraído é o que contém o nome do modelo. Será criada uma pasta com os códigos fontes do modelo. Para compilar este código em

um terminal de comandos como o Cygwin primeiro o diretório deve ser localizado através da seguinte linha de comando:

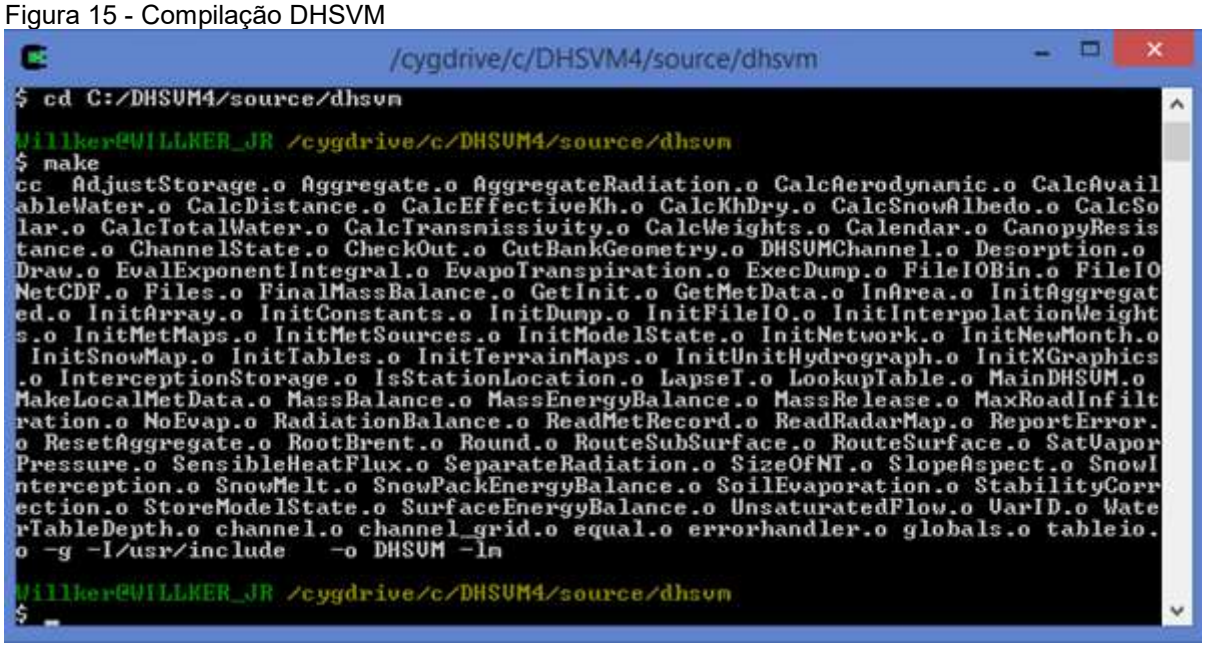
cd .../dhsvm/source/dhsvm

Uma vez na pasta onde os códigos estão localizados o seguinte comando é digitado:

Make

A Figura 15 demonstra o processo de compilação do DHSVM.

Figura 15 - Compilação DHSVM



4.1.9 Execução do código computacional do modelo DHSVM

Para a execução do DHSVM deve-se, através de um terminal como o Cygwin, localizar a pasta onde está o código fonte do modelo através da seguinte linha de comandos:

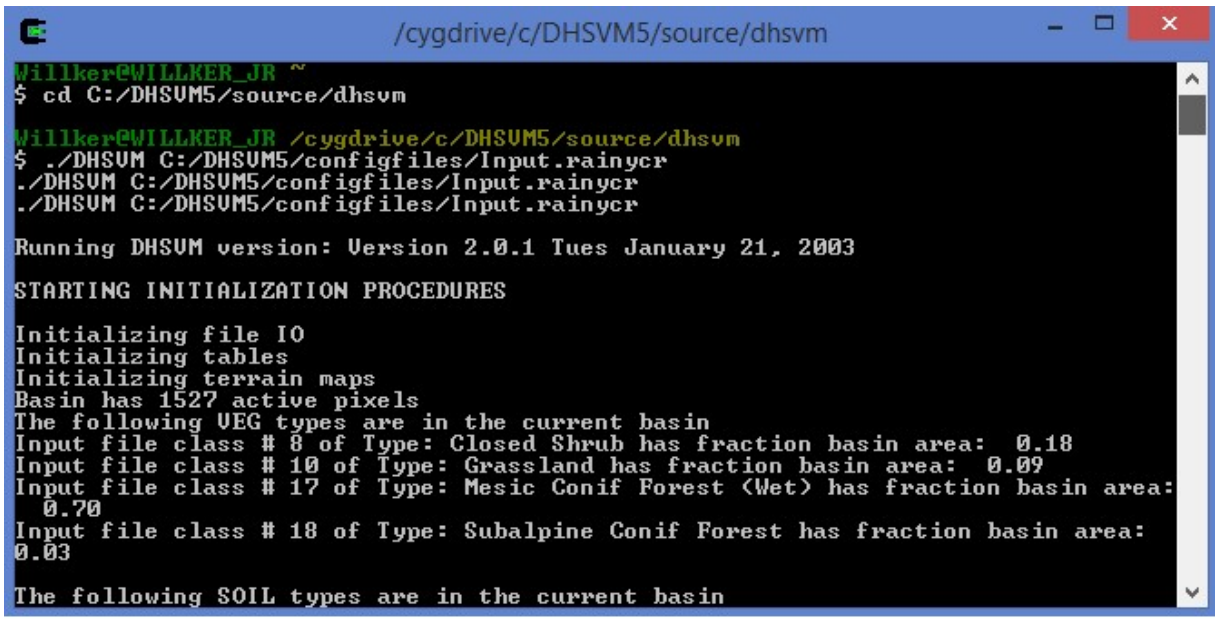
cd .../dhsvm/source/dhsvm

Uma vez nesta pasta, deve-se digitar a seguinte linha de comandos para executar o modelo:

./DHSVM .../dhsvm/configfiles/Input.rainycr

Onde a primeira parte representa o executável do DHSVM, e a segunda parte representa a localização do arquivo de configuração de execução e dados que alimentam o modelo (Figura 16).

Figura 16 - Execução DHSVM



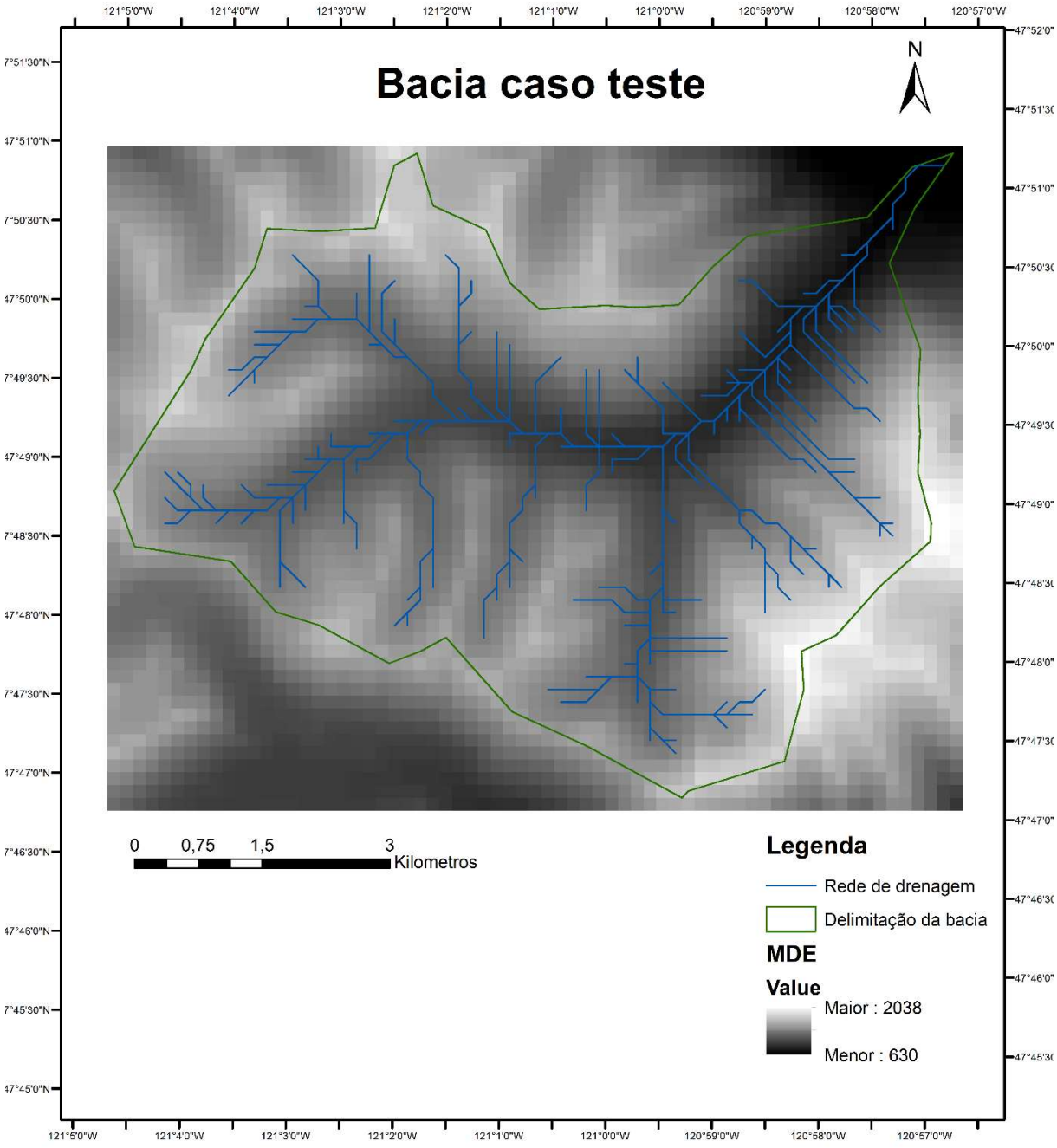
4.2 Análise exploratória

4.2.1 Processamento do caso-teste do DHSVM

Na pasta TESTE está localizado o caso teste do DHSVM implementado. Ao realizar o *download* do DHSVM, observa-se que o mesmo é acompanhado de alguns dados para alimentação do modelo para que o usuário possa realizar simulações-teste e se familiarizar com o modelo. A Figura 17 apresenta o mapa da bacia-teste, com a delimitação e rede de drenagem geradas na implementação do caso-teste. A área calculada foi de 43,94 km². Observa-se pelo modelo digital de elevação que se trata de uma bacia montanhosa pela amplitude de variação de altitudes existentes no

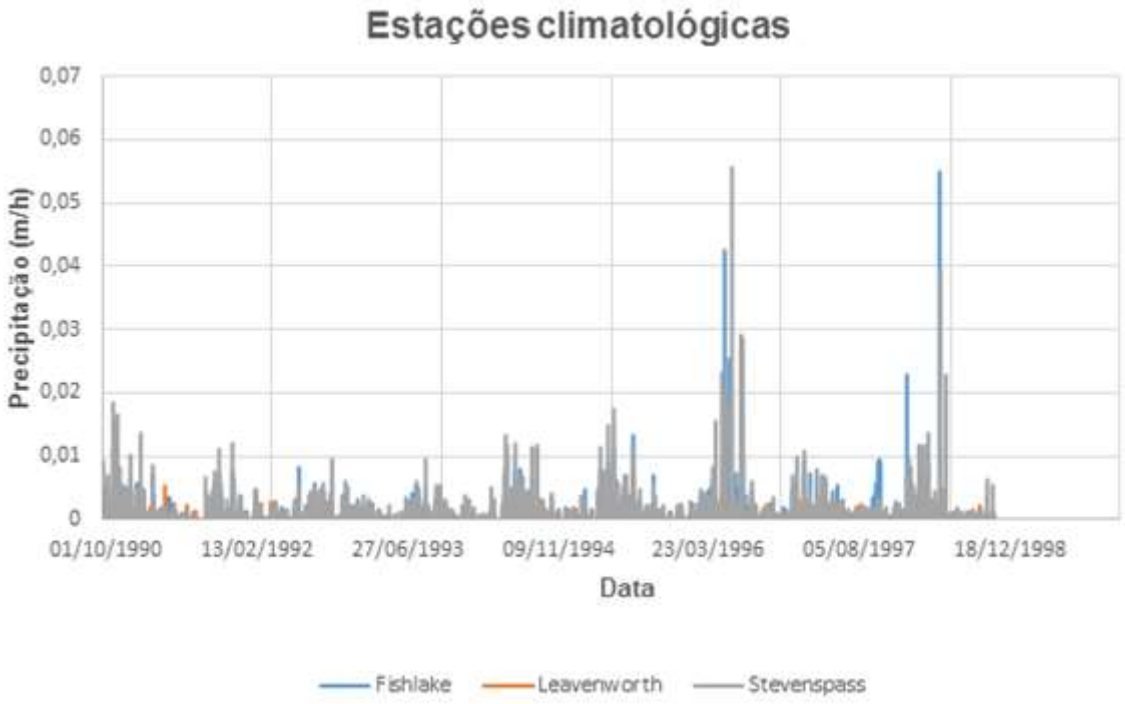
mapa. Estas bacias fornecidas junto ao DHSVM são localizadas na região noroeste dos Estados Unidos, área montanhosa e com os índices pluviométricos anuais médios variando entre 1552 mm para estação de *Fishlake*, 452 mm para estação de *Leavenworth* e 2063 mm para a estação de *Stevenspass*.

Figura 17 - Mapa da bacia hidrográfica do caso- teste



Na Figura 18 são apresentadas as três séries de precipitação disponibilizadas para processamento do caso-teste. Os demais dados meteorológicos também estão disponíveis.

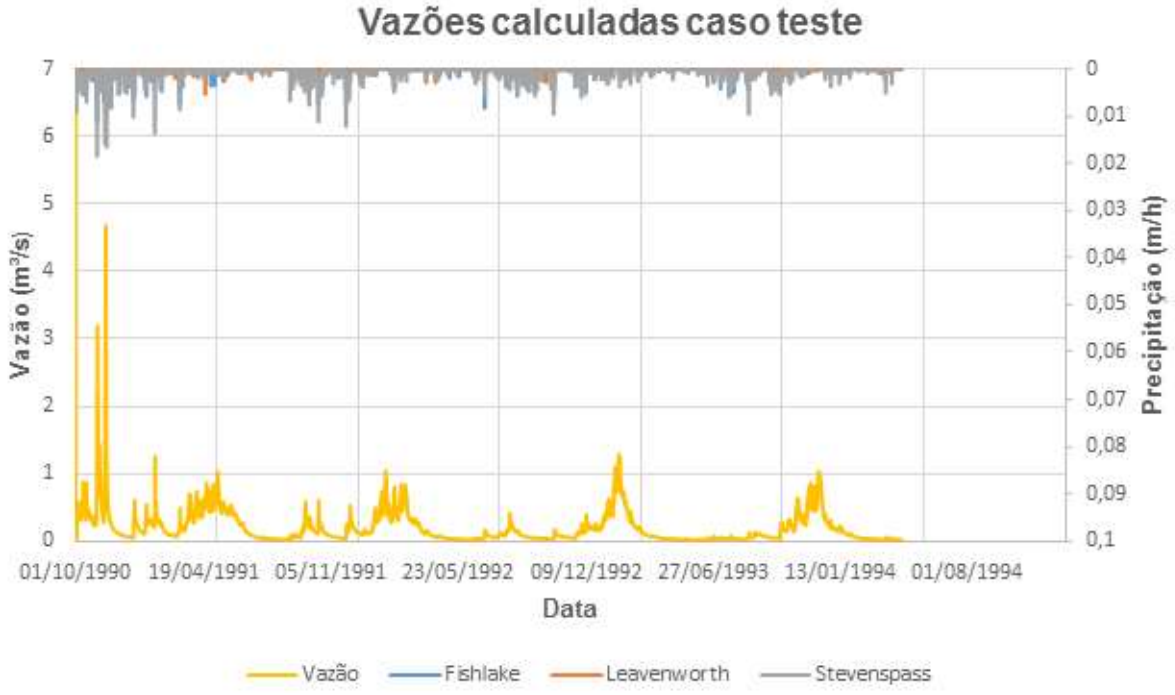
Figura 18 - Precipitações caso teste



Na Figura 19 são apresentadas as vazões calculadas para o caso-teste do DHSVM. O período simulado foi de 01/10/1990 até 01/10/1994 como sugerido pela comunidade dos fóruns de apoio do DHSVM. Embora existam dados disponíveis até o ano de 1999 no pacote de teste, o período escolhido é suficiente para realizar todos os testes necessários nesta etapa, resultando em maior agilidade uma vez que o DHSVM leva algum tempo para executar (em torno de 15 minutos em uma máquina com processador I7, por ano, com passo de tempo horário). É importante ressaltar que nesta fase o objetivo era de familiarização com o modelo DHSVM, identificando arquivos e *softwares*, dados e formatos de entrada para implementação e execução do modelo. No caso teste não estão incluídas séries de vazões observadas. Sendo portando possível apenas analisar os valores calculados. Conforme esperado, a resposta dos picos neste hidrograma de vazões se dão logo

após os períodos de precipitação. Sugerindo um tempo de concentração da bacia um pouco maior do que 3 horas (passo de tempo utilizado).

Figura 19 - Hidrograma de vazões do caso-teste do DHSVM



A execução do caso-teste de acordo com o esperado permitiu a validação do processo de implementação do modelo DHSVM

4.2.2 Preparação e análise da base de dados da micro-bacia no Rio Sacarrão

Além das pastas anteriores, foram criadas as pastas:

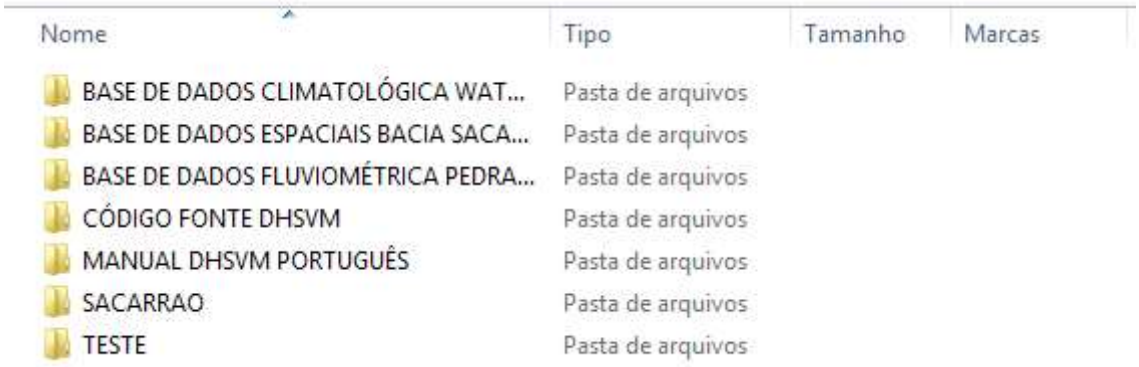
- BASE DE DADOS CLIMATOLÓGICA WATER PLANET – Nesta pasta estão localizados todos os registros da estação climatológica, para os anos de 2008 a 2014 com intervalo de 5 minutos, uma tabela modelo do Microsoft Excel para realizar a conversão dos dados para intervalos horários e o histograma de dados.
- BASE DE DADOS ESPACIAIS SACARRÃO – Nesta pasta estão localizados todos os dados espaciais da Bacia, todos devidamente projetados em SAD 69. Estas informações geográficas incluem curvas de nível, levantamento da cobertura do solo, rede de drenagem, Rede

Triangular Irregular, Modelo Digital de Elevação, mapa profundidade dos solos, mapa tipo de solo com afloramentos rochosos e matacões e a delimitação da bacia.

- BASE DE DADOS FLUVIOMÉTRICA PEDRA BRANCA – Nesta pasta estão localizados todos os registros da estação fluviométrica localizada dentro do Parque Estadual da Pedra Branca, para os anos de 2008 a 2014, com intervalo de 5 minutos, uma tabela modelo do Microsoft Excel para realizar a conversão dos dados para intervalos horários e o histograma de dados.
- MANUAL DHSVM PORTUGUÊS – Nesta pasta está localizado o manual produzido em português implementação e operação do modelo, contida no Apêndice A.
- SACARRAO – Nesta pasta está localizado o DHSVM implementado para a micro bacia do Sacarrão.

Assim, de forma consolidada, o diretório criado para implementação do DHSVM e suas pastas é apresentado na Figura 20.

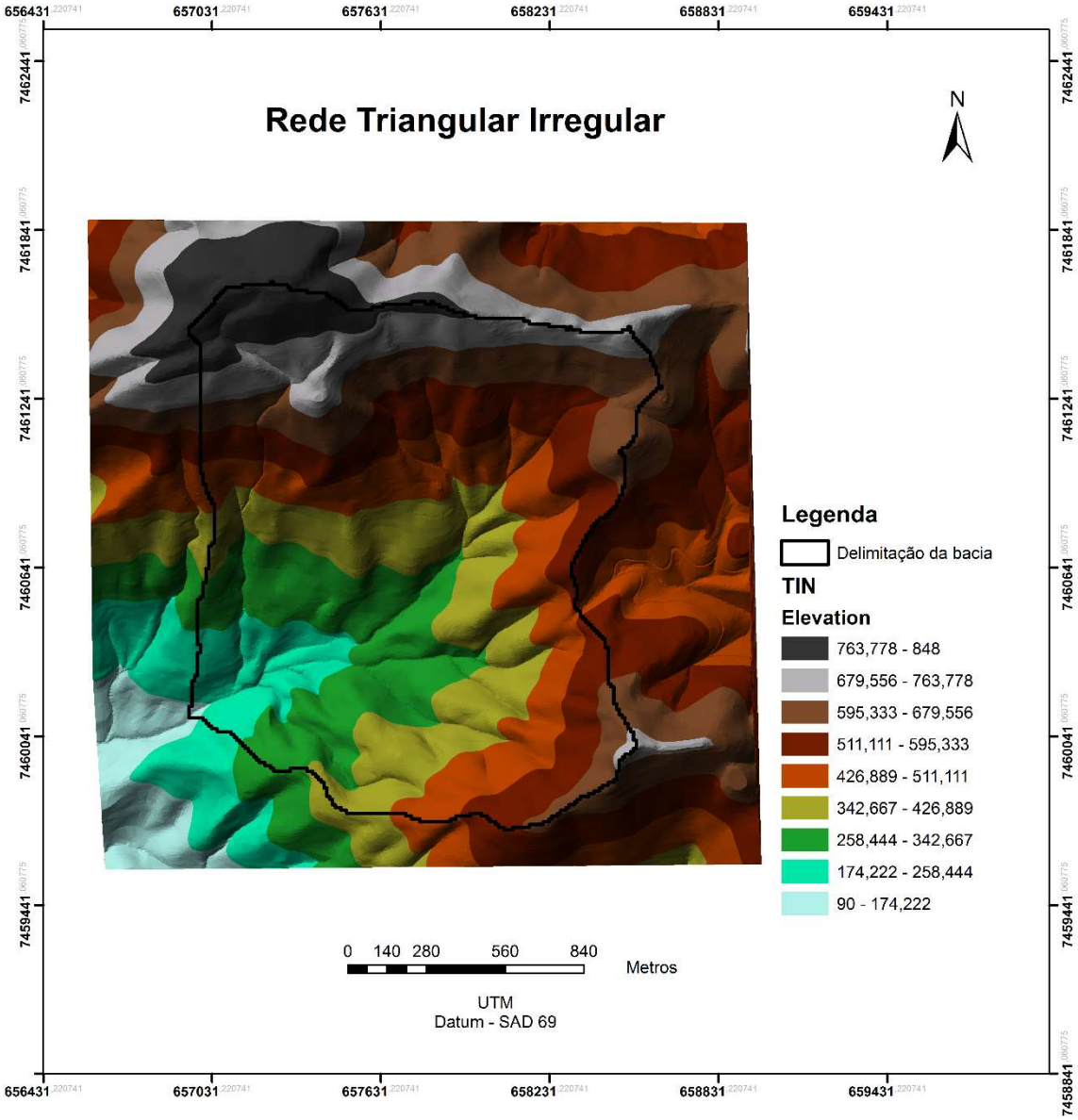
Figura 20- Diretório implementação DHSVM



4.2.2.1 Dados espaciais

Os dados espaciais (mapas) foram organizados em arquivos com 239 linhas, 231 colunas e um tamanho de célula de 10 m. Na Figura 21 é apresentado o MDT obtido a partir das funções do ArcHydro.

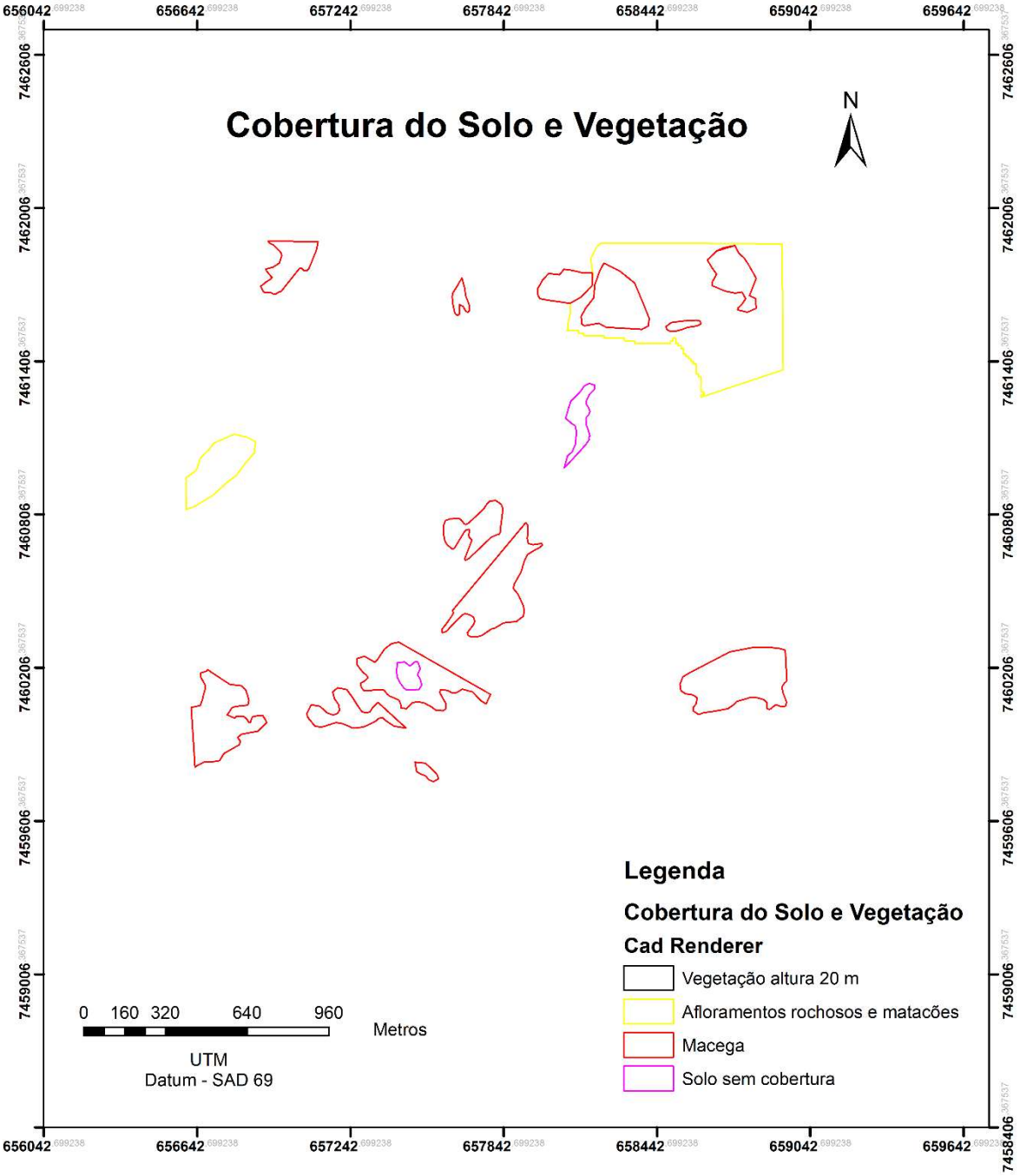
Figura 21 - Modelo Digital do Terreno (MDT) - Rede Triangular Irregular



A maior parte da bacia está localizada entre 174 e 848 m acima do nível do mar, exceto por uma pequena porção no exutório, onde está localizada a estação fluviométrica, que está na faixa dos 90 a 174 m. Isto indica que praticamente toda a bacia está localizada dentro dos limites definidos pela lei para o Parque Estadual da Pedra Branca.

Para criação do mapa de cobertura de solo e vegetação tomou-se como base os afloramentos rochosos e matacões locados no mapa de solos. Considerou-se ainda as regiões de macega, mata e solo sem cobertura, localizadas conforme arquivo gerado em levantamento "*in situ*" e reconstituição das cartas na escala 1/5.000 por estereoscopia, realizado pelo grupo HIDROCIDADES (Figuras 22 e 23).

Figura 22 - Levantamento Cobertura do Solo

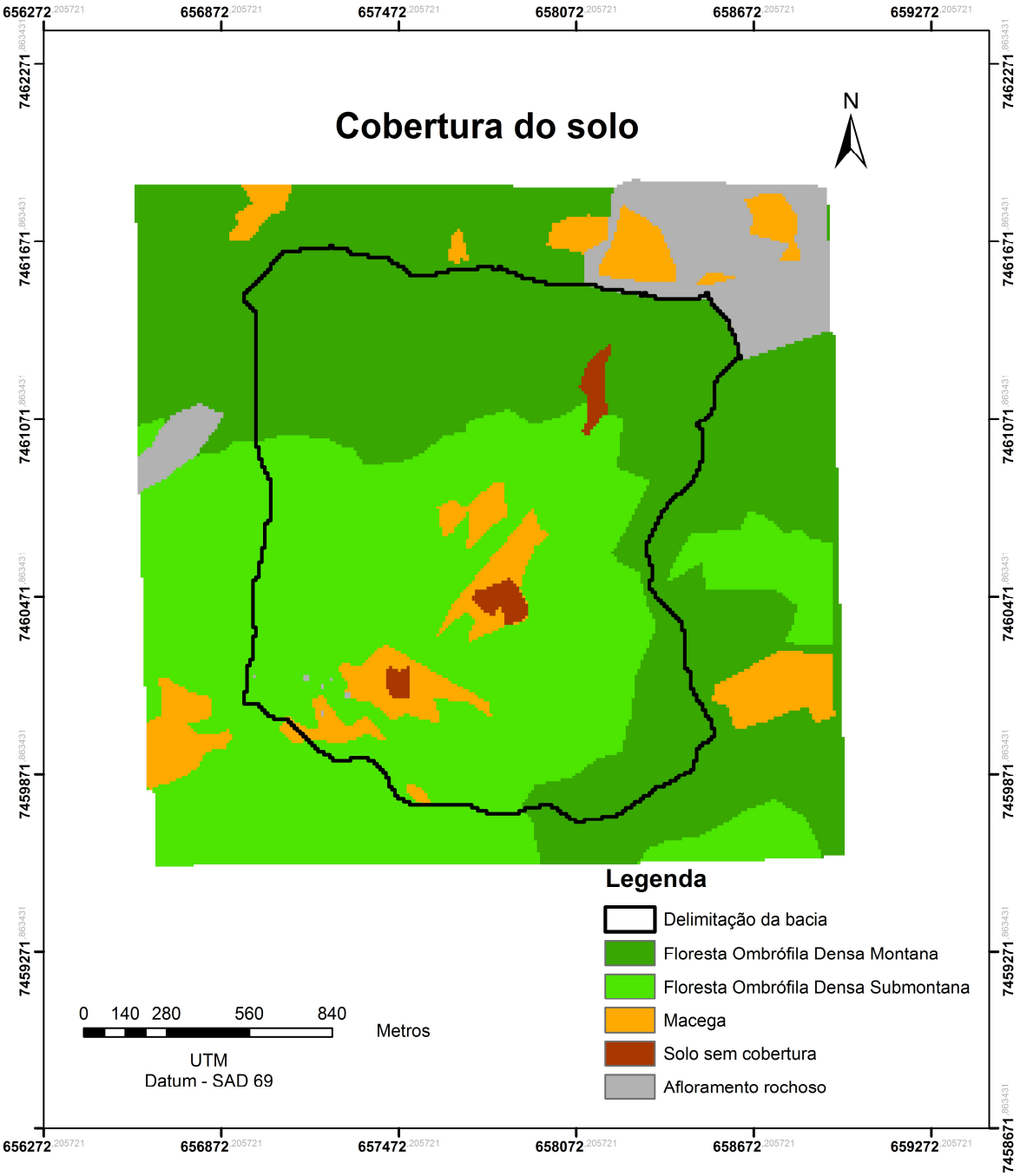


Estes polígonos foram geo-processados considerando o MDT, para regiões de mata com altitudes entre foi considerada Floresta Ombrófila Densa Submontana e para regiões de mata com altitudes entre foi considerada Floresta Ombrófila Densa Montana. Depois os polígonos foram transformados em formato matricial (*Raster*) e atribuídos os seguintes códigos (Quadro 9).

Quadro 9 - Códigos Raster Cobertura do Solo

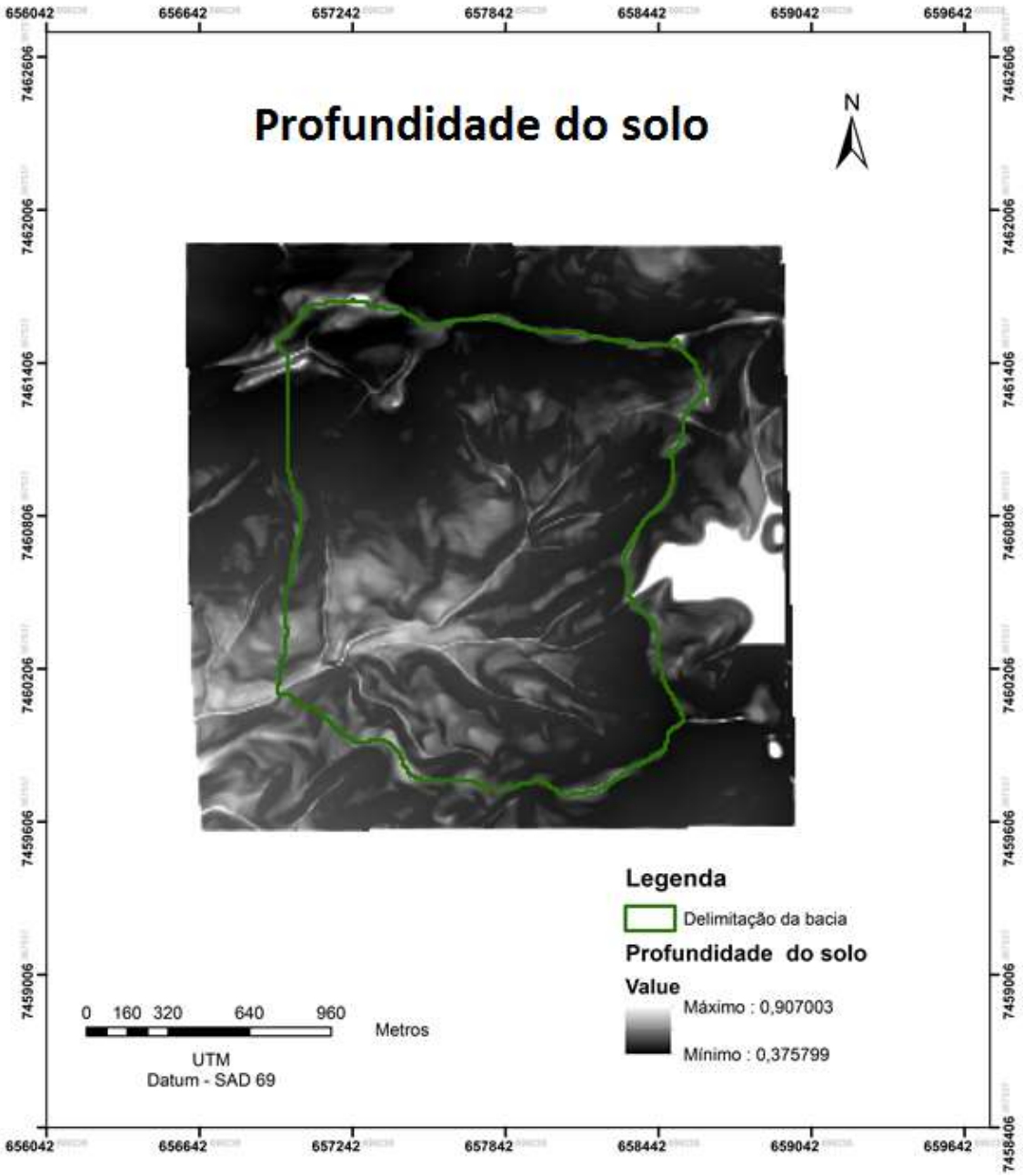
Cobertura do solo	**Código de classificação**
Floresta Ombrófila Densa Submontana	1
Floresta Ombrófila Densa Montana	2
Macega	10
Afloramento rochoso	12

Figura 23 - Cobertura do solo



Para gerar o mapa de profundidade do solo foram utilizados os *scripts AML* do DHSVM, considerando como profundidade máxima 1,5 m e profundidade mínima 0,30 m. (Figura 24)

Figura 24 - Profundidade solo

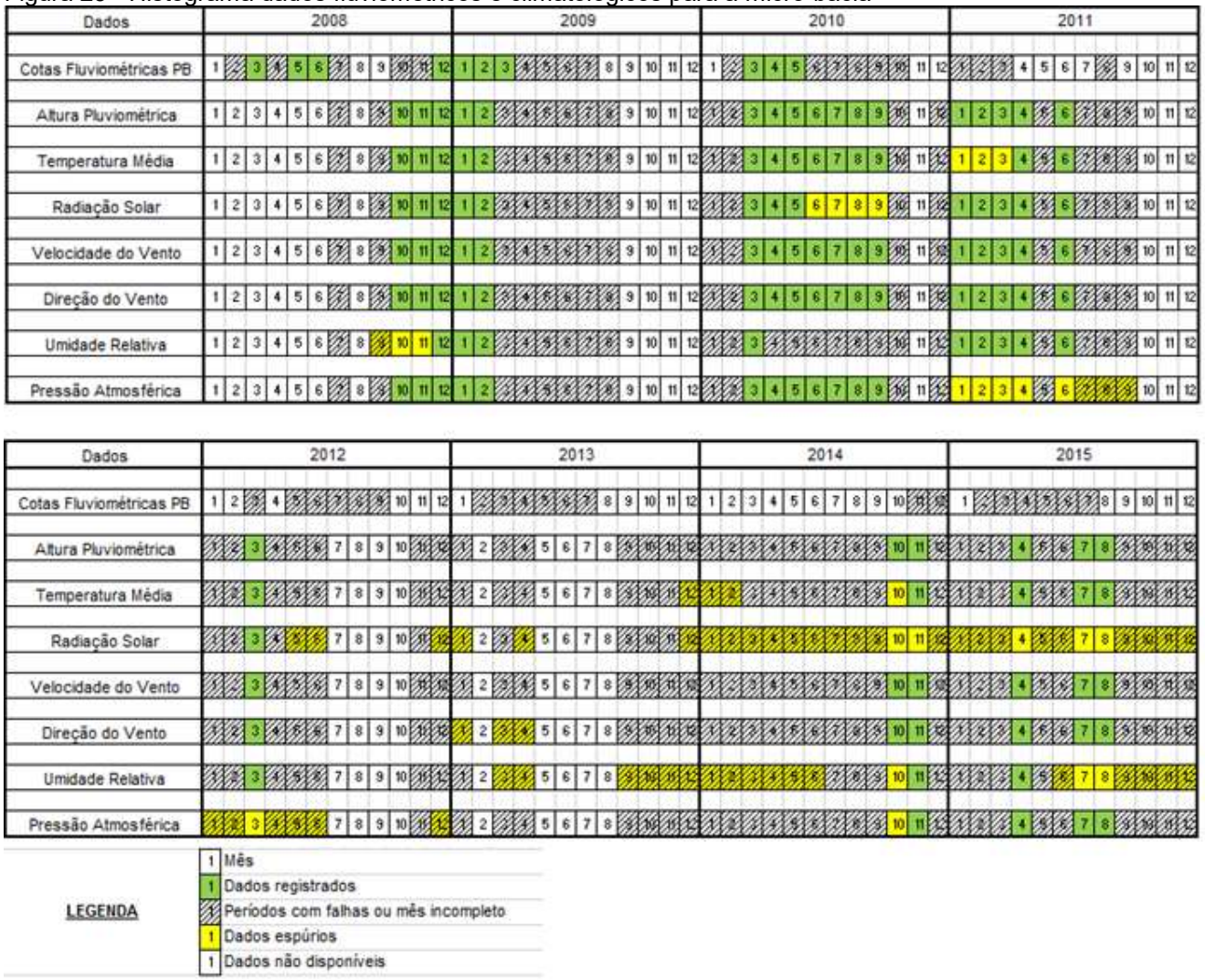


4.2.2.2 Séries temporais

A Figura 25 apresenta o histograma de dados fluviométricos e climatológicos. Foram selecionados para os estudos o ano de 2010 para a análise exploratória e estudo de sensibilidade dos parâmetros do modelo; eventos nos anos de 2008 e 2009, para estudos iniciais de calibração e ajuste dos parâmetros do modelo. Mesmo constituindo período consistente de dados, foram observadas algumas falhas nos dados climatológicos. Nesses casos foram adotadas como estações de apoio para

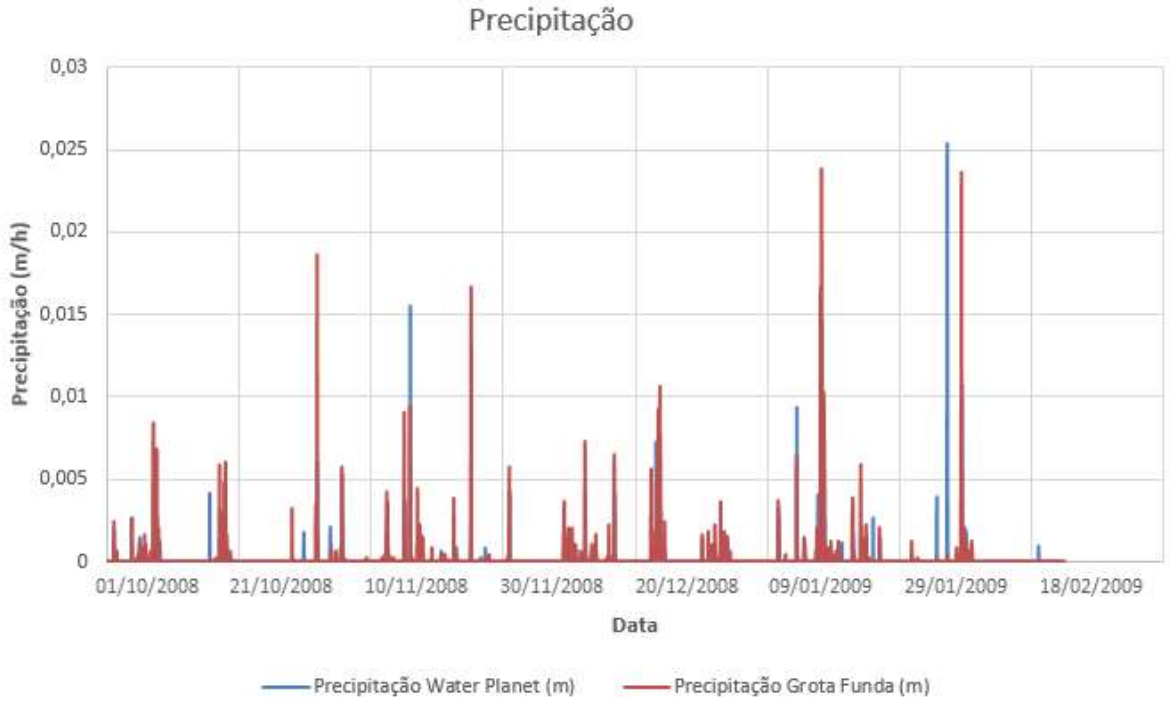
dados pluviométricos nos anos de 2008 e 2009, a estação pluviométrica da Rede Alerta Rio “Grota Funda”, à época locada em elevação mais próxima da elevação média da micro-bacia, e o posto do Rio Centro para o ano de 2010. A Figura 26 apresenta as alturas pluviométricas para as estações Grota Funda e *Water Planet* (Projeto HIDROCIDADES) para os anos de 2008 e 2009. Para o preenchimento de falhas em outros dados climatológicos, sobretudo de umidade relativa, foi utilizada como apoio a estação automática do INMET de Marambaia.

Figura 25 - Histograma dados fluviométricos e climatológicos para a micro-bacia



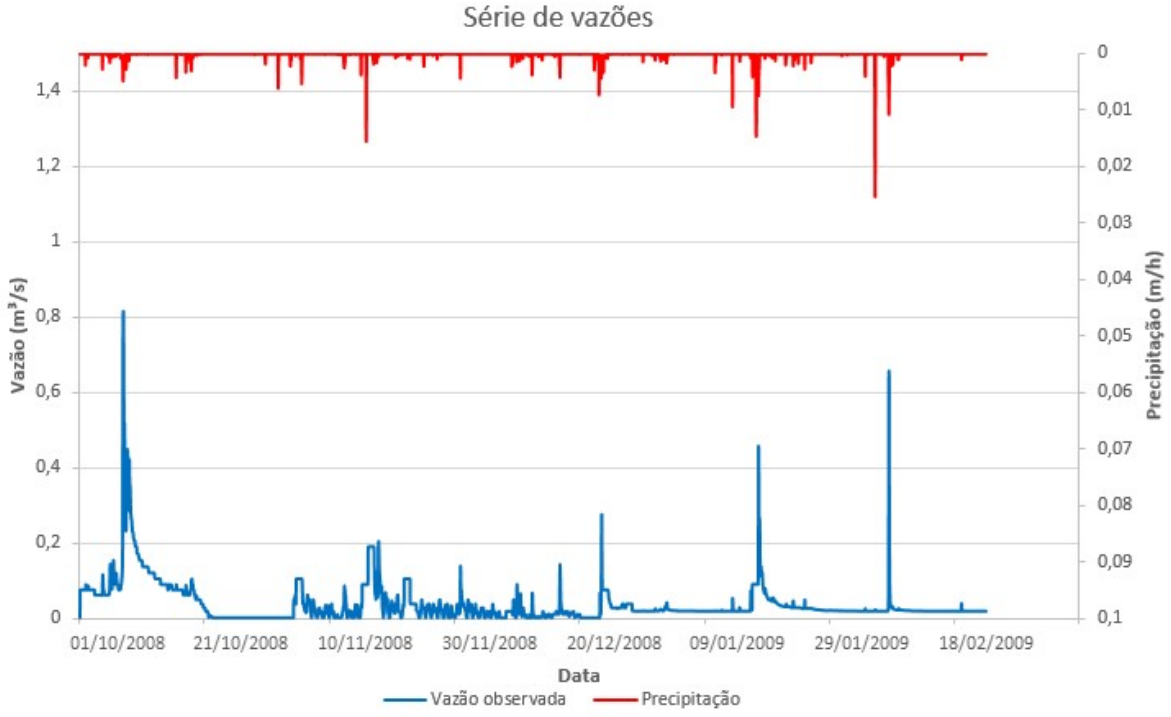
.

Figura 26 - Precipitação Water Planet x Grota Funda



A Figura 27 apresenta a série de vazões observadas para o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009. Observa-se que no início do hidrograma ocorre um evento de cheia aparentemente sem precipitação expressiva. Durante levantamentos locais, tem-se observado a ocorrência de algumas chuvas somente no alto do parque. Observa-se neste hidrograma de vazões que nas cheias mais expressivas as vazões ultrapassam 0,2 m³/s (200 L/s), chegando a atingir até 0,8 m³/s (800 L/s). O escoamento de base fica em torno de 0,05 m³/s (50 L/s). Os dados de campo revelam ainda a perenidade deste curso d'água, pois o vertedouro nunca secou durante as visitas do grupo HIDROCIDADES ao local. Foi observado que mesmo em períodos secos havia um escoamento no vertedouro com uma lâmina de 1 mm.

Figura 27 - Vazões observadas período outubro 2008 - fevereiro 2009



4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros do DHSVM

Na análise de sensibilidade adotaram-se dois períodos: o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009 (pelo fato deste período possuir boa consistência de dados fluviométricos observados) e o ano de 2010 completo (pois este é o melhor ano em

termo de dados climatológicos), e foram simuladas as vazões considerando os dados apropriados para a a micro-bacia no Rio Sacarrão. Os resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo para os ajustes considerando a faixa de variação entre -20% e + 20% para o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009 são ilustrados graficamente nas figuras 28 a 33. Neste período de estudo o foco foram os hidrogramas a fim de observar a dinâmica das vazões para futuras calibrações utilizando os dados observados disponíveis

Para o parâmetro da taxa de infiltração máxima não foram observadas alterações significativas no hidrograma (Figura 28). Mesmo quando se aplica uma escala detalhada (Figura 29) as variações são quase que imperceptíveis.

Figura 28 - Hidrograma Taxa de Infiltração Máxima variação entre -20 % e + 20 %

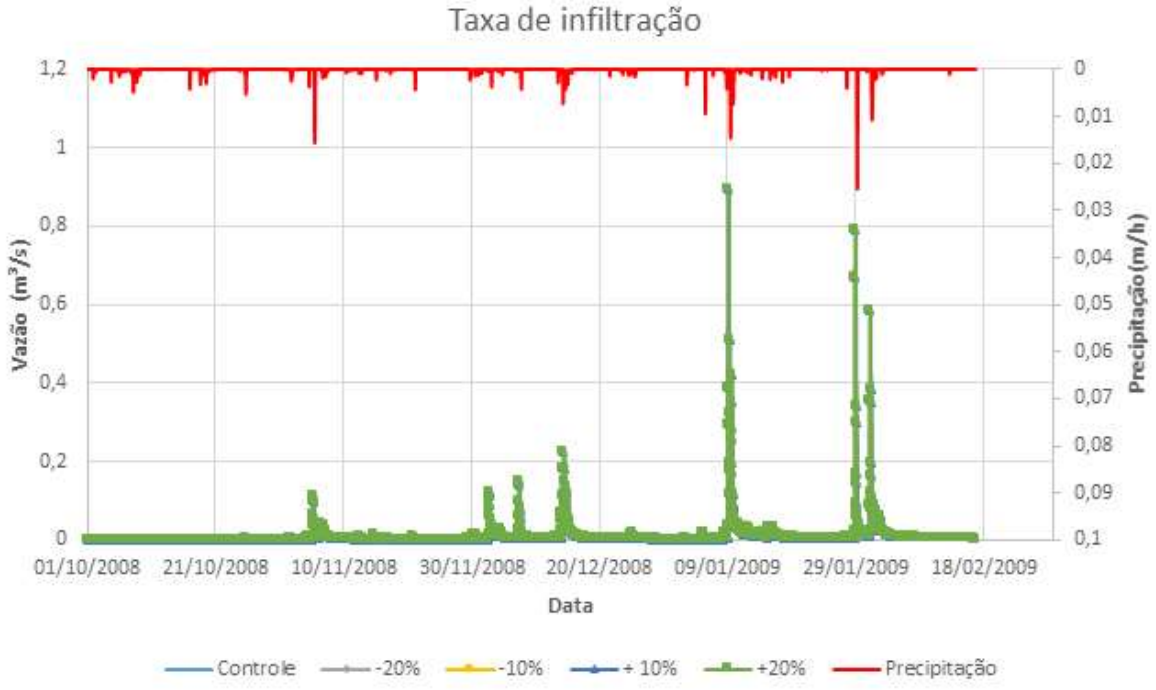
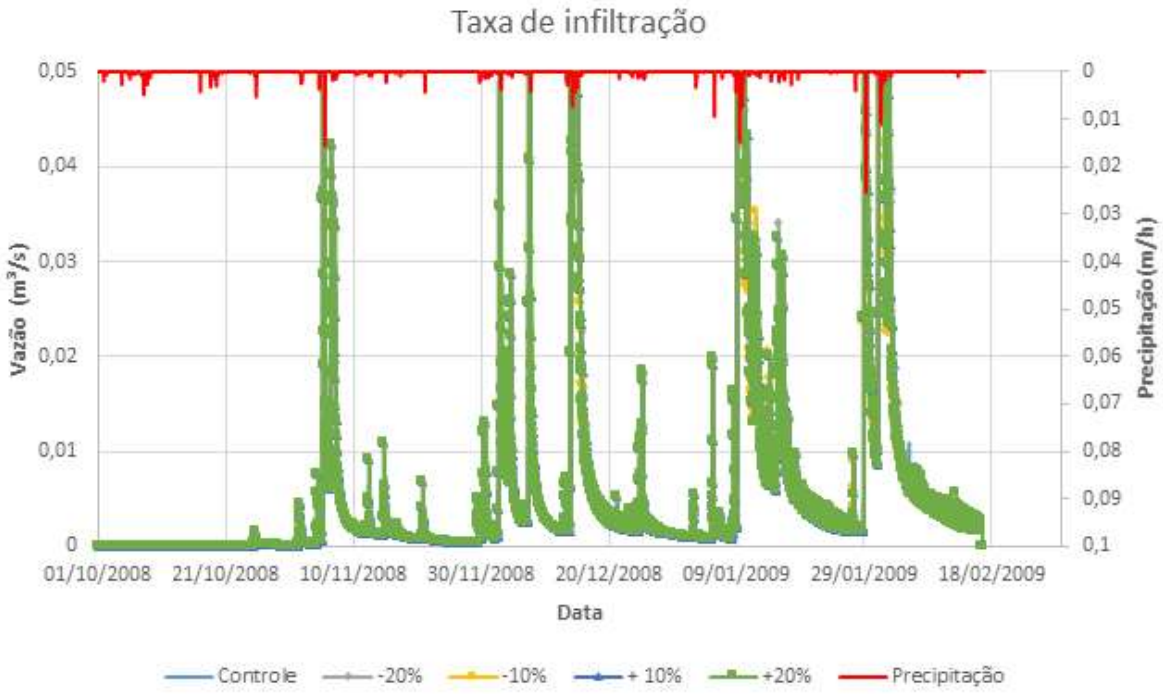


Figura 29 - Hidrograma Taxa de Infiltração Máxima variação entre -20 % e + 20 % (Escala Detalhada)



Para as simulações com o coeficiente de decaimento exponencial observa-se pequenas variações no que tange a magnitude dos picos. Em geral os ao diminuir o valor do coeficiente de decaimento exponencial os picos aumentaram de magnitude. Existe uma tendência do valor de – 10% se aproximar do valor de -20% em picos de magnitudes menores, porém quando os eventos são mais extremos a simulação com o parâmetro -20% ganha destaque. Da mesma forma como há uma tendência dos valores de +10% e +20% se aproximarem nos picos mais discretos e se afastarem para os valores de alta com a alteração de +20% tomando os menores valores para o pico nas simulações. (Figuras 30 e 31)

Figura 30 - Hidrograma Coeficiente decaimento exponencial variação entre -20 % e + 20 %

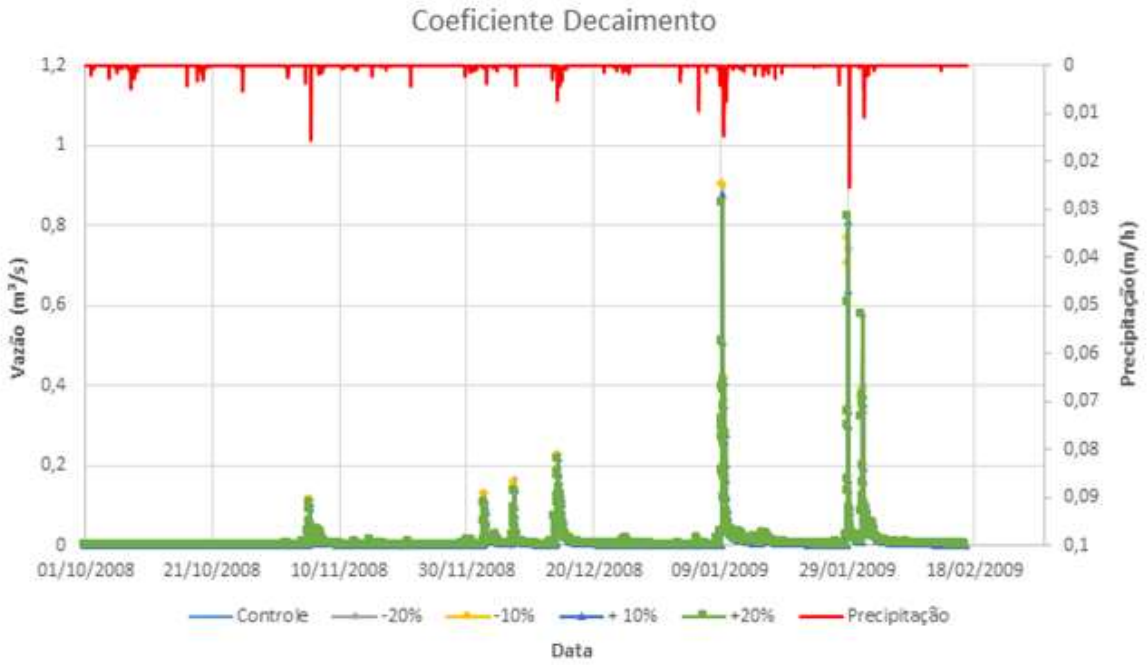
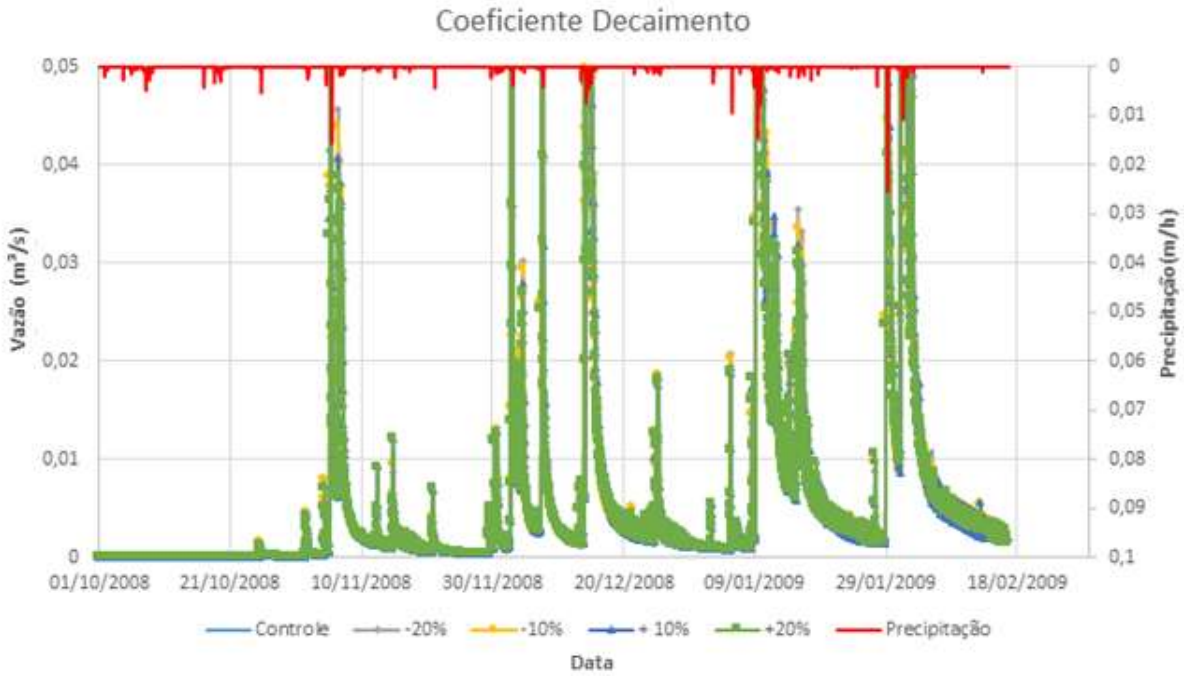


Figura 31 - Hidrograma Coeficiente decaimento exponencial variação entre -20 % e + 20 %



Para as simulações com a condutividade lateral ocorre um pequeno adiantamento dos picos do hidrograma, o que segue o senso comum, uma vez que esse componente atua na transmissividade do escoamento saturado lateral alimentando célula a célula de acordo com a declividade até atingir os canais. Porém este comportamento só foi observado para a variação de +10% sugerindo um comportamento não linear.(Figuras 32 e 33)

Figura 32 - Hidrograma Condutividade lateral variação entre -20 % e + 20 %

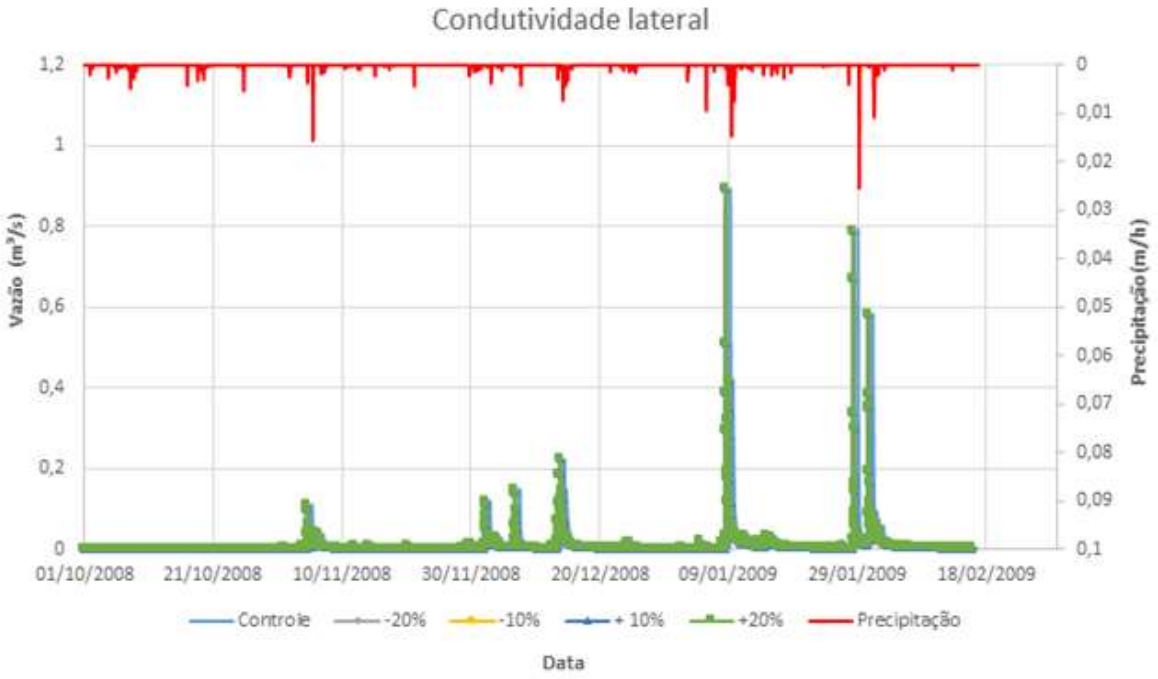
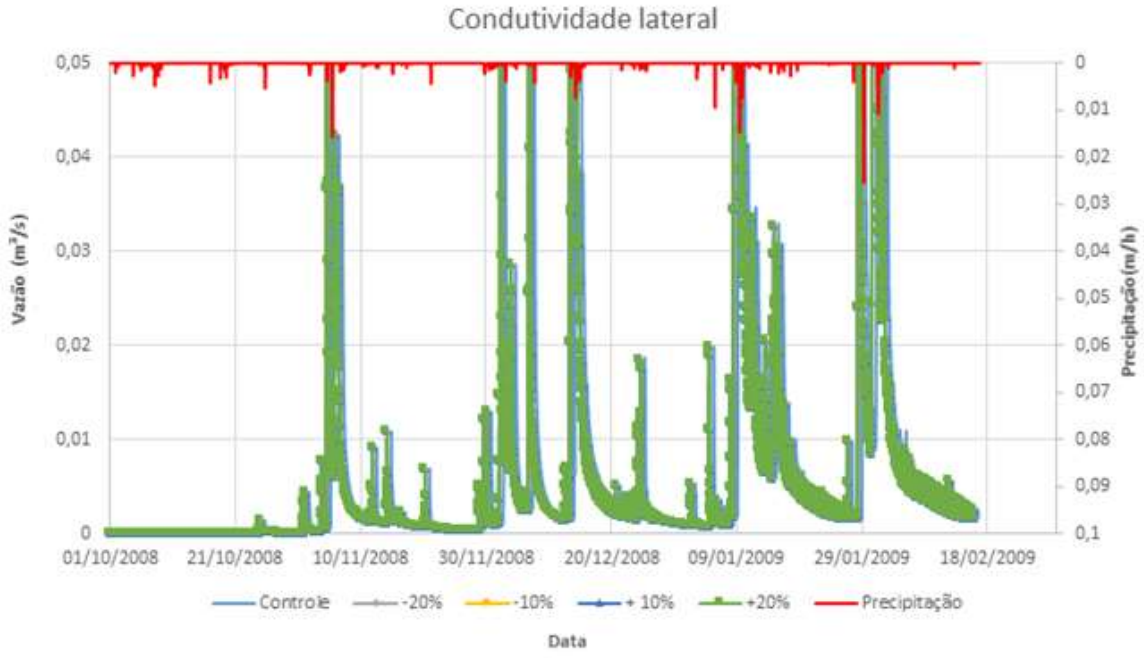


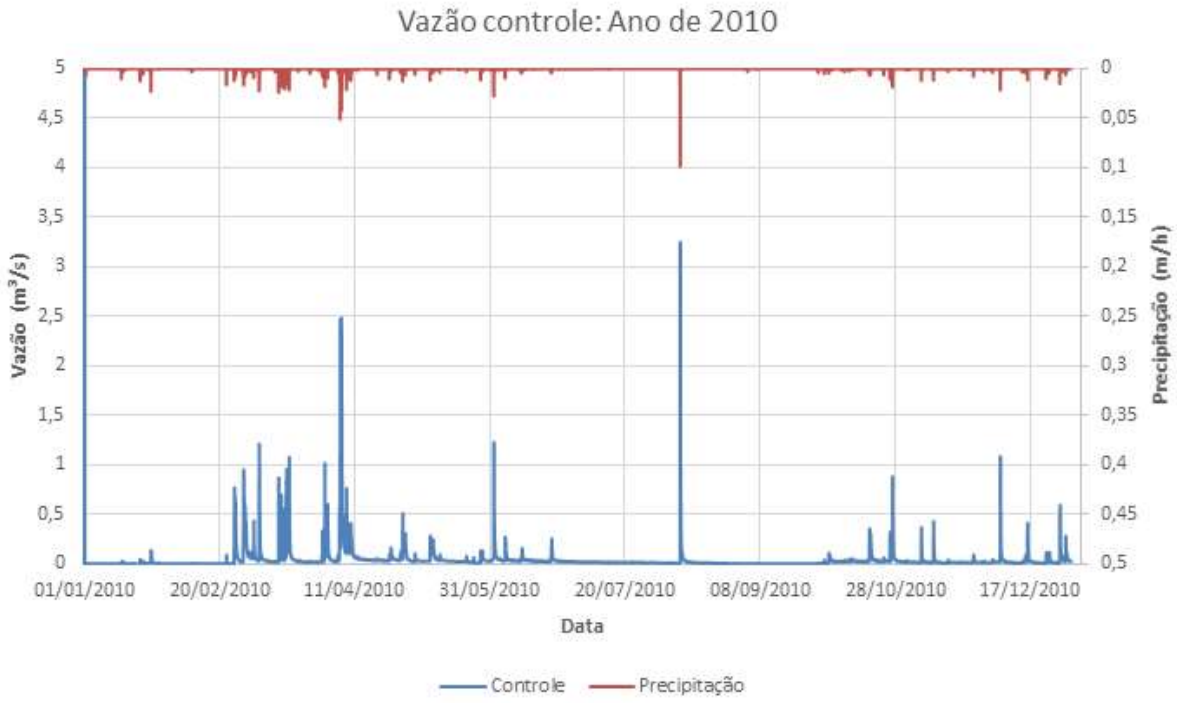
Figura 33 - Hidrograma Condutividade lateral variação entre -20 % e + 20 % (Escala Detalhada)



Os resultados obtidos na análise de sensibilidade do modelo para os ajustes considerando a faixa de variação entre -50% e + 50% são ilustrados graficamente nas figuras X a Y. Para estes parâmetros além da abordagem tradicional do

hidrograma de vazões, optou-se por analisar a evapotranspiração e umidade do solo. Para esta analise se escolheu o período de 2010 por ser o ano mais completo em termos de dados climatológicos permitindo visualizar a dinâmica dos processos hídricos ao longo do ano na bacia. A figura 34 apresenta a vazão controle calculada para o período. Existe uma crítica acerca do valor de precipitação elevado (100 mm em 1 hora) na estação seca entre o final de julho e o início de agosto. Nos históricos de outras estações não foram encontrados nenhuma precipitação desta magnitude para o período. Outro fato é que este valor ultrapassa um evento extremo conhecido deste ano que ocorreu em abril. Por estes motivos acredita-se que se trata de um dado espúrio.

Figura 34 - Hidrograma Controle 2010



Para o parâmetro da taxa de infiltração máxima percebeu-se que para modificações da ordem de 50% para mais e para menos, este já apresenta sensibilidade. Quando os valores da taxa máxima de infiltração foram diminuídos em 50 % ocorreu o aparecimento de alguns picos no hidrograma, gerados pela diminuição da infiltração e consequente aumento do escoamento rápido. (Figuras 35 e 36).

Figura 35 - Hidrograma variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%

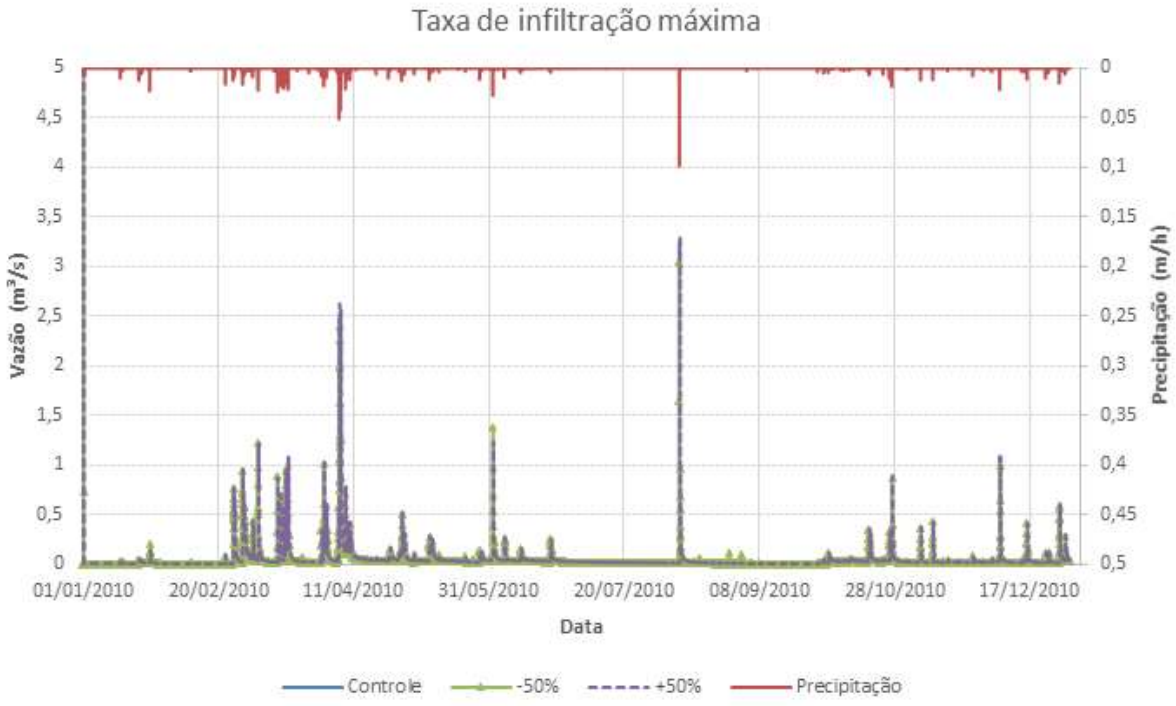
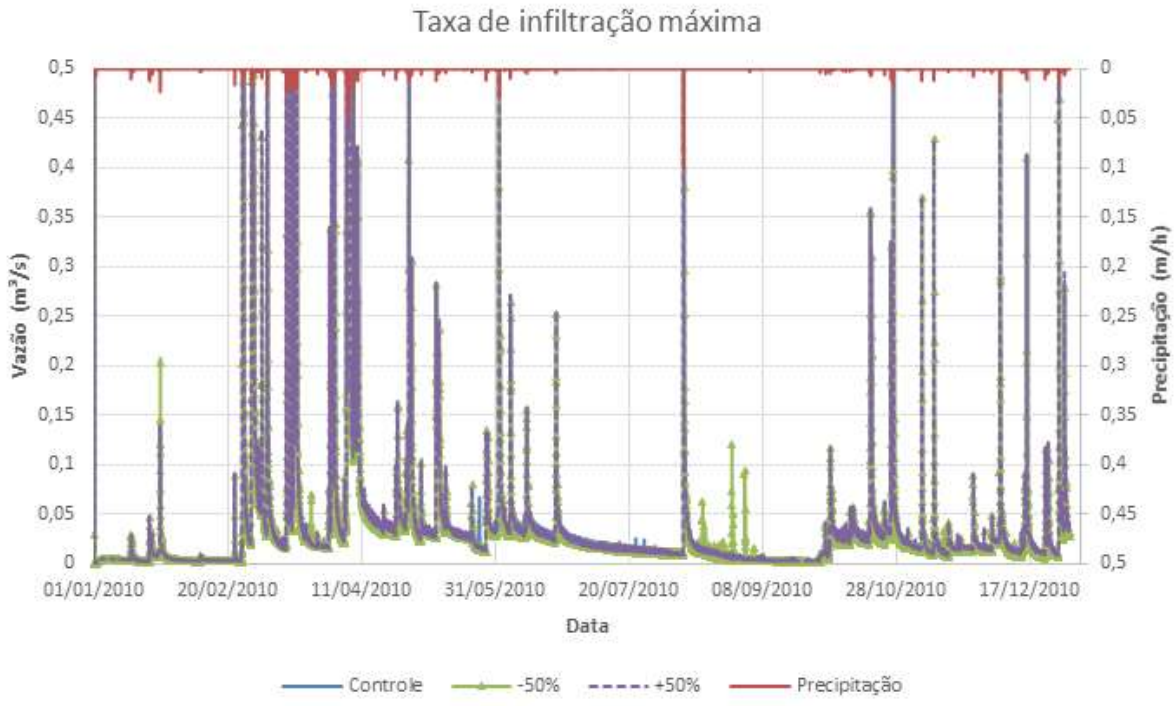


Figura 36 - Hidrograma Detalhado variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%



Não houveram alterações significativas no conteúdo de umidade de nenhuma das 3 camadas do solo como pode ser observado nas figuras 37, 38, e 39

Figura 37 - Umidade do solo na camada superior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%

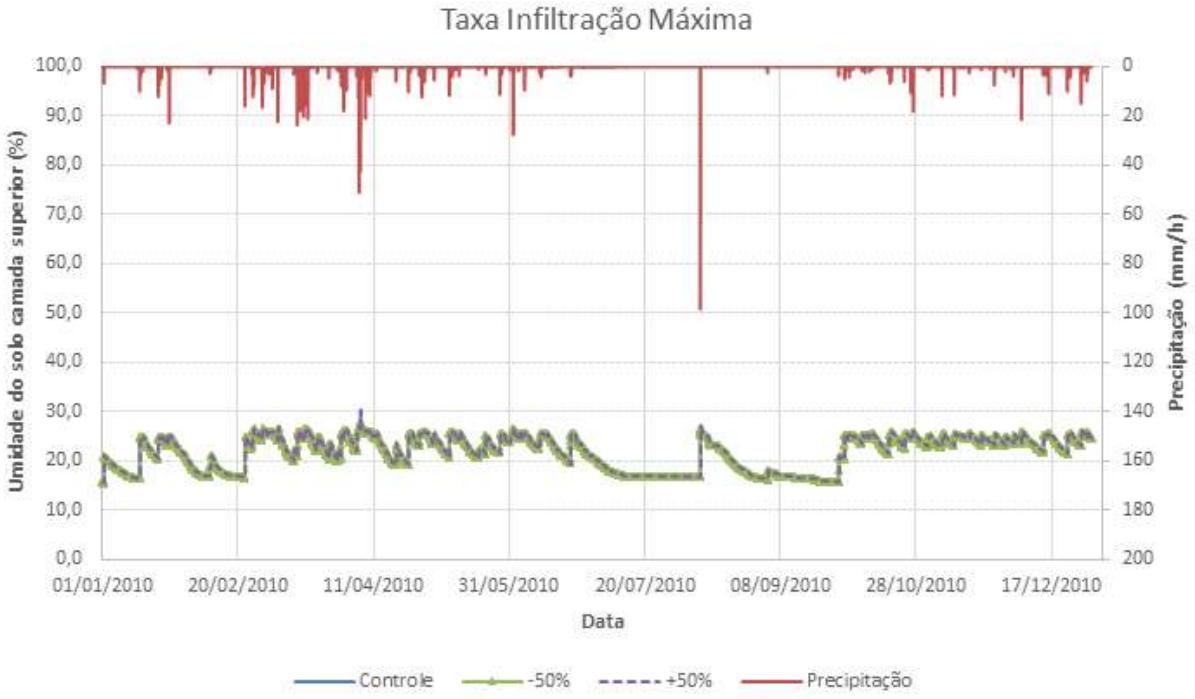


Figura 38 - Umidade do solo na camada superior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%

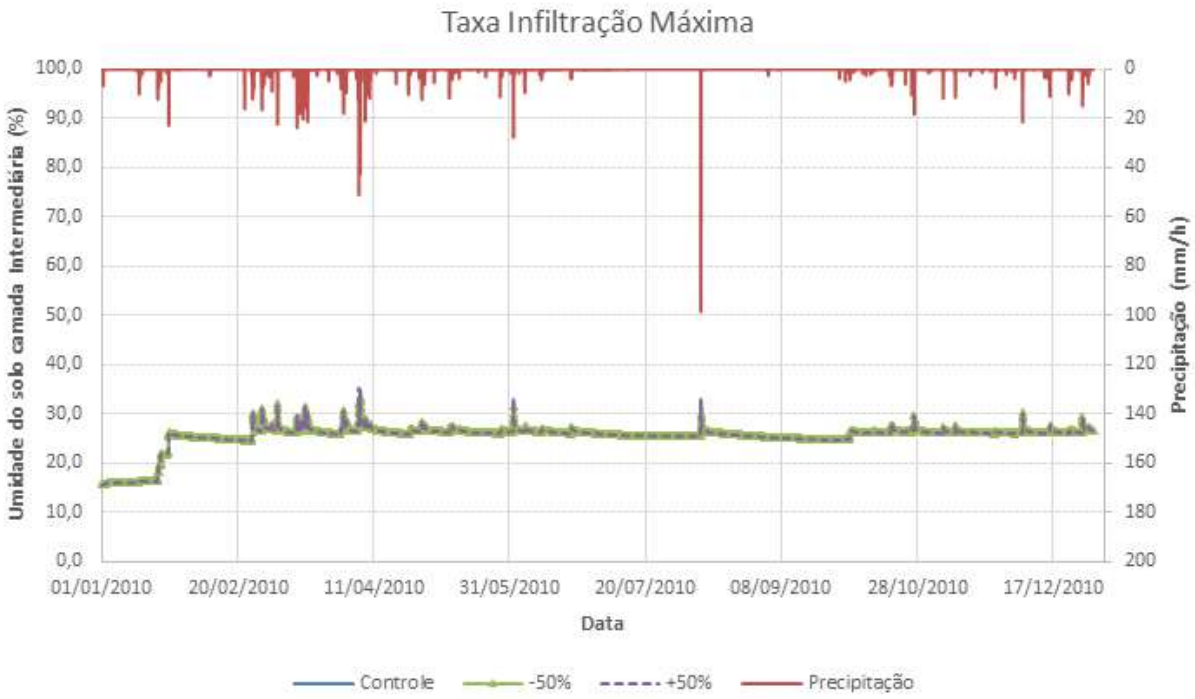
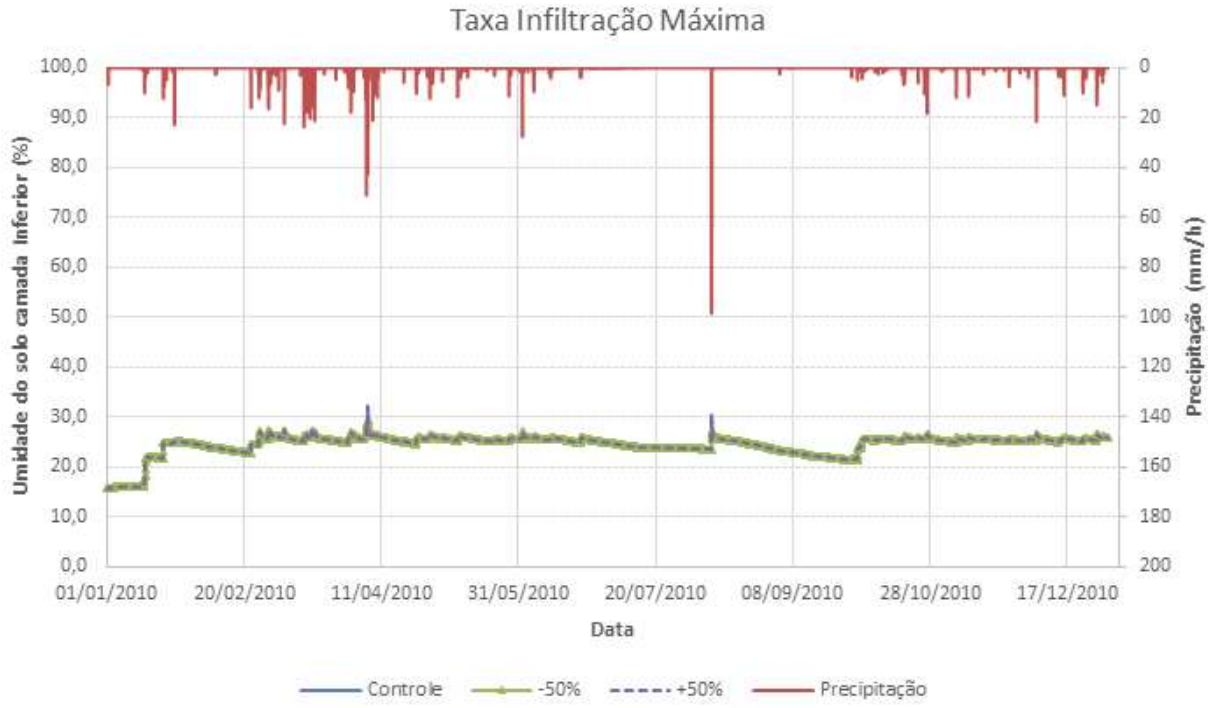
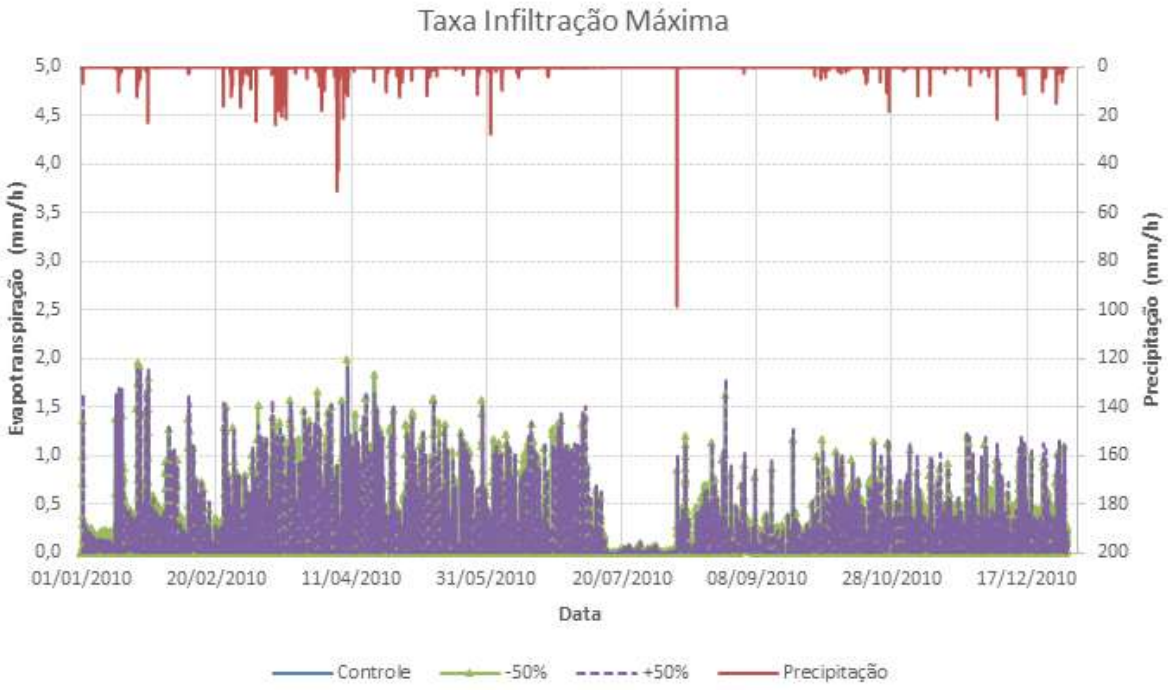


Figura 39- Umidade do solo na camada inferior variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%



Na figura 40 observa-se que a variação de -50% altera a dinâmica da evapotranspiração quando ocorre precipitação. É possível que isto ocorra devido ao fato de existirem superfícies livres na bacia (solo sem cobertura) como mostra a figura 23. Ao diminuir a capacidade de infiltração, durante as precipitações existiria uma reserva extra para sofrer evaporação direta nestas áreas.

Figura 40 – Evapotranspiração variação taxa de infiltração máxima -50 % e +50%



Para o parâmetro do coeficiente de decaimento. Quando os valores do coeficiente de decaimento exponencial foram diminuídos em 50 % ocorreram mudanças na magnitude dos picos no hidrograma. Diferente do parâmetro da taxa de infiltração máxima onde novos picos foram gerados, neste hidrograma se observa apenas a alteração em sua magnitude. (Figuras 41 e 42).

Figura 41 - Hidrograma variação Decaimento exponencial -50 % e +50%

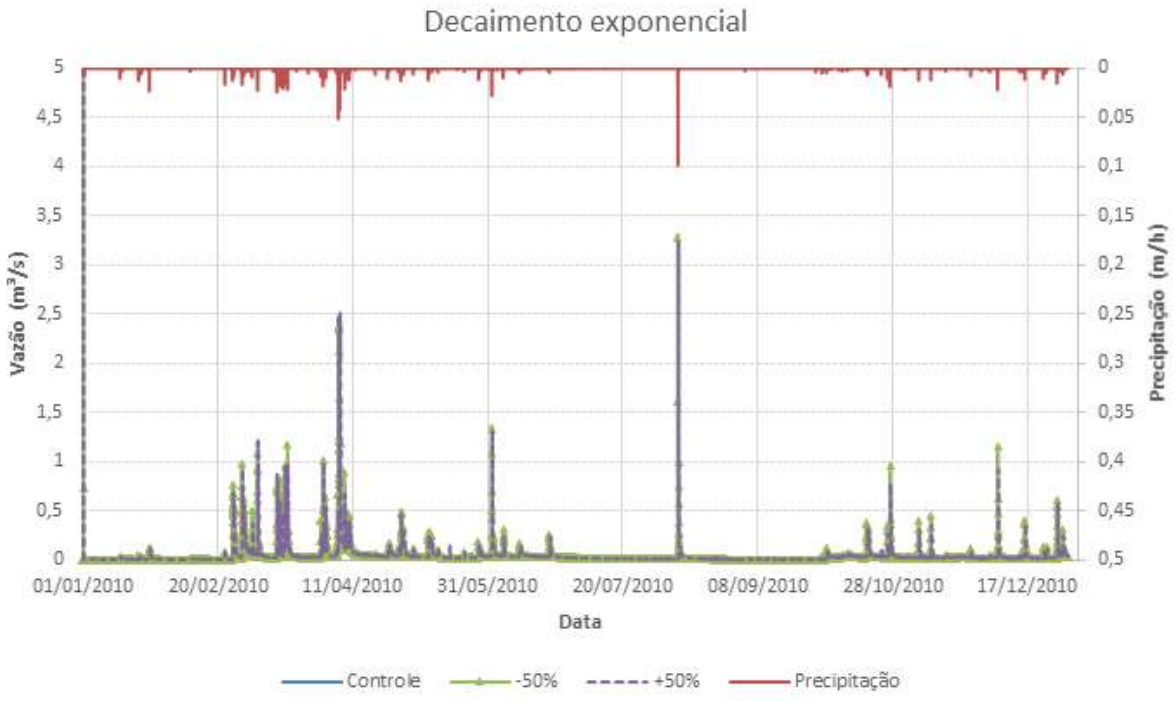
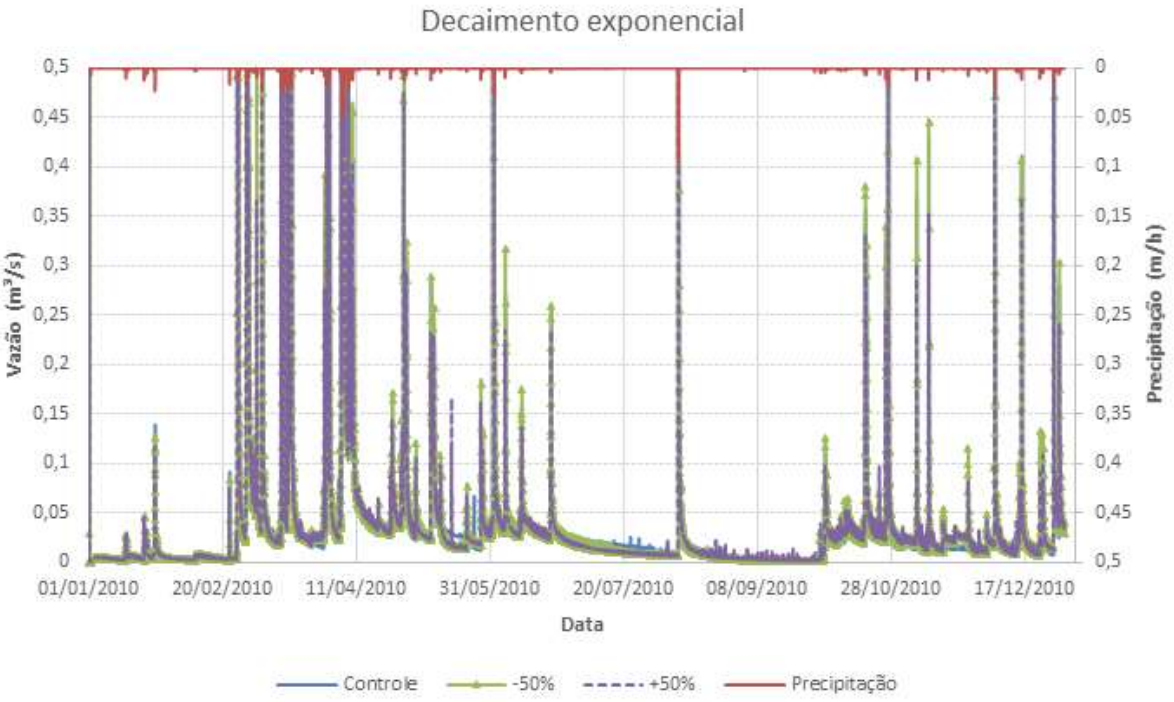


Figura 42 - Hidrograma (Detalhado) variação Decaimento exponencial -50 % e +50%



Não houveram alterações significativas no conteúdo de umidade de nenhuma das 3 camadas do solo como pode ser observado nas figuras 43, 44, e 45.

Figura 43 - Umidade do solo na camada superior variação Decaimento exponencial máxima -50 % e +50%

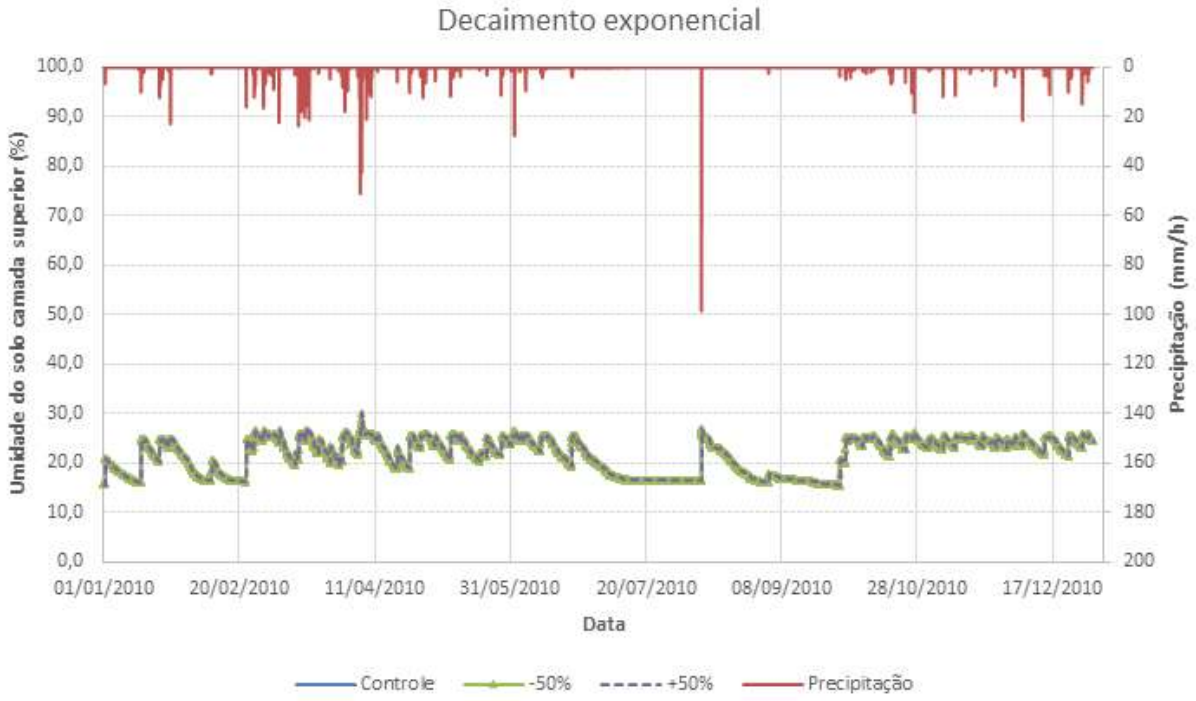
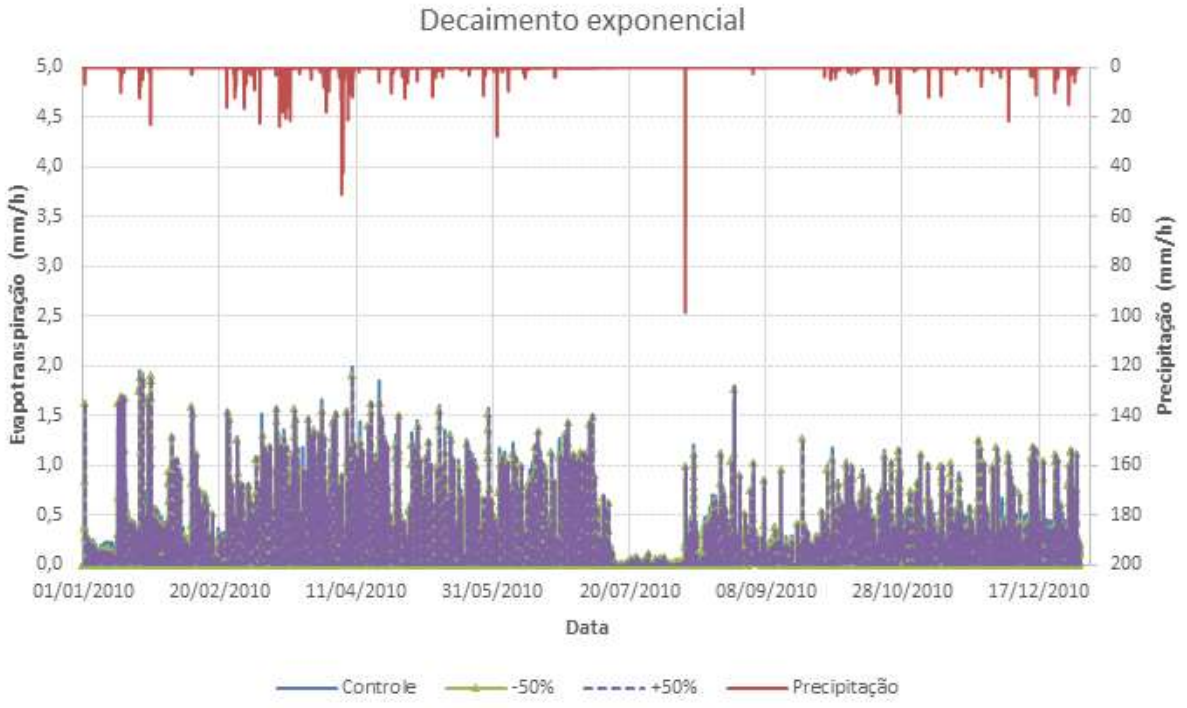


Figura 44 - Umidade do solo na camada intermediária variação Decaimento exponencial -50 % e +50%

Figura 45 - Umidade do solo na camada inferior variação Decaimento exponencial -50 % e +50%

Para a evapotranspiração a sensibilidade deste componente se apresentou bastante não linear, as vezes ambos ficando abaixo do controle e em outras situações acima. (Figura 46).

Figura 46 – Evapotranspiração variação Decaimento exponencial -50 % e +50%



Para as simulações realizadas com variação na condutividade lateral percebe-se na análise detalhada o aparecimento de alguns picos quando a condutividade lateral é reduzida em 50% (Figura 47). O escoamento saturado também se aparenta menor. Isto se deve ao fato deste componente estar intrinsicamente ligado ao escoamento subterrâneo que alimenta os canais. No hidrograma detalhado (Figura 48) observa-se alterações no momento de ocorrência do pico, assim como constatado para a análise com variações entre -20% e +20%.

Figura 47 - Hidrograma variação Condutividade lateral -50 % e +50%

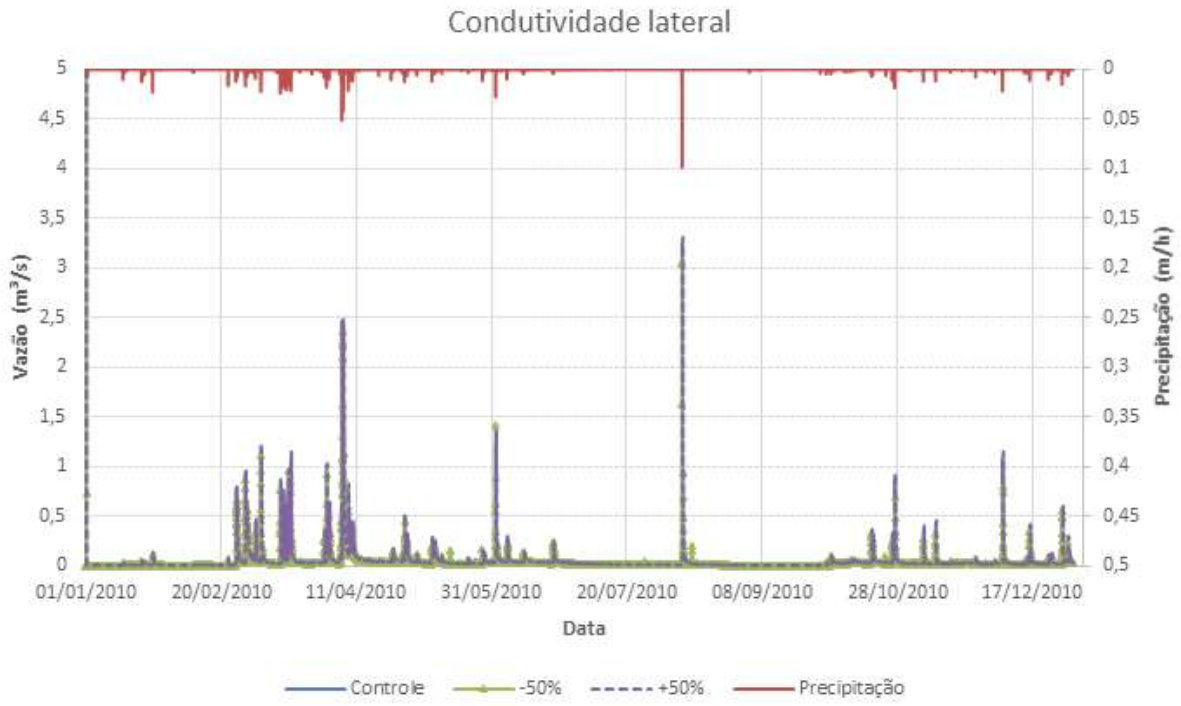
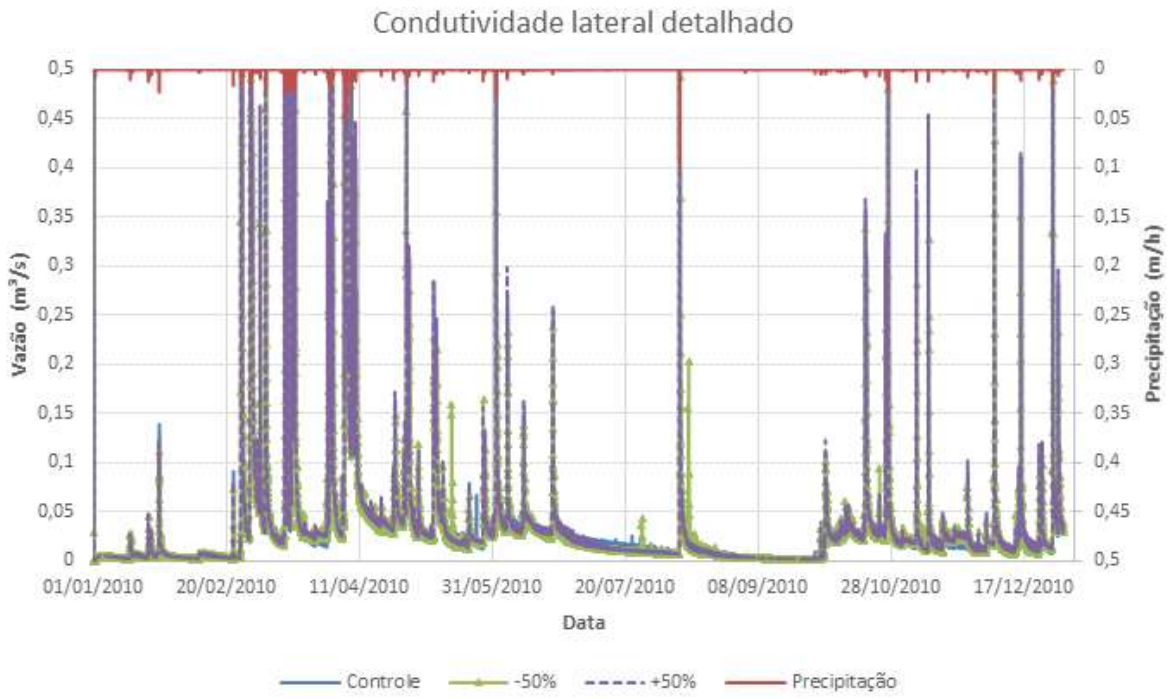


Figura 48 – Hidrograma (Detalhado) variação Condutividade lateral -50 % e +50%



Não houveram alterações significativas no conteúdo de umidade de nenhuma das 3 camadas do solo como pode ser observado nas figuras 49, 50, e 51.

Figura 49 - Umidade do solo na camada superior variação Condutividade lateral -50 % e +50%

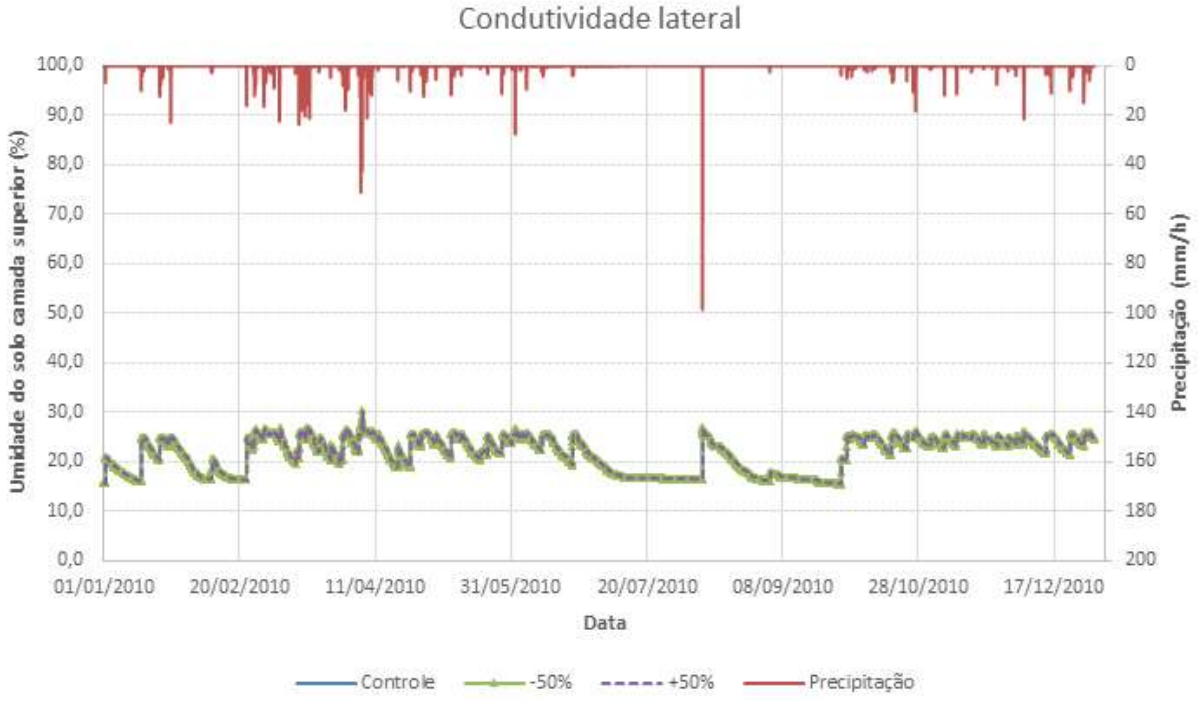
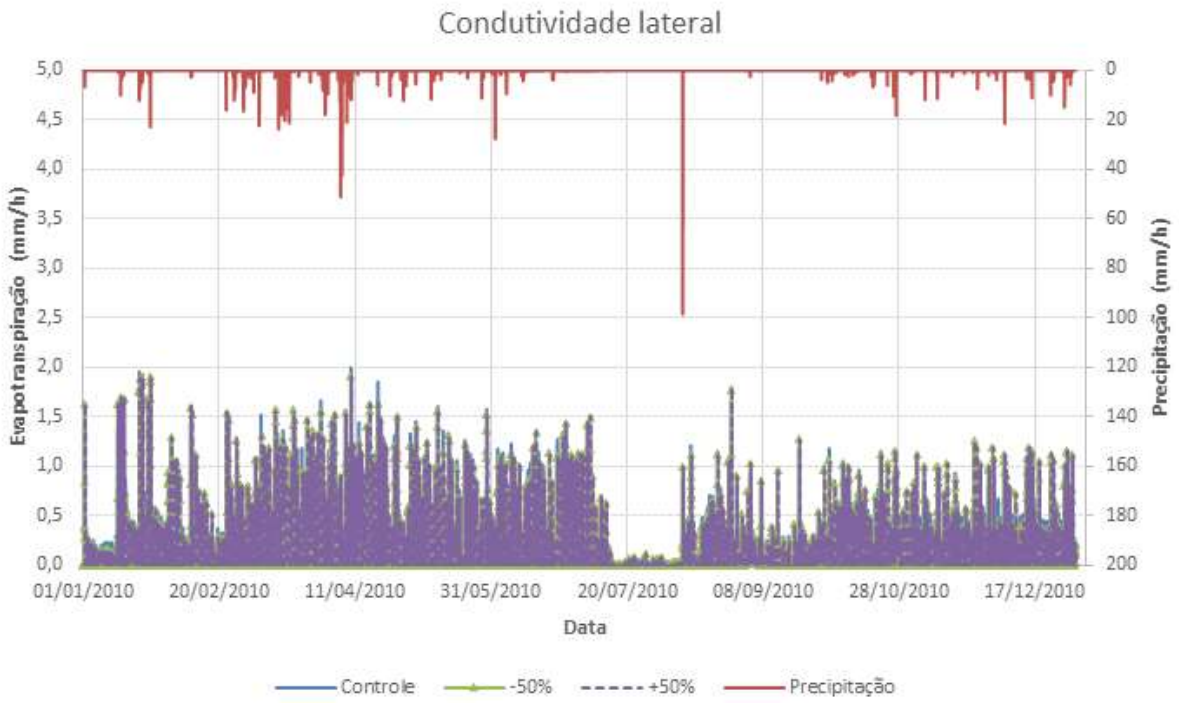


Figura 50 - Umidade do solo na camada intermediária variação Condutividade lateral -50 % e +50%

Figura 51 - Umidade do solo na camada inferior variação Condutividade lateral -50 % e +50%

Figura 52 – Evapotranspiração variação Condutividade lateral -50 % e +50%



Para analisar a sensibilidade do parâmetro capacidade de campo não foi possível abordar o intervalo de -50 % a +50% pois estes excederiam os limites possíveis para este parâmetro que devem ser observados de acordo com o ponto de murcha e a porosidade do solo. Portanto este parâmetro foi variado até o limite destes valores, (que no caso do ponto de murcha é 0,17 e da porosidade 0,39) assumindo 0,18 como limite inferior e 0,38 como limite superior nas simulações. As figuras 53 e 54 apresentam as vazões obtidas considerando estes valores. Observa-se uma alta sensibilidade deste parâmetro em comparação com os outros analisados, na mesma faixa de variação (em torno de 50%). Embora Kruk et al (2009) não elegido este parâmetro entres os mais sensíveis, a metodologia utilizada para os parâmetros de capacidade de solo, ponto e murcha e porosidade foi variar estes parâmetros em conjunto, por serem correlacionados. Ao reduzir o valor da capacidade de campo foram alterados tanto a magnitude dos picos, assim como encontrado por Kruk et al (2009). Este fato pode ser aplicado por um aumento da percolação, que é inversamente proporcional a capacidade campo.

Figura 53 - Hidrograma variação Capacidade de campo .18 e .38

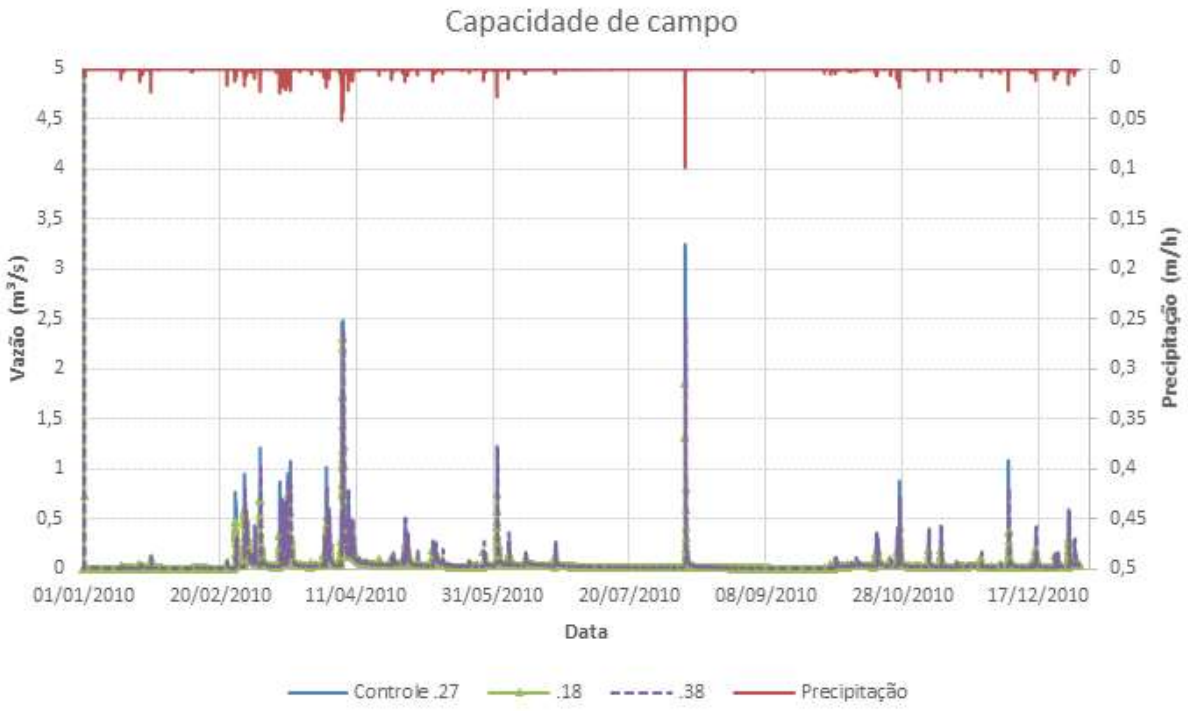
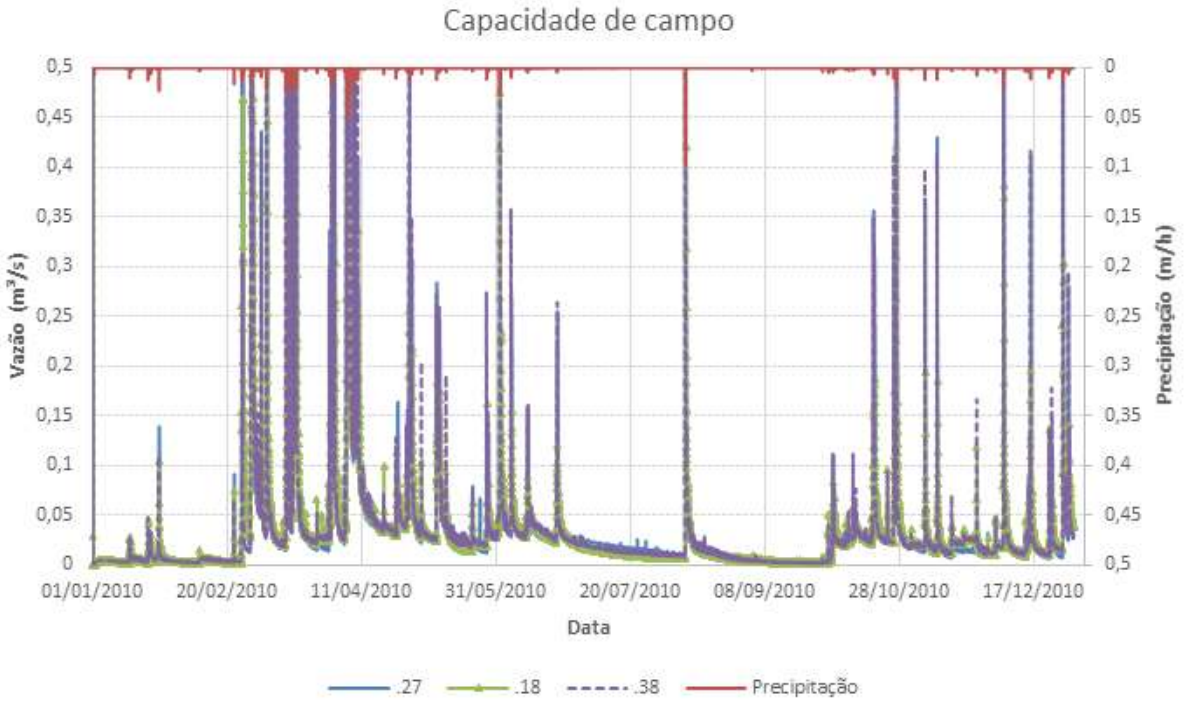


Figura 54 - Hidrograma (Detalhado) variação Capacidade de campo .18 e .38



O parâmetro da capacidade de campo, ao contrário dos outros analisados que não demonstravam sensibilidade significativa nos valores de umidade de solo, teve variações significativas com estes valores. Quando os valores da capacidade

campo foram aumentados para 0,38 a umidade do solo atingiu valores maiores, porém as variações foram menores (se observa uma tendência mais estabilizada). Para os valores de 0,18 a umidade se manteve no nível do controle.

Figura 55 - Umidade do solo na camada superior variação Capacidade de campo .18 e .38

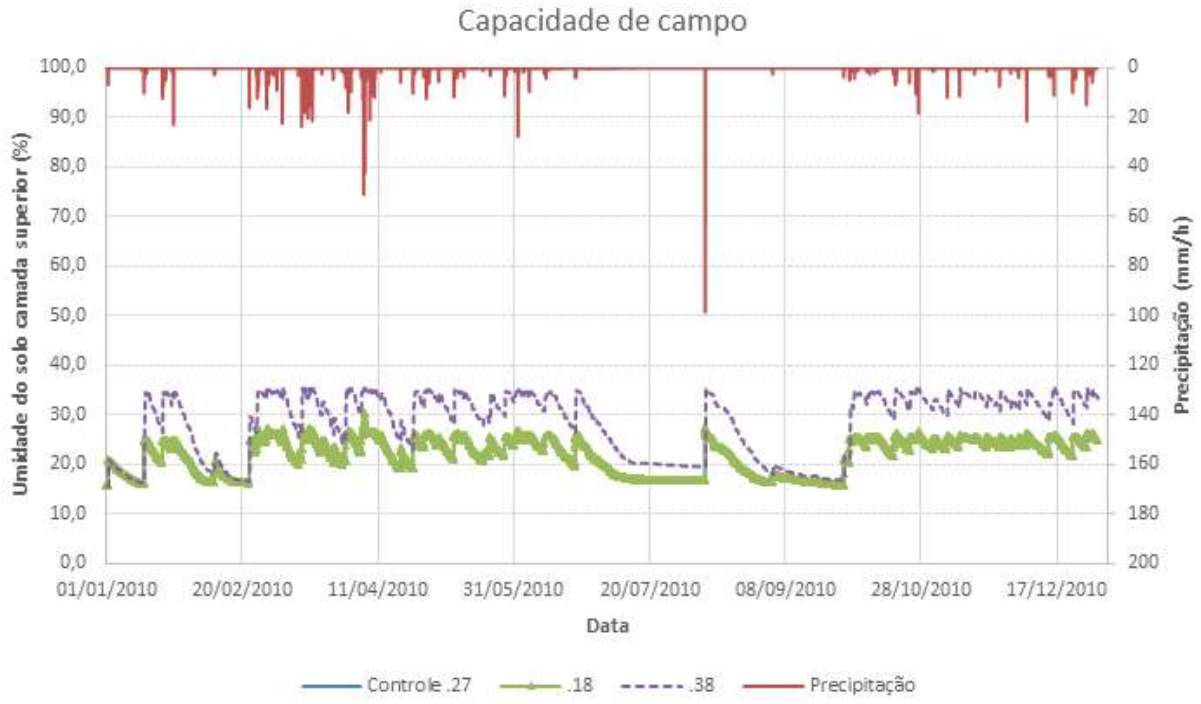


Figura 56 - Umidade do solo na camada intermediária variação Capacidade de campo .18 e .38

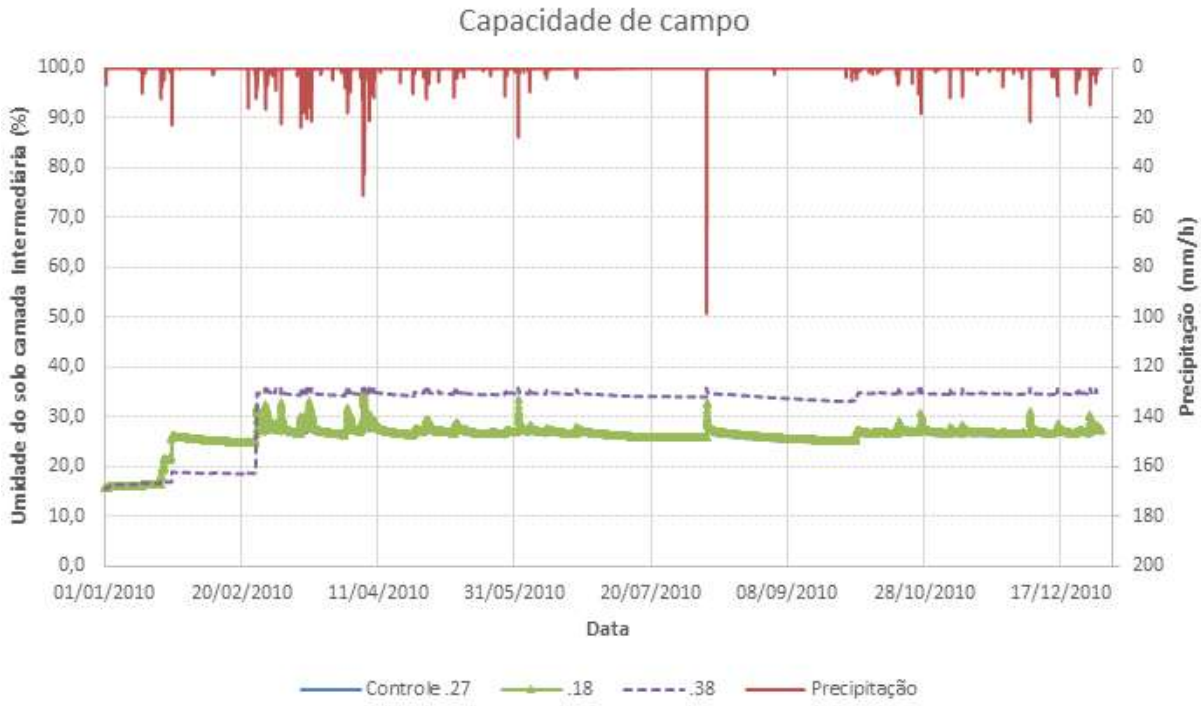
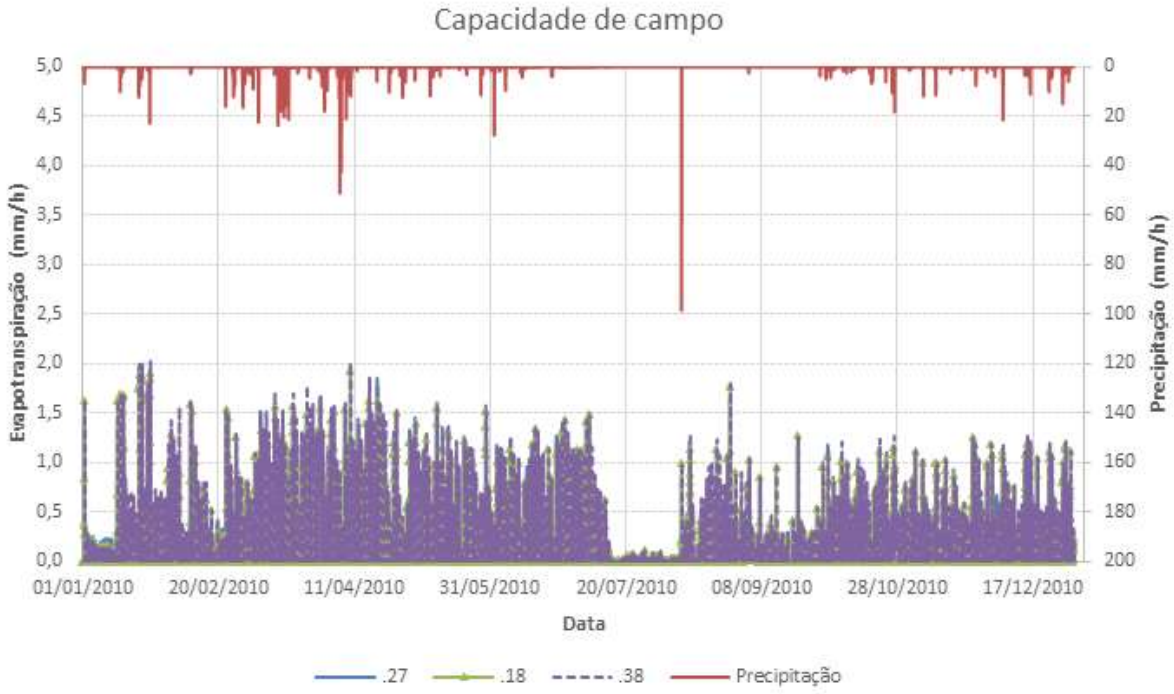


Figura 57 - Umidade do solo na camada superior variação Capacidade de campo .18 e .38

Para a evapotranspiração (Figura 58) não foram observadas diferenças significativas nas simulações.

Figura 58 - Evapotranspiração variação Capacidade de campo .18 e .38

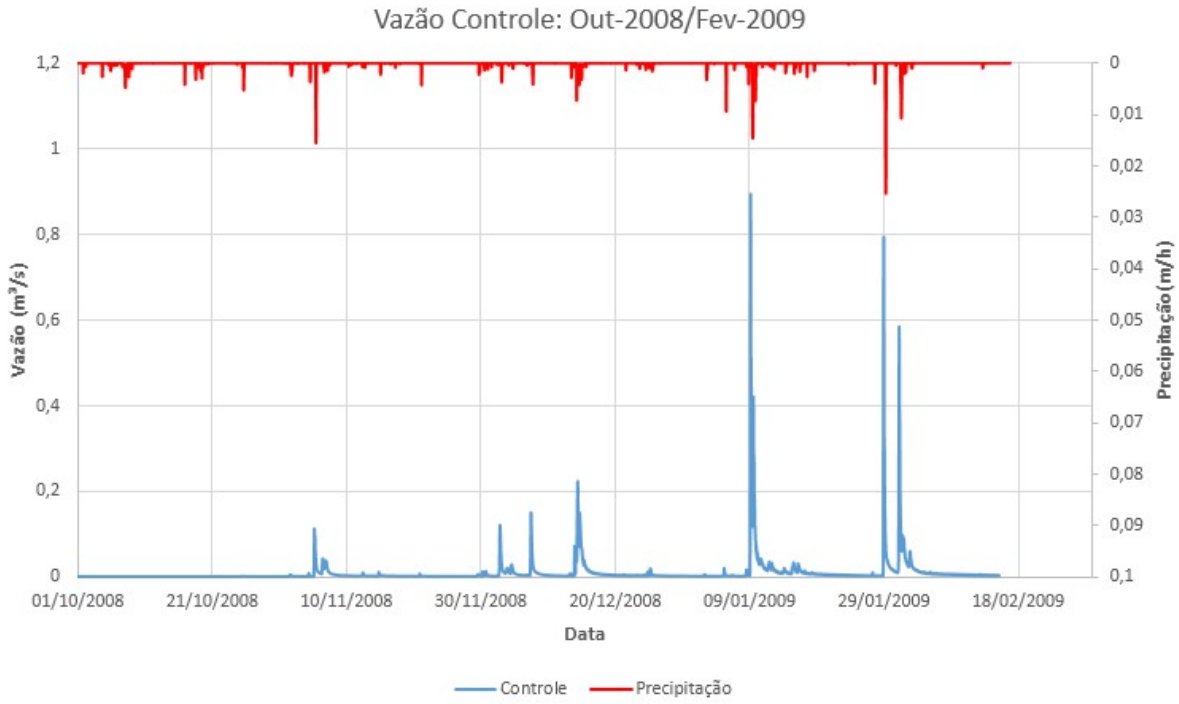


4.3 Ajuste de parâmetros para estudo de cenários

A Figura 59 apresenta as vazões calculadas como controle para o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009. Observa-se que o hidrograma responde bem as chuvas após um período inicial de aquecimento. A magnitude das vazões máximas fica abaixo de 1 m³/s, mesma ordem de grandeza das máximas da série observada para o mesmo período (Figura 27). O escoamento de base foi da ordem de 0,025 m³/s (25 L/s). A evapotranspiração calculada para esse período foi de 229 mm, isto é, 46 % do total precipitado que foi de 494 mm. A vazão média para o período foi de 0,001 m³/s (10 L/s) que é considerado um valor abaixo do esperado.

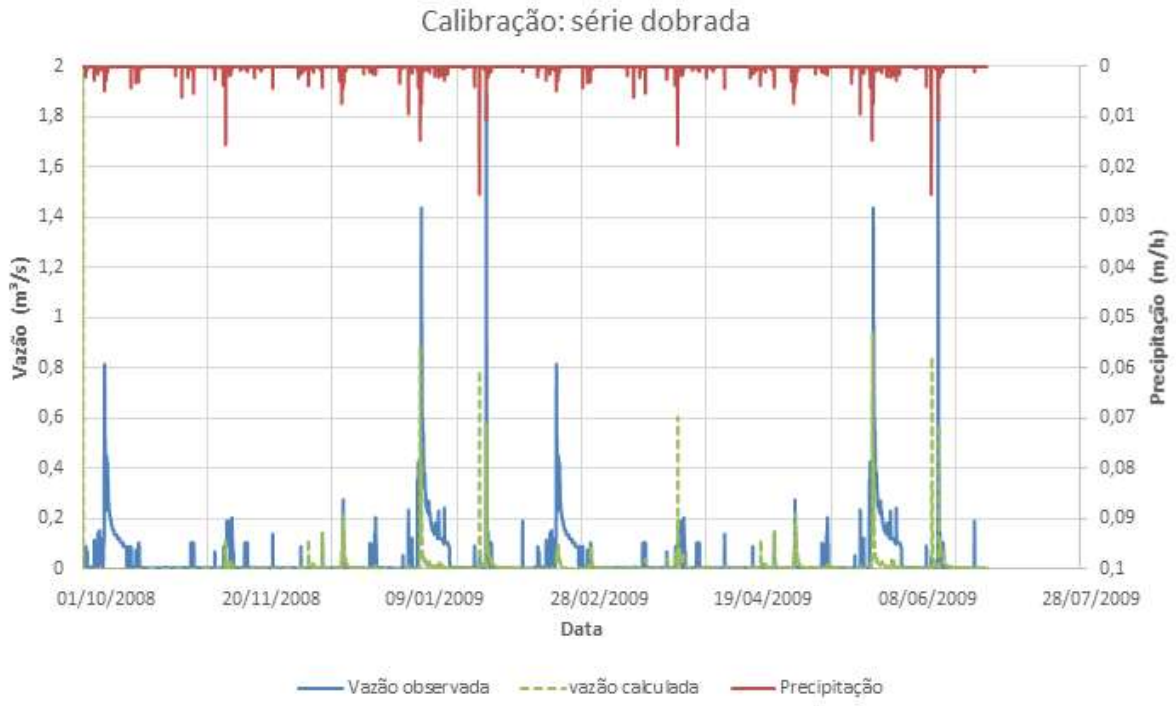
Segundo informações em matéria de O GLOBO (2016) a Companhia Estadual de Águas e Esgotos CEDAE mesmo durante períodos de escassez, como foi no caso de 2015, retirava uma vazão de 12 L/s logo a jusante do vertedouro, no reservatório do Sacarrão, localizado há alguns metros da estação fluviométrica. Em média estes valores são de 25 L/s como informou a CEDAE, o que leva a acreditar que 10 L/s como vazão média é um valor abaixo do esperado para a micro bacia.

Figura 59 - Hidrograma Controle outubro 2008 - fevereiro 2009



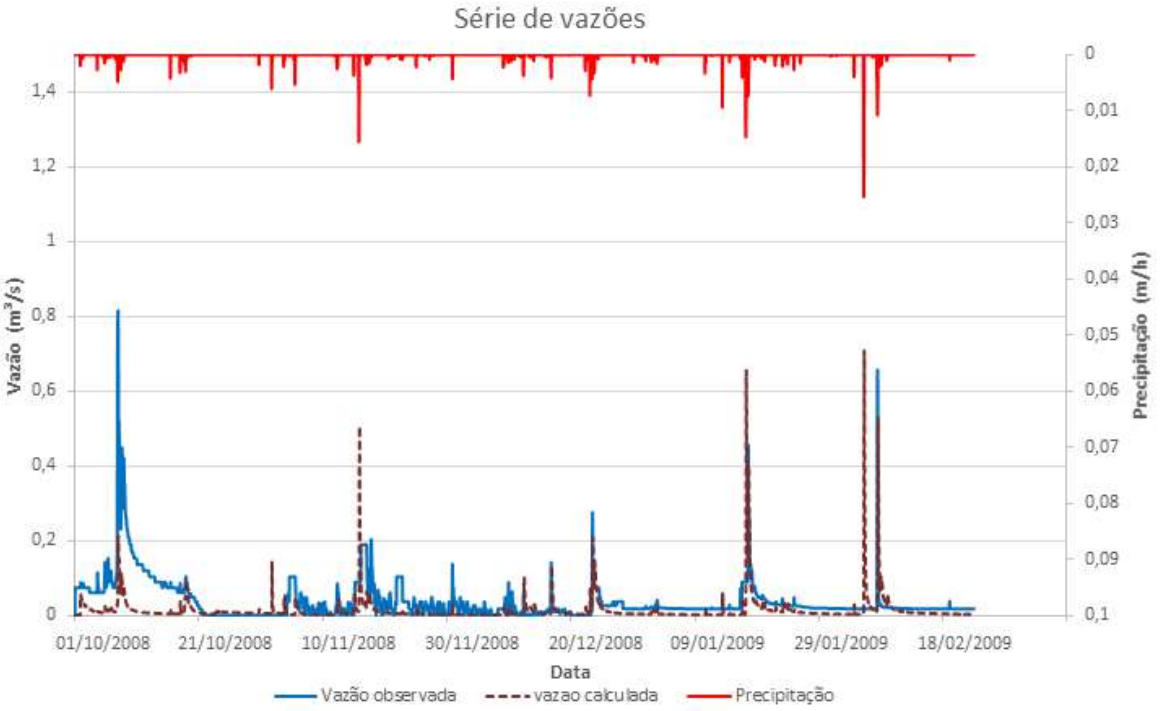
Para analisar os efeitos do período de aquecimento sobre o resultado do modelo, foi realizado está simulação com a série entre outubro de 2008 a fevereiro de 2009 repetida de forma consecutiva (Figura 60). Apenas para fins de execução do modelo alterou-se a data de fim de execução para 29/07/2009. Como pode ser observado o modelo levou cerca de 2 meses para realizar o aquecimento, reproduzindo a partir daí praticamente os mesmos resultados para ambas as séries. Percebe-se neste sentido uma influência maior das forçantes climatológicas sobre o modelo, do que aquelas relacionadas aos estados iniciais do modelo. Isto pode ser justificado pelo fato de se tratar de uma microbacia. Nota-se que para o primeiro evento de cheia, na segunda série o modelo apresentou uma resposta inexpressiva, o que pode ser explicado devido ao fato de não existir entrada de precipitação significativa na série forçante ao modelo.

Figura 60 - Simulação Série dobrada



A Figura 61 demonstra uma tentativa de calibrar o modelo para o período entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009 para os quais existem dados de vazões observadas disponíveis. Embora não tenha se atingido a qualidade necessária para uma calibração de modelo, percebe-se que para alguns eventos o modelo responde ao comportamento da bacia, porém sem atingir a correta magnitude.

Figura 61 - Tentativa de calibração DHSVM



5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As florestas são conhecidas por suas reservas expressivas de água, por amenizar extremos climáticos, além de se constituírem como fonte de biodiversidade e recursos naturais imprescindíveis para o desenvolvimento ambientalmente sustentável. O objetivo desta pesquisa foi implementar e realizar uma análise exploratória da aplicação do modelo hidrológico DHSVM, em uma micro bacia representativa localizada no Parque Estadual da Pedra Branca, em área de Mata Atlântica, em Jacarepaguá, Rio de Janeiro.

O DHSVM tem sido tomado como referência nos estudos hidrológicos em bacias florestadas em várias partes do mundo, sobretudo por sua concepção física, representando com certa acurácia os processos físico-químicos na relação Solo-Vegetação-Atmosfera. Entre outros, estudos de cenários baseados em simulação hidrológica podem contribuir na compreensão de como as mudanças climáticas podem impactar os recursos hídricos, e na própria conservação das florestas. Ainda mais importante, no contexto de devastação de boa parte das regiões de mata atlântica e da proximidade desses fragmentos de grandes centros urbanos.

Destacam-se como contribuições desta dissertação:

- A implementação e validação através de caso-teste do modelo DHSVM;
- Manual compreensível e amigável para implementação e uso do modelo DHSVM;
- Análise exploratória sobre a aplicabilidade do modelo DHSVM, que revelou:
    - que no modelo DHSVM não há a representação explícita do processo de escorrimento pelos troncos, que podem ser significativas e implicar em incertezas nas análises de balanço hídrico;
    - na análise de incertezas nas bases de dados da micro-bacia de estudo, foram observadas lacunas importantes na base de dados, sobretudo por mau funcionamento da estação climatológica e comprometimento temporário da estrutura do vertedouro;
    - na análise de sensibilidade revelou a presença de incertezas na delimitação de intervalos viáveis de variação dos parâmetros (valores físicos compatíveis). Os parâmetros taxa de infiltração máxima, coeficiente de decaimento exponencial, condutividade lateral e

capacidade de campo apresentaram sensibilidade no deflúvio gerado na seção de controle. Apenas a taxa de infiltração máxima demonstrou alterações significativas na evapotranspiração. No caso da umidade do solo somente o parâmetro da capacidade de campo demonstrou sensibilidade considerável.

- Implementação e organização da base de dados hidroclimatológica, promovendo a integração de vários arquivos (intervalos de tempo de 5 minutos), o que permitiu melhor gestão, facilitando a aplicação da mesma em outros estudos;
- Foram identificadas as falhas e incertezas dos dados hidroclimatológicos tendo como produto o histograma de dados (Fluviométrico e Climatológico);
- Organização da base de dados espaciais como topografia, cobertura do solo, tipo de solo e profundidade do solo que se encontra integrada e georeferenciada no SIG ArcGIS;
- Definição de elementos importantes para a calibração e ajuste dos parâmetros do modelo DHSVM, como importância do período de aquecimento, ajuste dos escoamentos de base e calibração dos parâmetros relacionados.

Destaca-se também o impacto abrangente desses resultados, por se tratar de estudo em bacia representativa no Parque Estadual da Pedra Branca, fragmento importante de Mata Atlântica na Região Sudeste Brasileira.

Os resultados obtidos terão impacto também na Rede de Pesquisa de Bacias Representativas de Uso Misto (BRUM) apoiada pelo MCT/FINEP da qual faz parte o Projeto HIDROCIDADES.

Os resultados da análise exploratória da aplicabilidade do modelo DHSVM na micro-bacia demonstrou-se muito promissora, o que permite recomendar a continuidade e aprofundamento dos estudos em aplicações para bacias em mata atlântica.

Apesar de contribuições significativas, o desenvolvimento da dissertação também revelou algumas limitações. Por ser um modelo de base física, o DHSVM apresenta alta complexidade, comportando-se de forma não linear, exigindo um vasto banco de dados para operar, que pode limitar sua aplicação em bacias

Brasileiras. Adicionalmente, foi verificado que para utilizar o modelo, além do processo bem trabalhoso de implementação, que envolve compilação e execução do código computacional, envolve também a compilação e execução de vários "*scripts*" de diversas linguagens (JAVA, C, AML), o que não é muito amigável, são necessários testes, avaliação da concepção de modelagem, reunião de informações para preparação de uma extensa base de dados, análise crítica dos dados, correção de falhas e outras inconsistências, adequação dos dados ao formato do modelo, antes de possíveis aplicações. O DHSVM apresenta ainda uma interface antiga, trabalhando inclusive com comandos de tela preta (Terminal), arquivos binários e tabelas ASCII. No atual estágio da tecnologia da informação (TI), onde as interfaces são modernas e intuitivas, como é o caso dos aplicativos disponíveis em *smartphones* e *tablets,* ou mesmo softwares utilizados no cotidiano, esta interface do modelo constitui naturalmente uma barreira para sua aplicação por não especialistas em TI.

As informações para operar o *software* do modelo não é de fácil acesso como na grande maioria dos programas atuais. Até mesmo as informações e softwares necessários para execução do modelo nestas condições não são de fácil acesso. Um dos pontos críticos deste trabalho foi obter o *software ArcInfo Workstation* (versão antiga do ArcGis que operava em estações de trabalho – *workstations*) para execução dos *scripts* AML. De modo geral, não apenas pela defasagem tecnológica, muitas informações acerca da implementação e execução do DHSVM estão espalhadas pela rede nos fóruns de discussão.

De qualquer forma a calibração de um modelo com vários parâmetros, equações não lineares, está longe de ser trivial. As lacunas observadas na base de dados, de certa forma tornaram mais árida as tentativas de calibração e validação do modelo.

Sendo assim recomenda-se para trabalhos futuros:

- Investimento na atualização das tecnologias utilizadas na programação dos códigos computacionais do modelo tornando sua aplicação mais amigável e o processamento mais eficiente. Transcrever os *scripts* em AML para uma linguagem mais atual e popular, como por exemplo é o caso do *Python* que pode ser executado dentro do ArcGIS. Como o ArcInfo Workstation saiu de

série, a tendência é que seja cada vez mais difícil obter este *software* para executar estas linhas de comando;

- Criar uma interface mais intuitiva para o DHSVM, como por exemplo realizar modificações e transcrições para executar o modelo dentro de um SIG como é o caso do modelo SWAT. Esta modificação reduziria os esforços de implementação e execução do modelo, podendo inclusive aumentar sua velocidade de execução caso os códigos fossem programados em compatibilidade com os atuais processadores que operam com múltiplos núcleos. Atualmente o DHSVM quando executado em processadores deste tipo só consegue usufruir de um núcleo por causa de sua arquitetura anterior a esta inovação tecnológica. Seria uma grande contribuição pois o modelo se tornaria mais acessível aumentando o número de estudos com sua utilização;
- Ampliação, melhor acompanhamento e maiores investimentos na coleta dos dados hidroclimatológicos e informações espaciais, sobretudo na ampliação de recursos para aquisição de estações de monitoramento mais robustas;
- Realizar uma análise consistente dos dados climatológicos disponíveis com outras estações nas proximidades, buscando reforçar a confiabilidade dos dados, assim como preencher eventuais falhas. Neste contexto também é possível compreender melhor a variabilidade dos dados climatológicos, sobretudo a precipitação e temperatura na micro-bacia de estudo. O DHSVM possui um módulo capaz de calibrar e realizar estes estudos de variabilidade a fim de trabalhar com mais de uma estação climatológica;
- Aquisição de variáveis e parâmetros mais específicos que influenciam nas relações solo-planta-atmosfera: levantamento de propriedades físico-hídricas dos solos, perfis de conteúdo umidade nos solos, apropriação de parâmetros e variáveis que influenciam na determinação da interceptação vegetal e evapotranspiração: índice de área foliar, espessura do dossel, altura total, profundidade e densidade de raízes para espécies vegetais de mata atlântica; medição *in situ* da interceptação vegetal, escorrimento pelos troncos e precipitação interna;
- Realizar modificações no modelo para que este possa operar em intervalo sub horário, sobretudo para microbacias montanhosas de alta declividade onde o tempo de concentração em geral é baixo.

- Aprofundamento da revisão bibliográfica identificando conclusões a cerca de outras aplicações do DHSVM, assim como levantamento de valores típicos e intervalos-limite de variação dos valores dos parâmetros do modelo, minimizando as incertezas da representatividade física nas aplicações do DHSVM; Aprofundar os estudos de sensibilidade, variando não apenas parâmetros individualmente, mas em conjunto. Já que o DHSVM é um modelo complexo e não linear; Implementar a versão mais recente do DHSVM que teve o acréscimo do módulo de perda de solos na bacia. Seria interessante reforçar estudos conforme já encontrados na literatura do papel das florestas, sobretudo da mata atlântica na prevenção da erosão;
- Realizar simulações para condições extremas como precipitações históricas e períodos de seca observando a resposta do modelo de forma a validá-lo para operar, inclusive nestas condições-limite (*outliers*);
- Realizar estudos de cenário, sobretudo aqueles relacionados a previsões e perspectivas de acordo com as mudanças climáticas, verificando condições como o regime hídrico, conservação das florestas e perenidade dos rios.

REFERÊNCIAS

ABREU, J. R. S. P. *Dinâmica Da Serapilheira Em Um Trecho De Floresta Atlântica Secundária Em Área Urbana Do Rio De Janeiro*. 2006a. 62 f. Universdade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

ABREU, J. R. S. P. *Dinâmica da serrapilheira em um trecho de floresta atlântica secundária em área urbana do Rio de Janeiro.* 2006b. 79 f. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

ALVARENGA, L.a. *et al.* Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. *Catena*, v. 143, p. 7–17, 2016. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S034181621630131X>.

ARCOVA, Francisco Carlos Soriano; CICCO, Valdir De; ROCHA, Paulo Augusto Bueno. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - São Paulo. *Revista Árvore*, v. 27, n. 2, p. 257–262, abr. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622003000200014&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

BAMBI, P. *Contribuição Na Composição Da Serapilheira e ciclagem de nutrientes na floresta de transição no norte do mato grosso*. 2007. 99 f. Universidade Federal do Mato Grosso, 2007.

BATISTA AMARAL, D. P. *Aplicacação do Modelo Hidrológico SWMM na Gestão das Águas Pluviais Urbanas: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Morto, Rio de Janeiro.* 2014. 153 f. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BELLON, E. *Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas : aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Rio de Janeiro*. 2014. 111 f. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, n. 1, p. 43–69, mar. 1979. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667909491834>.

BEVEN, Keith. Topmodel : a Critique. *Hydrological Processes*, v. 11, p. 1069–1085, 1997.

Biomas Brasileiros. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 5 set. 2015.

BLAINSKI, Éverton; GARBOSSA, Luis Hamilton Pospissil; MALUTTA, Simone. APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT (Soil and Water Assessment

Tool) PARA A SIMULAÇÃO DA PERDA DE SOLO E DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NÃO INSTRUMENTADA. *X Simposio de Recursos hidricos do Nordeste*, p. 1–11, 2010.

BORGES, Alisson C.; MENDIONDO, Eduardo M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 293–300, 2007.

BRAGA, R. A. P. 1 Conservação Integrada De Floresta E Avaliação dos instrumentos de políticas públicas na conservação integrada de florestas e águas, com estudo de caso na bacia do Corumbataí - SP. 2005.

BRAS, R. L. *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*. [S.l.]: Addison-Wesle, 1990.

BRUIJNZEEL, L. A. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state of knowledge review*. Amsterdam: Faculty of Earth Sciences, 1990.

BRUIJNZEEL, L. A. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Amsterdam: Faculty of earth sciences, 1990.

CARDOSO, Christiany Araujo *et al.* Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore, Viçosa - MG*, v. 30, n. 2, p. 249–256, 2006a.

CARDOSO, Christiany Araujo *et al.* Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista Árvore, Viçosa - MG*, v. 30, n. 2, p. 249–256, 2006b.

CASTRO, Kassia B. Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazao em bacia agricola do cerrado intensametne monitorada. *Dissertação*, 2013.

CICCO, Valdir De. *Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica : São Paulo , SP e Cunha , SP .* 2009. 138 f. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CUARTAS, L. A. P. *Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia central*. 2008. 236 f. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 462-463, n. 2012, p. 15–27, set. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.047>.

D. N. MORIASI *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007. Disponível em: <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>.

DAWES, Warrick R. *et al.* Evaluation of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG_IRM) on a small cropping rotation catchment. *Journal of Hydrology*, v. 191, n. 1-4, p. 64–86, abr. 1997. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169496030727>.

DHSVM. Disponível em: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/>. Acesso em: 8 maio 2014.

DONATO, C.F.; RANZINI, M.; CICCO, V. DE; ARCOVA, F. C. S.; SOUZA, L. F. S. De. Balanço De Massa Em Microbacia Experimental Com Mata Atlântica, Na Serra Do Mar, Cunha, Sp. *Rev. Inst. Flor*, v. 20, n. 1, p. 1–11, 2008. Disponível em: <http://www.iflorestal.sp.gov.br/publicacoes/revista_if/rev20-1pdf/1-11.pdf\nAcessado em 11/02/13>.

EMBRAPA. *Manual de método de análise do solo*. . Rio de Janeiro: [s.n.], 1986.

EPA. Disponível em: <https://www3.epa.gov/>. Acesso em: 3 abr. 2015.

FRANKEN, W. *et al.* Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. v. 2, n. 12, p. 327–331, 1992.

GEIGER, R.; ARON, R. H.; TODHUNTER, P. *The Climate Near the Ground*. 7. ed. Cambridge: Rowman and Littlefield Publishers, 2009.

HARMEL, R. D. *et al.* Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review and recommendations. *Environmental Modelling and Software*, v. 57, p. 40–51, 2014a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.013>.

HARMEL, R. D. *et al.* Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review and recommendations. *Environmental Modelling and Software*, v. 57, p. 40–51, 2014b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.013>.

HELVEY, J. D.; PATRIC, J. H. Design criteria for interception studies. *International Association Science Hydrology*, n. 67, p. 131–137, 1966.

Hidrologia Florestas. Disponível em: <http://iflorestal.sp.gov.br/>. Acesso em: 16 fev. 2016.

INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE - INEA. *Plano de Manejo Parque Estadual Pedra Branca*. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/>. Acesso em: 6 ago. 2015.

Instituto Florestal de São Paulo. Disponível em: <http://iflorestal.sp.gov.br/>. Acesso em: 25 fev. 2016.

KRUK, N. S.; VENDRAME, I. F.; CHAN, C. S.; *et al.* Análise de Sensibilidade do Modelo Hidrológico Distribuído DHSVM aos Parâmetros de Vegetação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 1, p. 75–84, 2009.

KRUK, N. S.; VENDRAME, I. F.; LADEIRA, F. S.; *et al. Análise de Sensibilidade do Modelo Hidrológico Distribuído DHSVM aos Parâmetros de Vegetação*. . [S.l.]: In XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. , 2009

LEOPOLDO, Paulo Rodolfo; FRANKEN, Wolfam; SALATI, Eneas. *Balanço hídrico de pequena bacia hidrográfica em floresta amazônica de terra firme*. *Acta Amazônica*. [S.l: s.n.]. , 1982

LINSLEY JR, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. *Hydrology for Engineers*. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Co., 1975.

MATTOS JUNIOR, C. F. *Instituto De Florestas Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro*. 2008. 53 f. Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro, Seropédica, 2008.

MENDES FILHO, W. *et al.* Levantamento de dados e caracterização da bacia do Rio Claro para aplicação do modelo hidrológico DHSVM. *In Anais: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo*, 2007.

MENDONÇA, Ednaldo a; DANTAS, Renilson T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 196–202, 2010a. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000200011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

MENDONÇA, Ednaldo A; DANTAS, Renilson T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 196–202, 2010b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000200011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

Mike She Model. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>. Acesso em: 3 abr. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Mata Atlântica*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/>. Acesso em: 6 out. 2015.

NEITSCH, S L *et al.* Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005. p. 494, 2005.

NETO, J. O. M. *Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT*. 2013. 149 f. Universidade Federal de Lavras, 2013.

O GLOBO. *Reservatórios independentes do sistema Guandu estão secos*. Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/reservatorios-independentes-do-sistema-guandu-estao-secos-15215955>. Acesso em: 10 fev. 2016.

Parque Estadual da Pedra Branca. Disponível em: <http://www.parquepedrabranca.com/>. Acesso em: 18 nov. 2015.

PIMENTEL DA SILVA, L. *Hidrologia. Engenharia e Meio Ambiente*. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. Disponível em: <Elsevier/Campus>.

RITTER, Axel; MU??OZ-CARPENA, Rafael. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, v. 480, n. 2013, p. 33–45, 2013a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>.

RITTER, Axel; MU??OZ-CARPENA, Rafael. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, v. 480, p. 33–45, 2013b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>.

RUTTER, A. J. Water consumption by forests. *Water Deficits and Plant Growth*. Nova Iorque: Academic Press, 1968. p. 23–84.

ROSADO, B. H. P. *et al.* Fine root biomass and root length density in a lowland and a montane tropical rain forest, SP, Brazil. *Biota Neotropica*, v. 11, n. 3, p. 203–209, 2011.

RUTTER, A. J.; MORTON, A. J.; ROBINS, P. C. A predictive model of rainfall interception in forests, ii generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, v. 14, p. 567–588, 1975.

SATTERLUND, D. R. *Wildland Watershed Management*. Nova Iorque: The Ronald Press, 1972.

SATTERLUND, D. R.; ADAMS, P. W. *Wildland Watershed Management*. 2. ed. Nova Iorque: Wiley, 1992.

SONG, Xiaomeng *et al.* Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 739–757, 2015a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.

SONG, Xiaomeng *et al.* Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, v. 523, n. 225, p. 739–757, 2015b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.

SOS MATA ATLÂNTICA. *Estado de conservação da mata atlântica*. Disponível em: <http://www.sosma.org.br>. Acesso em: 13 out. 2015.

TEXAS A&M UNIVERSITY AND BUREAU OF RECLAMATION. *Hydrologic Modeling Inventory Website*. Disponível em: <http://hydrologicmodels.tamu.edu/>. Acesso em: 29 out. 2013.

THORTHWAITE, C. W.; MATTER, J. R. *The water balance*. Nova Jersey: Drexel Institute of Thecnology, 1955.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

UNITED STATES DEPARTEMENT OF AGRICULTURE SOIL CONSERVATION SERVICE. *USDA Textural Soil Classification*. . [S.l: s.n.], 1987.

USDA Calculator. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey>. Acesso em: 21 dez. 2015.

VERTESSY, R. a. *et al.* Long-term growth and water balance predictions for a mountain ash (Eucalyptus regnans) forest catchment subject to clear-felling and regeneration. *Tree physiology*, v. 16, n. 1985, p. 221–232, 1996. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14871766>.

WIGMOSTA, M. S.; NIJSSEN, B.; STORCK, P. The distributed hydrology soil vegetation model. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, p. 7–42, 2002. Disponível em: <http://www.cabdirect.org/abstracts/20033121322.html>.

WIGMOSTA, Mark S.; VAIL, Lance W.; LETTENMAIER, Dennis P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, 1994.

ZOPPOU, Christopher. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, v. 16, n. 3, p. 195–231, 2001.

APÊNDICE A

Tutorial Básico DHSVM para Windows

1 - Primeiramente realizar o download e instalar as seguintes ferramentas:

- ArcGIS;

- ArcInfo Workstation;

- Cygwin (full);

- Java Runtime Environment (JRE)

OBS: A ESRI fabricante dos softwares ArcGIS e ArcInfo Workstation encerrou a série Workstation. Este software é importante para executar os scripts AML necessários para processar os dados de entrada do DHSVM. Existe uma tendência que estes scripts sejam reescritos em Python pela comunidade de usuários do DHSVM. Caso ao utilizar este manual estes scripts ainda não estejam disponíveis em outra linguagem além da AML verifique se sua instituição através do “My ESRI” tem acesso ao download da última versão do ArcInfo Workstation produzida. O programa “Arc” da série do ArcInfo Workstation pode ser visualizado na Figura 01:

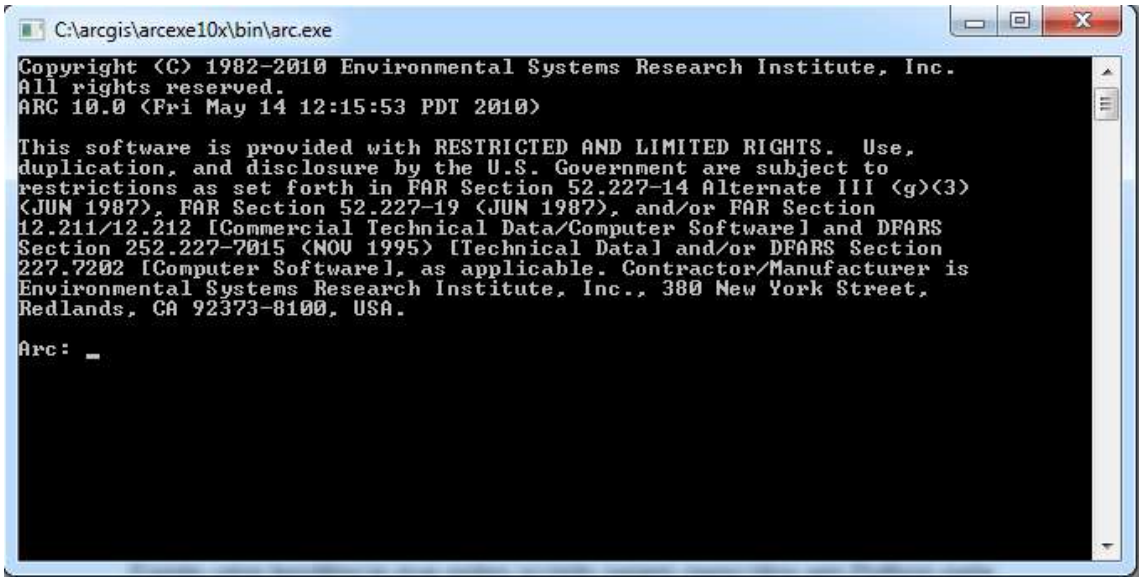


Figura 01: Programa Arc da série ArcInfoWorkstation.

2 – Realizar o download do código do DHSVM (versão utilizada neste tutorial DHSVM 2.0)

Observação: Na presente data o código do DHSVM na versão 2.0 se encontra disponível no endereço:

http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/code.shtml#Code Downloads

3 – O arquivo baixado deve se chamar “tutorial.tar.gz”, crie uma nova pasta no seu disco local chamada: “DHSVM” e extraia seu conteúdo dentro desta pasta. Caso o nome do arquivo esteja diferente não tem problema, o importante é que o mesmo se refira ao DHSVM na versão 2.0 e que seja extraído dentro da pasta “DHSVM” no disco local. (Ex: C:/DHSVM)

4 – Ao extrair o arquivo dentro da pasta criada “DHSVM” as seguintes pastas e arquivos, conforme a figura 02, devem compor o diretório:

- arcinfo (pasta)
- configfiles (pasta)
- metfiles (pasta)
- output (pasta)
- programs (pasta)
- source (pasta)
- Instructions.doc (arquivo de word com instruções em inglês)

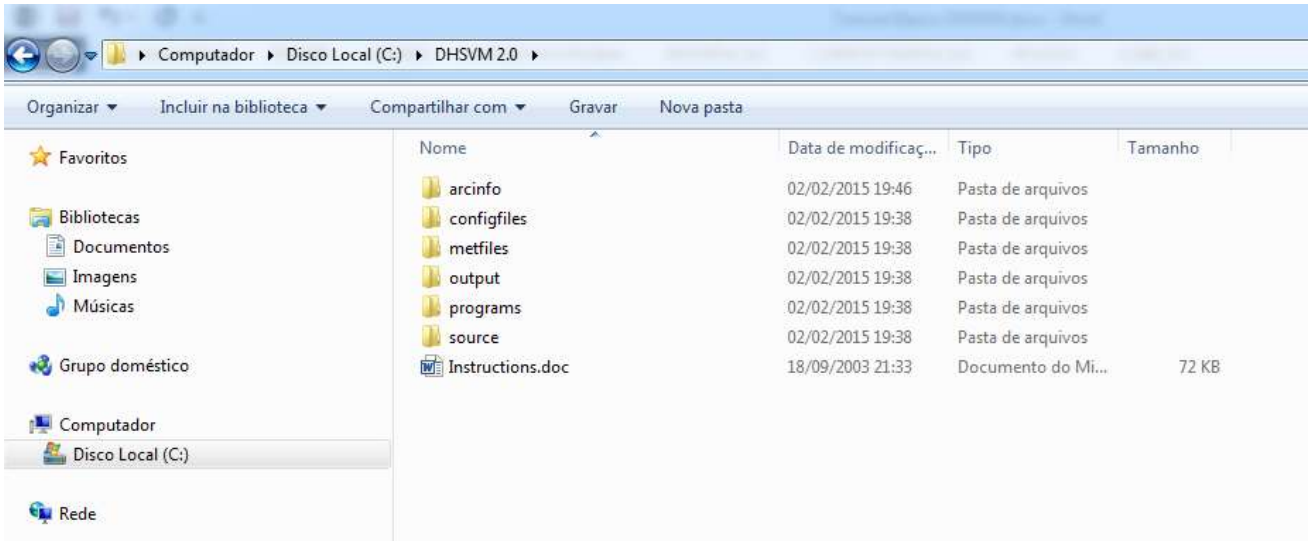


Figura 02: Estrutura da pasta DHSVM

5 – Abra o ArcGIS (ArcMap) e então vá em File>Add Data>Add Data...

6- Procure o ícone “New Folder” e selecione a pasta criada “DHSVM 2.0”, e em seguida o sub diretório “arcinfo”.

7 – Selecione o arquivo “rainymask” e clique em Add.

8 – Abra a ferramenta “Raster Calculator”. ArcToolbox> Spatial Analyst Tools > map algebra > Raster Calculator. Obs: Se esta ferramenta não estiver disponível verifique em: Customize > Extensions… se a ferramenta Spatial Analyst Tools e as demais outras estão ativas.

9 – Na ferramenta Raster Calculator você deve colocar a seguinte expressão:

Con("rainymask",0)

E em Output raster, salvar como “rainymask2” na mesma pasta onde está localizado o arquivo rainymask, conforme na figura 03. Ao configurar desta forma clique em “OK”.

10 – Abra a ferramenta “Raster to ASCII”. ArcToolbox > Conversion tools > From Raster > Raster to ASCII.

11 – Na ferramenta Raster to ASCII coloque como Input Raster rainymask2, e salve com o nome de “rainymask” no formato txt na mesma pasta onde está localizado o arquivo rainymask2. Aperte Ok.

12 – Repita apenas os passos 10 e 11 para os arquivos “rainysoil”, “rainyveg” e “rainydem”.

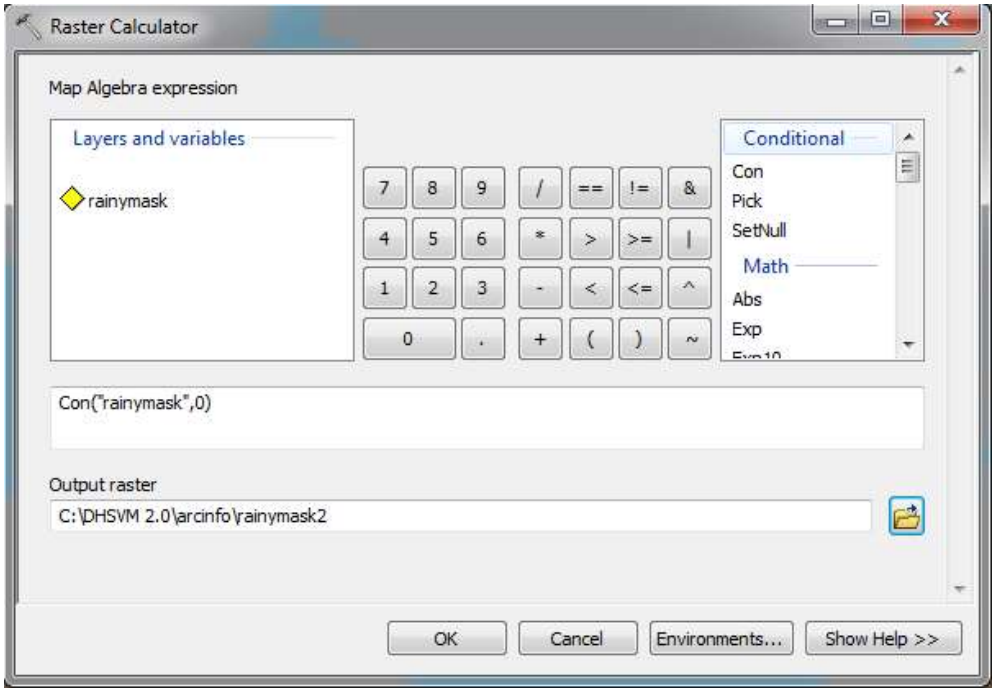


Figura 03: Ferramenta Raster Calculator.

13 – Abra o arquivo “rainymask.txt” e recorte o cabeçalho do arquivo. O cabeçalho deve ser algo como:

ncols 67
nrows 52

xllcorner 394379,92247655
yllcorner 761247,95513744
cellsize 150
NODATA_value -9999

14 – Crie um novo documento txt dentro da pasta onde está localizado o arquivo “rainymask.txt” com o nome “rainyhdr.txt” e cole o cabeçalho dentro deste arquivo.

15 – Retire o cabeçalho dos arquivos “rainysoil.txt”, “rainyveg.txt” e “rainydem.txt”. Não precisa criar cópias do cabeçalho destes arquivo, pois todos os cabeçalhos destes arquivos são iguais ao já copiado do “rainymask.txt”.

16 – Abra o Cygwin e digite “cd C:/DHSVM/programs”. Aperte Enter. Caso a localização ou o nome da pasta seja outro basta alterar, o importante é que vá até a pasta “programs”.

17 – Digite “gcc myconvert.c –lm –o myconvert”. Aperte Enter.

Obs: Para que funcione é necessário que você tenha o gcc instalado. Para verificar se o gcc está instalado no Cygwin basta abrir o programa, digitar “gcc” e apertar Enter. Se o gcc estiver instalado deve aparecer a seguinte mensagem: “gcc: no input files.” Caso contrário, deve aparecer uma mensagem parecida com essa: “bash: gcc: comando não encontrado”.

18 – Digite: “./myconvert ascii char C:/DHSVM/arcinfo/rainymask.txt C:/DHSVM/arcinfo/rainymask.bin 52 67”. Note que a localização dos arquivos pode variar.

19 – Faça o mesmo do passo 18 para os arquivos “rainydem.txt”, “rainysoil.txt” e “rainyveg.txt”, mudando o formato de cada um conforme a descrição:

rainymask – char

rainydem – float

rainysoil – char

rainyveg – char

20 – Digite: “cd C:/DHSVM/programs” Aperte Enter.

21 – Digite: “make –f Makefile.ModelState” Aperte Enter

22 – Crie uma pasta com o nome “modelstate” dentro da pasta “DHSVM”.

23 – Digite: “./MakeModelStateBin InitialState.txt”. Aperte Enter. Este commando deverá criar dentro da pasta “modelstate” arquivos binários relativos a interceptação, neve e solo.

24 – Abra no ArcInfo Workstation o programa Arc (Como demonstrado na figura 01)

25 – Verifique se o Java Runtime Environment (JRE) está instalado corretamente na sua máquina. Para isso digite:

&sys java –version

Caso o JRE esteja instalado na sua máquina deve aparecer algo como na figura 04:

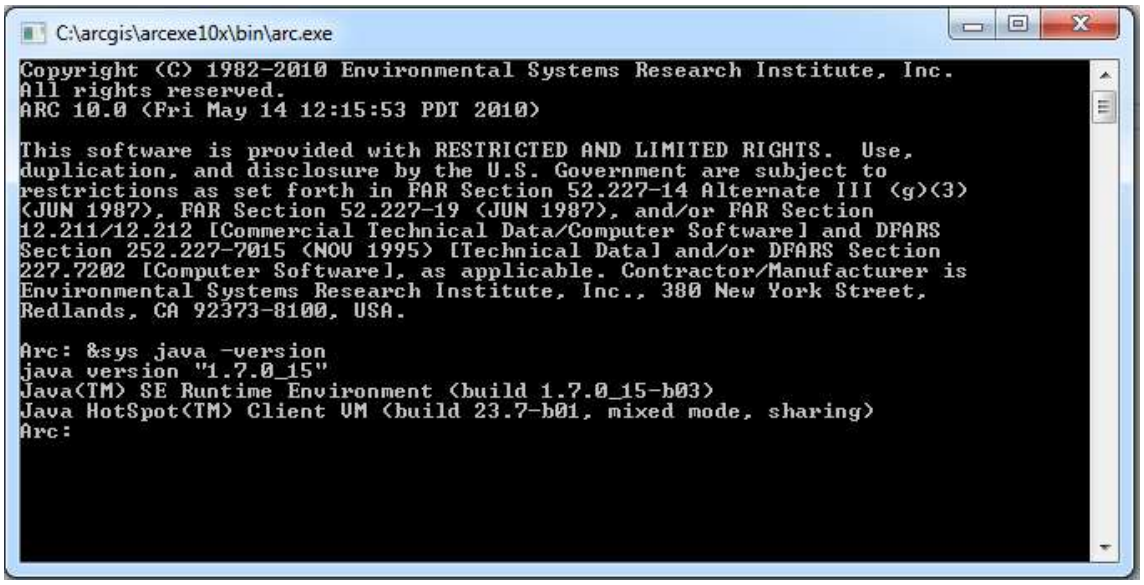


Figura 04: Versão Java Runtime Environment (JRE)

26 – Crie um diretório, como por exemplo “C:/TEMP”, e copie para lá através do Arc Catalog os Rasters correspondentes ao Modelo Digital de Elevação e a máscara da bacia. No exemplo que segue com o DHSVM esses arquivos são “rainydem” e “rainymask” respectivamente. Copie também para este diretório todos os scripts aml que estão na pasta “.../DHSVM/arcinfo/amlscripts”.

27-Vá até a pasta “C:/DHSVM/Programs” e copie os arquivos “Aat.java” “AatError.java”, “AddAat2.java” e “fixroads.c” para a pasta “C:/TEMP”.

28-Abra o arquivo “Aat.java” com o TextPad e vá em Ferramentas>Ferramenta do usuário>Compilar Java. Este passo irá compilar o arquivo java e deverá criar o arquivo “Aat.class”.

29-Repita o passo 28 com os outros arquivos “*.java” de forma a criar os arquivos “*.class”.

30-Abra o arquivo “createstreamnetwork.aml” com o TextPad vá em Pesquisar>Localizar. Procure por “java”. Você deverá encontrar está linha:

&sys java -classpath programs/ AddAat2 %streamnet%

Substitua pelo caminho correto de localização dos arquivos, que no caso deste tutorial é:

&sys java -classpath C:/TEMP/ AddAat2 %streamnet%

31-Abra o cgywin e digite: “cd C:/TEMP” Aperte Enter.

32-Ainda no cgywin digite: “gcc fixroads.c –lm –o fixroads”. Este passo deverá criar um arquivo “fixroads.exe” na pasta C:/TEMP.

33 – No programa ArcInfo Workstation você precisa configurar a localização do pacote de scripts aml e o espaço de trabalho onde estão os arquivos a serem executados. Como exemplo utilizamos a localização na pasta chamada “C:/TEMP”. Digite:

&amlpath C:/TEMP

Aperte Enter

Digite:

&workspace C:/TEMP

Aperte Enter

34 – Após configurar as localizações conforme o passo anterior, sem ter fechado o programa, devemos executar o script “createstreamnetwork.aml”. Este Script cria os arquivos “stream.map.dat” e “stream.network.dat” necessários como dados de entrada para o DHSVM. A estrutura de dados necessárias para executar este script é:

&run createstreamnetwork.aml <Modelo Digital de Elevação> <Máscara da bacia> <Mapa de profundidade do solo> <Cursos d’água> <MASK ou MOUTH> área de contribuição <profundidade mínima do solo> <profundidade máxima do solo>

Conforme os arquivos fornecidos no exemplo esta linha de comando fica:

&run createstreamnetwork.aml rainydem rainymask soild streams MASK 100000 .76 1.5

Em um ponto da execução o ArcInfo Workstation irá te perguntar se deseja continuar, você deve digitar “y” e apertar enter. (isso corresponde yes)

35 – Sem fechar o ArcInfo Workstation (caso feche precisará configurar as localizações confoem no passo 33 novamente) vamos executar o script “createroadnetwork.aml”. Este Script cria os arquivos “road.map.dat” e “road.network.dat” necessários como dados de entrada para o DHSVM. A estrutura de dados necessária para executar este script é:

&run createroadnetwork.aml <Modelo Digital de Elevação> <Mapa de profundidade do solo> <estradas>

Conforme os arquivos fornecidos no exemplo esta linha de comando fica:

&run createroadnetwork.aml rainydem soild roads

Em um ponto da execução o ArcInfo Workstation irá te perguntar se deseja continuar, você deve digitar “y” e apertar enter. (isso corresponde yes)

36-Abra o bloco de notas ou outro programa similar de sua preferência e crie um arquivo chamado “stream.class.dat” (importante que a extensão do arquivo precisar ser “.dat” e não “.txt”).

Este arquivo deve ter a seguinte estrutura, conforme a figura 05:

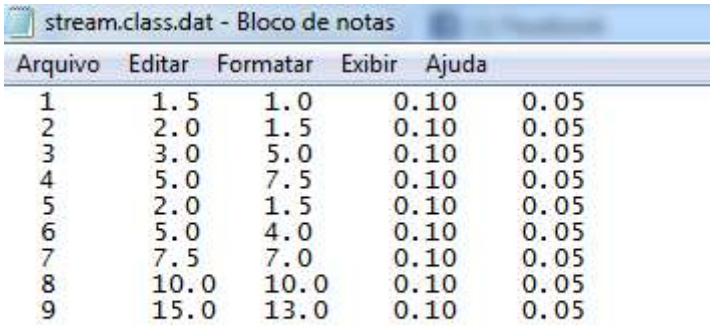


Figura 05: Estrutura do arquivo stream.class.dat

As colunas representam respectivamente: A classe do canal, a largura, a profundidade, o coeficiente de atrito de Manning e coeficiente de infiltração.

Você deverá preenche-lo manualmente de acordo com as características da área.

37-Abra o bloco de notas ou outro programa similar de sua preferência e crie um arquivo chamado “road.class.dat” (importante que a extensão do arquivo precisar ser “.dat” e não “.txt”).

Este arquivo deve ter a seguinte estrutura, conforme a figura 06:

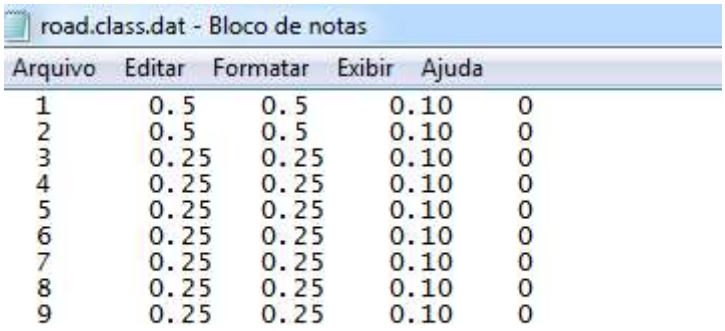


Figura 06: Estrutura do arquivo road.class.dat

As colunas representam respectivamente: A classe da estrada, a largura, a profundidade, o coeficiente de atrito de Manning e coeficiente de infiltração.

Você deverá preenche-lo manualmente de acordo com as características da área.

38-Abra o cgywin e digite: “cd C:/DHSVM/programs” Aperte enter.

39-Agora você irá criar o estado inicial dos canais, para isso você usará o arquivo “MakeChannelState.scr” que está localizado na pasta programs. Este comando tem a seguinte estrutura:

./MakeChannelState.scr <Arquivo stream.network.dat> <Profundidade inicial> <Data Inicial MM:DD.YYYY:hh:mm:ss>

Neste exemplo digite:

“./MakeChannelState.scr streamnetwork.dat 0.25 10.01.1990.03.00.00”

40-Repita para o Raster “soild” os passos realizados com os rasters rainydem, rainymask, rainysoil e rainyveg entre os passos 12 e 16. Ou seja você deve abrir este Raster no ArcGIS, converte-lo para ASCII e depois usando o myconverter no cgywin converte-lo para binário(soild.bin).

41-Vá até a pasta C:/DHSVM/configfiles e abra o arquivo INPUT.rainycr com o TextPad. Você deve preencher corretamente as datas, as localizações dos arquivos e outras configurações iniciais.

42-Vá até a pasta C:/DHSVM/source e extraia o conteúdo do arquivo “dhsvm_2.0.1.tar.gz”.

43-Renomeie a pasta gerada para “dhsvm”.

44-Abra esta pasta e procure pelo arquivo “make” então abra este com o TextPad.

45-Procure por este trecho do código:

```
DEFS =  -DHAVE_X11 -DHAVE_NETCDF

#possible DEFS -DHAVE_NETCDF -DHAVE_X11 -DSHOW_MET_ONLY -
DSNOW_ONLY

CFLAGS =  -g -I/usr/include/sys -I/usr/X11R6/include -I/usr/local/netcdf-3.5.0/include/
$(DEFS)

CC = cc

FLEX = /usr/bin/flex

LIBS = -lm -L/usr/X11R6/lib -lX11 -L/sw/lib -L/usr/local/netcdf-3.5.0/lib -lnetcdf

# possible libs:
```

E substitua-o por este:

```
DEFS =
#possible DEFS -DHAVE_NETCDF -DHAVE_X11 -DSHOW_MET_ONLY -
DSNOW_ONLY
CFLAGS = -g -I/usr/include $(DEFS)
CC = cc
FLEX = /usr/bin/flex
LIBS = -lm
# possible libs:
```

Ou caso deseje usar os gráficos por este:

```
DEFS = -DHAVE_X11
#possible DEFS -DHAVE_NETCDF -DHAVE_X11 -DSHOW_MET_ONLY -
DSNOW_ONLY
CFLAGS = -g -I/usr/include -I/usr/include/X11 $(DEFS)
CC = cc
FLEX = /usr/bin/flex
LIBS = -lm -lX11
```

46-Abra o cgywin e digite: “cd C:/DHSVM/source/dhsvm” Aperte Enter

47-Digite “make” Aperte Enter. Este passo irá compilar o código do DHSVM.

48-No cgywin digite: “./DHSVM C:/DHSVM/configfiles/INPUT.rainycr” este passo irá executar o DHSVM.