



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.11.57-TDI

**DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS DE COBERTURA
DA TERRA EM UMA BACIA DE MESOESCALA NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA E ANÁLISE DE
RESPOSTAS HIDROLÓGICAS SIMULADAS PELO
MODELO DHSVM**

Adriana Koumrouyan

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Dalton de Morisson Valeriano, aprovada em 26 de agosto de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JU3EMB>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.11.57-TDI

**DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS DE COBERTURA
DA TERRA EM UMA BACIA DE MESOESCALA NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA E ANÁLISE DE
RESPOSTAS HIDROLÓGICAS SIMULADAS PELO
MODELO DHSVM**

Adriana Koumrouyan

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Dalton de Morisson Valeriano, aprovada em 26 de agosto de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JU3EMB>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Koumrouyan, Adriana.

K849d Desenvolvimento de cenários de cobertura da terra em uma bacia de mesoescala no bioma Mata Atlântica e análise de respostas hidrológicas simuladas pelo modelo DHSVM / Adriana Koumrouyan. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxii + 144 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.11.57-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Luz Adriana Cuartas Pineda, e Dalton de Morisson Valeriano.

1. Hidrologia. 2. Modelagem hidrológica. 3. Código florestal.
4. Áreas de preservação permanente. 5. Lei de topo de morro.
I.Título.

CDU 556.5:502.5



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre

Dr. Daniel Andrés Rodriguez



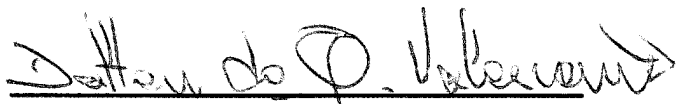
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Luz Adriana Cuartas Pineda



Orientador(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Dr. Dalton de Morisson Valeriano



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Benedito Cláudio da Silva



Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

Dr. Mário Valério Filho



Convidado(a) / UNIVAP / SJC Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS DE COBERTURA DA TERRA EM UMA BACIA DE MESOESCALA NO BIOMA MATA ATLÂNTICA E ANÁLISE DE RESPOSTAS HIDROLÓGICAS SIMULADAS PELO MODELO DHSVM"

Aluno (a): **Adriana Koumrouyan**

São José dos Campos, 26 de agosto de 2015

*“Serra da Mantiqueira
Moldada em rara beleza
Tua Majestade em graça
Brindando a natureza,
Guardas segredos contigo
Não revelados, porém,
Teu encanto e liberdade
Jamais negaste a ninguém,*

*Serra da Mantiqueira
Coando a respiração
Presente verde encanto
doadado sem restrição...*

*Tuas curvas, teus caminhos
Teu verdor tão livre ao léu;
Imponência exuberante
Cochichando algo aos céus...”*

Fátima Fleming

*“Anda!
Quero te dizer nenhum segredo
Falo nesse chão, da nossa casa
Vem que tá na hora de arrumar...”*

*Tempo!
Quero viver mais duzentos anos
Quero não ferir meu semelhante
Nem por isso quero me ferir*

*Vamos precisar de todo mundo
Pra banir do mundo a opressão
Para construir a vida nova
Vamos precisar de muito amor
A felicidade mora ao lado
E quem não é tolo pode ver...*

*A paz na Terra, amor
O pé na terra
A paz na Terra, amor
O sal da...*

*Terra!
És o mais bonito dos planetas
Tão te maltratando por dinheiro
Tu que és a nave nossa irmã*

*Canta!
Leva tua vida em harmonia
E nos alimenta com seus frutos
Tu que és do homem, a maçã...*

*Vamos precisar de todo mundo
Um mais um é sempre mais que dois
Pra melhor juntar as nossas forças
É só repartir melhor o pão
Recriar o paraíso agora
Para merecer quem vem depois...*

*Deixa nascer, o amor
Deixa fluir, o amor
Deixa crescer, o amor
Deixa viver, o amor
O sal da terra”*

Beto Guedes e Ronaldo Bastos

A meus pais, Gregorio e Rosa, às minhas irmãs, Alethea e Alessandra, e aos meus lindos sobrinhos, Pedro e Luiz Felipe.

À querida e alegre prima Lela (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Gratidão ao Cosmos, pela vida e pela sincronicidade dos fatos, pessoas e situações que coloca em meu caminho, fazendo com que eu aprenda mais um pouco da vida a cada dia e saiba, com isso, que tenho cada vez mais a aprender;

A meus pais e irmãs pelo apoio, incentivo e compreensão em todas as decisões tomadas em busca dos meus objetivos, mesmo que isso decorra em muitas ausências físicas, e por me ensinarem com isso que o amor não tem distância e que o mesmo implica em liberdade;

À Dra. Luz Adriana Cuartas Pineda, pela orientação na parte de hidrologia, amizade, disponibilidade, conselhos quando eu queria ir muito além por pura inocência de principiante na área, objetividade e apoio ao longo deste percurso;

Ao Dr. Dalton de Morisson Valeriano, pela orientação na parte de mapeamento e geração de cenários de cobertura, amizade, partilha de ideias para voar além e de conhecimentos em diversas áreas, disponibilidade, tranquilidade, apoio e compreensão em todas as decisões tomadas durante o desenvolvimento desta tese;

À querida amiga e competente colega de modelo, Lívia Alvarenga, a quem recorri com minhas dúvidas e sempre me respondeu com rapidez, boa vontade e simpatia, e ainda por espalhar sua alegria e brilho pelo mundo – o que inclui a mim;

À Francivane Fernandes, minha amiga do coração e meu anjo caboclo, por sempre se fazer presente em minha vida com um olhar vibrante, gentil e amoroso, por maior que seja a distância física;

À querida Paulete, por me ensinar a prática do *Yoga*, o que me ajudou a ser mais equilibrada e calma durante boa parte deste percurso;

Às amigas queridas Ana Tourinho e Lu Carioca pelo incentivo para que eu entrasse neste curso;

Às amigas queridas Tati Baia, Camila Martins, Claudia Parise e Tatiane Felinto, pelo apoio;

Aos colegas e amigos Rita, Juliana, Jussara, Elói, Luiz Felipe, Camille, Eduardo, Guilherme, Alex, Vagner, Grasiela, Fernandinha, Alan, Mila e Aline, pelas trocas de informações, apoio e momentos de descontração vividos;

A todos os membros do Conselho de Curso e do Conselho de Pós-Graduação, pela compreensão nos momentos necessários;

A todos os membros da banca de avaliação desta tese, pela atenção e pelas contribuições;

À Angela Harada, por todo o auxílio técnico e prontidão com todas as minhas indagações, e também a todas as secretárias que passaram pelo curso, em especial à atual, Mariana;

À CAPES, pelo financiamento da bolsa de doutorado durante quase quatro anos e pelos gastos com a ida a campo;

Ao INPE, pela estrutura, oportunidade de desenvolvimento e aprendizado;

Ao arquiteto Romeu Simi Jr. do MPSP, pela disponibilidade e simpatia ao me ensinar a delimitação de APPs em topos de morros e montanhas pelo SPRING;

Ao M.Sc. Paulo César Gurgel de Albuquerque, por ter me acompanhado e ensinado a usar o GPS acoplado ao *Track Maker* na ida a campo, com muita simpatia e boa vontade;

Ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano, pelas conversas elucidativas principalmente sobre os dados TOPODATA e pela disponibilidade e simpatia sempre que solicitado;

Ao Henrique Rennó, pelo auxílio com o Linux e na compreensão do código do modelo quando eu estava adentrando no mundo da modelagem hidrológica;

A todos os demais pesquisadores, funcionários e colegas que tenham me ajudado e que porventura eu tenha me esquecido, sou grata.

RESUMO

Atualmente, existem muitos estudos de modelagem hidrológica distribuída que se utilizam de cenários de uso e cobertura da terra para procurar entender a influência da mudança de uso e cobertura da terra sobre os processos hidrológicos nas bacias hidrográficas. No Brasil, ainda há uma lacuna sobre o conhecimento das consequências hidrológicas que a modificação ou não cumprimento da legislação florestal, especificamente quanto aos topos das elevações, tenha ou possa ocasionar, principalmente em se tratando de bacias hidrográficas de mesoescala. Desta forma, os principais objetivos deste trabalho foram: (I) estabelecer o significado da recente modificação da legislação florestal ocorrida em 2012, por meio da Lei nº 12.651, em relação aos topos das elevações; (II) desenvolver cenários de cobertura pretéritos e futuros com diferentes níveis de degradação florestal; e (III) analisar e comparar as respostas hidrológicas destes cenários de cobertura aplicando o modelo *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM). No total, foram desenvolvidos seis cenários de cobertura, que são, em ordem decrescente de preservação: (i) apresentando a vegetação pristina; (ii) obedecendo as regras da Resolução CONAMA 303/2002, conforme o aqui denominado Antigo Código Florestal (ACF); (iii) combinando as regras da legislação anterior e da nova legislação; (iv) obedecendo as regras da legislação atual, denominada aqui de Novo Código Florestal (NCF); e dois cenários futuros consequentes desta nova legislação, (v) um predominado por pasto e (vi) o outro por agricultura. Para isso, foram delimitadas as Áreas de Preservação Permanente (APPs) de topo de morro e montanha segundo o ACF (Lei nº 4.771 de 1965 – revogada), e também as APPs de topo de elevações segundo os critérios do NCF, para a Bacia do Rio Verde, localizada no sul de Minas Gerais. Os mapas resultantes foram comparados e uma análise de adequação foi realizada para verificar a vegetação atual, cruzando um mapa de cobertura de 2006 baseado em classificação de imagem TM/Landsat com o mapa de APPs do ACF. O modelo DHSVM foi calibrado e validado com o mapa de 2006, que foi considerado como experimento Controle, e então as respostas hidrológicas deste e dos cenários de cobertura foram comparadas. Foi observada uma relação proporcional inversa entre a mudança da área florestada e a vazão no exutório da bacia, e o cenário predominado por agricultura apresentou vazão maior (porém não significativa) que o cenário predominado por pasto, apesar de ambos possuírem a mesma extensão de floresta. Diferenças significativas nos processos hidrológicos em relação ao Controle foram observadas apenas para o cenário de vegetação pristina e o cenário baseado no ACF. Foi concluído que o NCF diminuiu em 99,98% a proteção dos topos de elevações em relação ao ACF e que as consequências hidrológicas podem ser detectadas pelo DHSVM numa bacia de mesoescala.

Palavras-chave: Hidrologia; Modelagem hidrológica; Código Florestal; Áreas de Preservação Permanente; Lei de topo de morro.

DEVELOPMENT OF LAND COVER SCENARIOS ON A MESOSCALE WATERSHED IN THE ATLANTIC RAINFOREST BIOME AND ANALYSIS OF ITS HYDROLOGICAL RESPONSES SIMULATED BY DHSVM

ABSTRACT

There are currently many studies of distributed hydrological modeling that use land use/cover scenarios in an attempted to understand the influence of land use and cover changes on the watershed hydrology. There is still a gap on the hydrological consequences of the modification or non-fulfillment of forest legislation in Brazil, particularly in relation to hilltops at the mesoscale. The main objectives of this work were: (I) to establish the meaning of the recent alteration of hilltops protection status, caused by the change in forestry legislation that followed the review of the Federal Law number 12651 that passed in 2012; (II) to develop past and future land cover scenarios with different levels of forest cover integrity; and (III) to analyze and compare the hydrological responses of these land cover scenarios with the application of the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM). Six coverage scenarios were made, which are, in descending order of preservation: (i) presenting the pristine vegetation; (ii) complying with the rules of CONAMA Resolution 303/2002, called here as Old Forest Code (ACF); (iii) combining the rules of the previous legislation and new legislation; (iv) obeying the rules of the current legislation, called here the New Forest Code (NCF); and two future scenarios resulting from this new legislation, (v) one predominated by pasture and (vi) the other, by agriculture. For this, the Permanent Preservation Areas (APPs) of tops of hill and mountain were delineated according to ACF (Federal law number 4771/1965 – repealed), and also the APPs of hilltops under NCF rules, for the Verde River Basin, located in southern Minas Gerais State. The resulting maps were compared and an adequacy analysis was conducted to verify the present vegetation, represented by a TM/Landsat based land cover map of 2006 as compared to the ACF's APPs map. The DHSVM model was calibrated and validated with the 2006 map, considered as the control experiment, and then the hydrological responses for the control and the land cover scenarios were compared. An inverse proportional relationship between the change of the forested area and the flow in outlet basin was observed, and the agriculture dominated scenario showed greater flow (but not significant) than the pasture dominated scenario, despite having the same forest extent. Significant differences in hydrological processes in relation to the control were observed only for the pristine vegetation and the ACF based scenarios. It was concluded that the current Forest Code decreased hilltop protection by 99.98% in relation to the previous Forest Code, and the hydrological consequences can be detected by DHSVM in the considered mesoscale basin.

Keywords: Hydrology; hydrological modeling; Forest Code; Permanent Preservation Areas; hilltop Brazilian law.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 – Localização da área de estudo.	22
Figura 3.2 – Tipos de solos presentes na Bacia do Rio Verde.	23
Figura 3.3 – Esquema resumido das combinações entre mapas e respectivas resoluções horizontais de células de grade durante o desenvolvimento dos cenários de cobertura da terra relacionados com o CF.	32
Figura 3.4 – Áreas de influência dos cumes sob rede de drenagem convencional, mostradas sobre MDE invertido.	35
Figura 3.5 – Representação do balanço de água em uma célula de grade.	42
Figura 4.1 – Mapa de cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Verde produzido a partir de imagens TM/Landsat-5, de setembro de 2006.	59
Figura 4.2 – APPs em topo de morro e montanha geradas pelo MPSP na escala 1:10.000 e pelo método empregado aqui, na escala 1:250.000.	60
Figura 4.3 – Mapas de APPs em topo de elevação gerados a partir do MDE do Projeto TOPODATA, para o ACF e para o NCF.	61
Figura 4.4 – Mapas dos cenários de cobertura da terra para a Bacia do Rio Verde.	65
Figura 4.5 – MDE em 150 m de resolução espacial, rede de drenagem sobre a máscara com o limite da bacia, e mapa de profundidade do solo na Bacia do Rio Verde.	68
Figura 4.6 – Mapa de classes de solos desenvolvido por meio do descritor de terrenos HAND para a Bacia do Rio Verde.	69
Figura 4.7 – Precipitação acumulada mensal na Bacia do Rio Verde e vazões médias mensais observadas e simuladas na estação Porto dos Buenos da ANA.	71
Figura 4.8 – Vazão média dos meses observada e simulada para o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.	73
Figura 4.9 – Precipitação diária acumulada na Bacia do Rio Verde e vazão média diária observada e simulada na estação Porto dos Buenos da ANA para todo o período analisado.	74
Figura 4.10 – Vazão diária e precipitação dos períodos de cheia de 2006/2007 e 2010/2011.	74
Figura 4.11 – Vazão média mensal simulada para cada cenário de cobertura da terra na estação Porto dos Buenos.	76
Figura 4.12 – Vazão média diária simulada durante os períodos de cheia de 2006/2007 e 2010/2011 para o experimento Controle e cenários de cobertura.	77
Figura 4.13 – Curva de permanência das vazões médias mensais do Controle e cenários de cobertura. A linha do Controle está sobreposta pela linha do cenário NCF.	79
Figura 4.14 – Mapas de saída do DHSVM para evapotranspiração.	81

Figura 4.15 – Evapotranspiração média dos meses simulada para o período de outubro de 2000 a setembro de 2012 na Bacia do Rio Verde.	82
Figura 4.16 – Interceptação e precipitação acumuladas mensais do experimento Controle e dos cenários de cobertura da terra.	84
Figura 4.17 – Escoamento superficial acumulado mensal na Bacia do Rio Verde simulado para o experimento Controle e cenários de cobertura.	86
Figura 4.18 – Percolação média mensal simulada na Bacia do Rio Verde nas três camadas de solo.	89
Figura 4.19 – Percentual de umidade do solo média mensal simulada nas três camadas de solo.	91
Figura 4.20 – Mapas de umidade do solo simulada na camada mais superficial do solo.	92
Figura 4.21 – Mapas de umidade do solo simulada na camada de profundidade intermediária do solo.	93
Figura 4.22 – Mapas de umidade do solo simulada na camada mais profunda do solo.	94
Figura 4.23 – Profundidade média mensal do lençol freático simulada na Bacia do Rio Verde.	95
Figura 4.24 – Mapas de saída do DHSVM para profundidade do lençol freático.	97
Figura 5.1 – Localização e tipo de proteção das principais Unidades de Conservação encontradas na Bacia do Rio Verde.	105
Figura 5.2 – Comparação da evapotranspiração mensal simulada pelo DHSVM (Controle) para a Bacia do Rio Verde e pelo MBG para a Bacia do Rio Grande.	113
Figura B.1 – Resultado do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para as médias mensais de interceptação.	143

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Área de vegetação natural remanescente que ocupa cada município inserido na Bacia do Rio Verde.	25
Tabela 4.1 – Matriz de confusão para validação do mapa de cobertura da terra.	57
Tabela 4.2 – Áreas das classes de cobertura calculadas para a Bacia do Rio Verde.	58
Tabela 4.3 – Extensão e percentual das classes de cobertura da terra presentes nas APPs nos topos das elevações.	63
Tabela 4.4 – Áreas das classes de cobertura presentes no experimento Controle e nos cenários de cobertura da terra.	66
Tabela 4.5 – Parâmetros de solo utilizados na calibração e validação do DHSVM para a Bacia do Rio Verde.	70
Tabela 4.6 – Índices estatísticos resultantes da comparação entre as vazões médias mensais observadas e simuladas.	72
Tabela 4.7 – Valores médios e desvio padrão calculados a partir das médias mensais de vazão resultantes da simulação do experimento Controle e dos cenários de cobertura. 78	78
Tabela 4.8 – PBIAS da vazão média mensal dos cenários de cobertura em relação ao Controle.	78
Tabela 4.9 – Valores das vazões de referência obtidos da curva de permanência das médias mensais para o Controle e cenários de cobertura.	80
Tabela 4.10 – Evapotranspiração percentual simulada na Bacia do Rio Verde para todo o período analisado.	82
Tabela 4.11 – Valores médios de evapotranspiração simulados para a Bacia do Rio Verde.	83
Tabela 4.12 – Valor total de água interceptada pelo dossel superior da vegetação contida na Bacia do Rio Verde para o período de 1º de outubro de 2000 a 30 de setembro de 2012.	85
Tabela 4.13 – Valores médios de interceptação pelo dossel superior simuladas para a vegetação do experimento Controle e cenários de cobertura.	85
Tabela 4.14 – Valores médios e desvio padrão calculados a partir das médias mensais de escoamento superficial resultantes da simulação do experimento Controle e dos cenários de cobertura.	87
Tabela 4.15 – Percolação média simulada nas três camadas de solo.	88
Tabela 4.16 – Percentuais médios simulados de umidade em cada camada de solo.	90
Tabela 4.17 – Valores médios de profundidade do lençol freático simulados na Bacia do Rio Verde.	96

Tabela A.1 – Parâmetros de vegetação utilizados na calibração e validação do DHSVM para cada classe de cobertura presente na Bacia do Rio Verde. 137

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACF	- Antigo Código Florestal (Lei nº 4.771/1965)
ANA	- Agência Nacional de Águas
APA	- Área de Proteção Ambiental
APP(s)	- Área(s) de Preservação Permanente
CF	- Código Florestal
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DHSVM	- <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>
FS	- Fator de Segurança
FSOSMA	- Fundação SOS Mata Atlântica
GEW	- <i>Google Earth Web</i>
HAND	- <i>Height Above the Nearest Drainage</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IGAM	- Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAI	- Índice de Área Foliar
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDT	- Modelo Digital de Terreno
MPSP	- Ministério Público do Estado de São Paulo
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCF	- Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012)
NSE	- Eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i>
PBIAS	- <i>Bias percentual</i>
RMSE	- Erro médio quadrático
SID	- Serviço de Informação e Documentação
SIG(s)	- Sistema(s) de Informação Geográfica
SPG	- Serviço de Pós-Graduação
SPRING	- Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TDI	- Teses e Dissertações Internas
TM	- <i>Thematic Mapper</i>
UC(s)	- Unidade(s) de Conservação
USGS	- <i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	6
1.2. Organização do trabalho.....	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1. Breve histórico da legislação florestal brasileira.....	9
2.2. Estudos sobre a influência da cobertura da terra nas respostas hidrológicas	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Área de estudo.....	21
3.2. Base de dados e softwares utilizados	26
3.3. Mapeamento da cobertura da terra	28
3.4. Cenários de cobertura da terra.....	30
3.5. <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i> (DHSVM).....	41
3.6. Detalhamento dos dados de entrada do modelo hidrológico	45
3.7. Calibração do DHSVM.....	48
3.8. Montagem dos experimentos de modelagem.....	54
3.9. Análises comparativas das simulações	55
4. RESULTADOS.....	57
4.1. Cobertura da terra e parâmetros utilizados	57
4.2. Análise de APPs de topo de elevação.....	60
4.3. Cenários de cobertura para simulação no DHSVM.....	64
4.4. Modelo Digital de Elevação e mapas resultantes.....	67
4.5. Mapa e parâmetros de solo	69
4.6. Calibração e validação do DHSVM.....	71
4.7. Análise da vazão do experimento Controle	72
4.8. Respostas hidrológicas aos cenários de cobertura	75
5. DISCUSSÃO	99
5.1. Cobertura da terra.....	99
5.2. APPs nos topos das elevações e adequação de cobertura da terra.....	99
5.3. Mapas de entrada para o DHSVM.....	102
5.4. Vazão observada e simulada pelo experimento Controle	106
5.5. Respostas hidrológicas aos cenários de cobertura	107
6. CONCLUSÕES	119
6.1. Outras considerações	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
APÊNDICE A – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO.....	137
APÊNDICE B – RESULTADO DE TESTE ESTATÍSTICO	143

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existem muitos estudos de modelagem hidrológica distribuída que procuram entender a influência das mudanças de uso e cobertura da terra sobre as respostas hidrológicas em bacias hidrográficas de diversas escalas (CHU et al., 2010; SAMANIEGO; BÁRDOSSY, 2006). Para isso, muitos se valem de cenários de cobertura da terra, geralmente desenvolvidos a partir de dois ou mais mapas em série temporal que são considerados em modelos de alocação, os quais utilizam matrizes de transição ou regressões logísticas de probabilidade, calculadas a partir de demandas humanas ou variáveis ambientais, como por exemplo, a densidade populacional, a distância a centros urbanos, a geomorfologia, as mudanças climáticas, entre outras, para prever a extensão e localização das mudanças de cobertura (CHU et al., 2010; SAMANIEGO; BÁRDOSSY, 2006; SCHIRPKE et al., 2012; SLEETER et al., 2012; THANAPAKPAWIN et al., 2006; VANSHAAR et al., 2002; YUE et al., 2007; ZHANG et al., 2012).

Os cenários de cobertura podem ainda ser desenvolvidos com base nos critérios da legislação ambiental, como no estudo de Moraes et al. (2005), ou ainda, baseados na modificação destes critérios, que foi o caso aplicado no presente estudo. Neste contexto, o desenvolvimento de cenários de cobertura possibilita que os processos hidrológicos sejam simulados em resposta a mudanças de cobertura da terra em áreas específicas, sendo uma ferramenta útil para tomadas de decisões quanto ao uso do solo nas bacias hidrográficas.

De acordo com revisões de Bruijnzeel (1989; 2004), as respostas hidrológicas às mudanças de cobertura dependem de vários aspectos, sendo as taxas de evapotranspiração e as oportunidades de infiltração os fatores-chave destas respostas. A infiltração dependerá tanto da manutenção da permeabilidade do solo, seja natural ou manejada, como da intensidade do regime de chuvas. A capacidade de armazenar a água infiltrada dependerá geomorfologicamente tanto da profundidade do solo quanto da declividade da bacia. Em geral, há um

aumento inicial da produção total de água provocado pelo desmatamento, que é gradualmente diminuído até atingir a produção de antes do desmatamento, devido ao aumento da evapotranspiração decorrente do crescimento de vegetação secundária ou de vegetação plantada (BRUIJNZEEL, 2004). Nas florestas tropicais, o tempo para normalizar a produção total de água costuma ser de 35 a 40 anos ou mais (DONOHUE et al., 2007; SWANK et al., 1988).

No caso de uma transição floresta-agricultura ou floresta-pastagem cujos solos da bacia sejam erodidos, rasos e compactados, e cuja intensidade das chuvas seja alta durante os períodos úmidos, como muitas vezes ocorre nas regiões tropicais, as respostas rápidas na bacia serão acentuadas devido ao maior escoamento superficial – maiores picos de cheia em resposta a tempestades – e o fluxo de base diminuirá durante os períodos de estiagem, devido à baixa capacidade de armazenamento de água do solo. No entanto, se a cobertura que substituiu a floresta ainda permitir boas condições de infiltração e o solo possuir uma boa capacidade de armazenamento, a taxa de evapotranspiração será a principal responsável pela diferença no fluxo da bacia. O fluxo neste caso tenderá a aumentar, tanto nos picos de cheia quanto durante as épocas de estiagem, já que cultivos agrícolas ou pastagens apresentam menores taxas de evapotranspiração do que florestas (BRUIJNZEEL, 1989; 2004).

Sendo assim, a importância hidrológica das florestas é principalmente suavizar os picos de cheias, em resposta tanto às maiores taxas de evapotranspiração, quanto às maiores oportunidades de infiltração que geralmente são encontradas em comparação com outros tipos de coberturas. Este processo está relacionado principalmente à qualidade da água, uma vez que as taxas de erosão em solos sob florestas geralmente são menores do que em solos sob cultivos agrícolas e pastagens, por exemplo. Isto porque a parte da água precipitada é interceptada pelo dossel florestal, amenizando a quantidade e intensidade da chuva que atinge diretamente o solo (HORTON, 1919, citado por ALLEN; CHAPMAN, 2001).

Nas áreas montanhosas, a topografia exerce influência na maioria das funções, processos e serviços ecossistêmicos (SCHIRPKE et al., 2012), e os topos dos morros e montanhas se constituem em áreas de recarga de nascentes pontuais (PINTO et al., 2004). Desta forma, fica evidente a importância do manejo correto durante a transição do uso e cobertura da terra para o equilíbrio dos processos hidrológicos na produção de água de qualidade.

Dependendo da escala de análise, as respostas hidrológicas também podem ser variadas. Neste trabalho, foram consideradas bacias hidrográficas de mesoescala áreas de captação entre 100 km² e 10.000 km². De acordo com Rodríguez e Tomasella (2015), estudos observacionais mostram que os impactos hidrológicos das mudanças de uso e cobertura da terra em bacias de grande escala sofrem amenização em relação aos impactos detectados em bacias de pequena escala. Os modelos hidrológicos, no entanto, ao utilizar dados pontuais ou de pequenas bacias para detectar sinais na grande escala (SIVAPALAN, 2005), possivelmente superestimam estes impactos. Rodríguez e Tomasella (2015) sugerem que um dos fatores a ser considerado na modelagem hidrológica é o aumento da evapotranspiração relacionado com o crescimento de vegetação secundária nas áreas degradadas abandonadas, que frequentemente é negligenciado.

Na mesoescala, assim como na macroescala, vários processos concomitantes estão envolvidos nas respostas hidrológicas às mudanças de cobertura e, na modelagem hidrológica, há geralmente uma necessidade em aumentar exponencialmente os dados de entrada necessários conforme o aumento na área da bacia hidrográfica a ser simulada (KRYSANOVA et al., 1998), apesar de nem sempre ser o procedimento mais adequado para representar a auto-organização natural das bacias hidrográficas (SIVAPALAN, 2005).

A bacia hidrográfica estudada neste trabalho, a Bacia do Rio Verde, possui relevo montanhoso e uma rede hidrográfica que se constitui em uma das principais contribuintes para o Lago de Furnas, que possui uma barragem onde

funciona uma usina hidroelétrica desde a década de 1960, época em que era o maior reservatório artificial de água no Brasil. Atualmente, é um dos maiores reservatórios de água da região Sudeste, com volume total de $22,6 \times 10^9$ m³ em uma área de aproximadamente 1.440 km². O Lago de Furnas apresenta profundidade máxima de 90 m e média de 13 m (CORGOSINHO; PINTO-COELHO, 2006), e a usina tem capacidade para gerar 1.216 MW de potência (AZEVEDO-SANTOS et al., 2010).

A Bacia do Rio Verde está inserida na Mata Atlântica, bioma com alta biodiversidade e endemismo (MYERS et al., 2000; CARNAVAL et al., 2009), e cuja vegetação nativa se apresenta altamente fragmentada (Fundação SOS Mata Atlântica - FSOSMA em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2014), devido à sobre-exploração e povoamento intensos que vêm ocorrendo há pelo menos dois séculos (DEAN, 1996, p. 206). Os remanescentes de matas nativas, em sua maioria, se encontram em locais de difícil acesso devido à topografia (DEAN, 1996, p. 220). A região do bioma Mata Atlântica coincide em boa parte com o domínio morfoclimático dos “mares de morros”, que se caracteriza por apresentar elevações mamelonizadas dispostas em sucessão maciça (AB’SÁBER, 1964, p. 157) e é o domínio brasileiro mais atingido e menos resistente às ações antrópicas predatórias (AB’SÁBER, 1977). Apesar de não estar localizada no cerne com tipificação máxima deste domínio morfoclimático (AB’SÁBER, 1966), a maior parte da bacia aqui estudada apresenta relevo complexo e alta vulnerabilidade à erosão (OLIVEIRA et al., 2014).

Os impactos que as alterações na cobertura da terra localizadas nos topos das elevações causam nos processos hidrológicos são importantes estímulos a este estudo de simulação espacialmente distribuída, uma vez que recentemente a legislação florestal brasileira foi modificada por meio da aprovação da Lei nº 12.651 de 2012 (BRASIL, 2012), a lei denominada aqui como Novo Código Florestal (NCF). Esta lei substituiu o Código Florestal de 1965 (Lei nº 4.771/1965) (BRASIL, 1965), denominado neste trabalho como

Antigo Código Florestal (ACF). Dentre as alterações decorrentes da substituição do Código Florestal (CF), ocorreram mudanças profundas na delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) em topos de elevações, as quais foram estudadas neste trabalho.

O *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) foi o modelo hidrológico escolhido para simular os efeitos da mudança da cobertura da terra na hidrologia da Bacia do Rio Verde, por comportar a dimensão da mesma e por representar detalhadamente tanto os processos no solo quanto os parâmetros físicos da vegetação (CUARTAS, 2008), além de ter sido originalmente desenvolvido para simulações em regiões montanhosas (WIGMOSTA et al., 1994).

A escolha deste estudo em uma bacia hidrográfica de mesoescala em relevo complexo visou, principalmente, responder às questões:

- a) Qual o significado da alteração do Código Florestal realizada em 2012 em termos de proteção da vegetação nativa nos topos das elevações?
- b) O modelo DHSVM é capaz de detectar os impactos relativos a essa modificação em uma bacia de mesoescala?
- c) As possíveis consequências futuras desta modificação no Código Florestal, prevendo ainda menor área de floresta na região, são detectáveis pelo modelo DHSVM?

As hipóteses deste estudo são que o NCF diminuiu muito a proteção dos topos de morros e montanhas, e que a diminuição das áreas florestadas nestes topos tem impactos hidrológicos detectáveis por simulação em uma bacia de mesoescala.

1.1. Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram: (I) estabelecer o significado da recente modificação da legislação florestal ocorrida em 2012 por meio da Lei nº 12.651, em relação aos topos das elevações; (II) desenvolver cenários de cobertura pretéritos e futuros com diferentes níveis de preservação de cobertura; e (III) analisar e comparar as respostas hidrológicas destes cenários de cobertura aplicando o modelo *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM).

Para atingir estes objetivos gerais, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- i. Delimitar as APPs de topo de morro e montanha de acordo com o ACF e com o NCF e compará-las;
- ii. Mapear a cobertura da terra a partir de uma imagem TM-Landsat de 2006;
- iii. Analisar a cobertura da terra presente dentro das APPs de topo de morro e montanha;
- iv. Desenvolver cenários de cobertura da terra com base nas APPs de topo de elevações de acordo com o ACF e com o NCF;
- v. Calibrar o modelo hidrológico DHSVM para a Bacia do Rio Verde, considerando a cobertura mapeada em 2006 (Controle);
- vi. Rodar o DHSVM para cada cenário de cobertura da terra;
- vii. Analisar as respostas hidrológicas simuladas para o Controle e para os cenários de cobertura.

1.2. Organização do trabalho

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos: o primeiro trata dos aspectos gerais do trabalho, com a introdução ao assunto; o segundo contém uma breve fundamentação teórica; o terceiro é constituído pela descrição das bases de dados e dos métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho; o quarto capítulo apresenta os resultados; o quinto capítulo contém a discussão acerca dos resultados; e o sexto capítulo conclui o trabalho por meio das considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Breve histórico da legislação florestal brasileira

O primeiro Código Florestal (CF) brasileiro foi instituído durante o primeiro governo de Getúlio Vargas em 1934, por meio do Decreto nº 23.793 de 23 de janeiro de 1934 (BRASIL, 1934), devido principalmente à distância cada vez mais longa das cidades às florestas, o que aumentava o custo do transporte de lenha (FERREIRA, 2014). Este CF obrigava os proprietários de terra a manterem um quarto de área de mata em suas propriedades, mas não estabelecia as localizações a serem preservadas, a não ser no raio de 6 km das cabeceiras de cursos d'água no Nordeste Brasileiro, em uma faixa de 20 m ao longo de cada lado das estradas, e em vertentes, onde as matas nativas eram consideradas *florestas protetoras* (BRASIL, 1934), o que posteriormente veio dar origem ao termo Área de Preservação Permanente (APP) (RIBEIRO, 2011).

Uma grande falha deste CF, além de nunca ter sido cumprido, é que este um quarto de mata nativa poderia ser desmatado, desde que substituído por plantações de árvores de qualquer espécie, não importando a diversidade, ou mesmo apenas deixando crescer capoeira (vegetação secundária) em seu lugar. O proprietário podia, ainda, vender este um quarto de mata que restava em sua propriedade, e então o novo proprietário poderia desmatar três quartos desta área, e vender o restante, e assim por diante (DEAN, 1996, p. 277 e 303).

Quando o segundo CF brasileiro foi criado por meio da Lei nº 4.771, em 1965, já restava pouco a ser protegido da Mata Atlântica, principalmente em se tratando de mata nativa virgem. Houve algum avanço em relação ao CF anterior, entre eles: a melhor definição e orientação acerca das distâncias mínimas e da(s) parte(s) das propriedades onde deveriam estar as matas de preservação; a proteção estendida a outros tipos de vegetação, como florestas de galeria e manguezais; a simplificação da classificação das florestas; e a

isenção de tributos sobre as áreas florestadas. Este CF transformou “a quarta parte” em Reserva Legal (RL), sendo agora representada por 20% da área da propriedade, no caso da Mata Atlântica. No entanto, as RLs ainda poderiam ser desmatadas – desde que replantadas com qualquer outra espécie florestal – e vendidas (BRASIL, 1965; DEAN, p. 304-306).

Em 1986, a Lei nº 7.511 proibiu definitivamente o desmatamento em matas nativas e expandiu as larguras das APPs de matas ciliares (BRASIL, 1986). Somente em 1989 a Lei nº 7.803/89 decretou que as RLs deveriam ser recuperadas prioritariamente com espécies nativas (BRASIL, 1989). Em 1998, foi instituída a Lei de Crimes Ambientais, Lei nº 9.605, que passou a permitir a aplicação de multas mais elevadas pelos órgãos de fiscalização ambiental (BRASIL, 1998). Em 24 de agosto de 2001, a Medida Provisória nº 2.166-67 contribuiu na efetiva definição de APPs (BRASIL, 2001):

Art. 1º

§ 2º Para os efeitos deste Código, entende-se por:

II - área de preservação permanente: área protegida nos termos dos artigos 2º e 3º desta Lei, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Quanto às APPs em topos de elevações, a Resolução nº 303 de 2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) veio definir que elevações eram consideradas morros quando seus cumes possuísem “altura de 50 m até 300 m em relação à base e declividade de 17º na linha de maior declive”, e estabeleceu que as bases das elevações seriam o “plano horizontal definido por planície ou superfície de lençol d’água adjacente, ou, nos relevos ondulados, pela cota de depressão mais baixa ao seu redor”. Quanto às montanhas, a altura do cume em relação à base era acima de 300 m. Se uma

elevação se encaixasse na definição de morro ou montanha, seu terço superior era delimitado como APP. Existia ainda, proteção do terço superior em linhas de cumeada (divisores de águas), quando os topos das elevações classificadas como morros ou montanhas encontravam-se até 1000 m de distância entre si. Quando os cumes dos morros ou montanhas se encontrassem a menos de 500 m de distância entre si, a altura da base considerada era a da elevação mais baixa, garantindo assim maior proteção ao conjunto das elevações (CONAMA, 2002).

Com o caráter conservacionista que a legislação foi tomando, os proprietários rurais passaram a se preocupar com a situação de risco jurídico, e desde a década de 1990 uma forte pressão em direção à flexibilização do CF passou a ser exercida pelos grandes proprietários de terras. Portanto, o último CF, a Lei nº 12.651/12, tramitou por pelo menos 12 anos na Câmara dos Deputados antes de ser aprovado em 2012 (FERREIRA, 2014).

A intenção foi aprovar um CF factível de ser cumprido na prática, desta vez, ou ainda, de adequar o CF à realidade encontrada nas propriedades rurais. O tratamento diferenciado aos pequenos proprietários de terras, bem como instrumentos que visam apoiar o cumprimento do CF foram criados, dentre eles: o Cadastro Ambiental Rural (CAR), um registro eletrônico no qual os proprietários rurais devem se cadastrar, que passou a funcionar somente dois anos após o CF ter entrado em vigor; e os Planos de Regularização Ambiental (PRAs), que devem ser realizados por cada estado da federação, e cuja ideia é descentralizar o monitoramento e a fiscalização da recuperação de APPs e RLs. A última atualização encontrada é de que nenhum estado havia apresentado seus PRAs até maio de 2014 (BRASIL, 2012; Centro de Experimentos Florestais SOS Mata Atlântica - CEF-SOSMA, 2014).

Quanto à delimitação de APPs nas elevações, o CF mais recente aplicou as mesmas regras aos diversos tipos de relevos. Aumentou para 100 m a altura mínima do cume em relação à base, e modificou o critério de declividade para

a média de 25° para que o terço superior das elevações seja considerado APP. Além disso, a base em relevos ondulados passou a ser claramente definida como o ponto de sela mais próximo do cume (BRASIL, 2012):

Art. 4º

IX - Topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de 100 (cem) m e inclinação média maior que 25°, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação.

Além de alterar os parâmetros para a demarcação de APPs, o novo CF determinou, por meio do Artigo 63º, que nas áreas rurais consolidadas serão mantidas as culturas de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo e também a infraestrutura para atividades agrossilvipastoris, nos seguintes tipos de APPs: em topos de morros, em encostas com declividade superior a 45°, em altitude superior a 1800 m e em bordas dos tabuleiros ou chapadas (BRASIL, 2012).

2.1.1. Metodologias para demarcação e verificação de APPs em elevações

A demarcação das APPs de topos de elevações em campo demanda intensiva mão de obra para obter os parâmetros necessários para suas delimitações, como a declividade e as bases das elevações. Neste sentido, os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), os dados topográficos digitais e a disponibilização de imagens de satélite atualizadas possibilitaram a delimitação automática das APPs em topo de morro e montanha e seu monitoramento (RIBEIRO et al., 2002, 2005).

A interpretação da Resolução CONAMA nº 303/2002 em relação às bases das elevações em relevos ondulados era um ponto de controvérsia, e sua localização de difícil determinação. Numa tentativa de eliminar tal controvérsia,

Ribeiro et al. (2002) desenvolveram um método baseado em Modelo Digital de Elevação (MDE) hidrológicamente consistente e direção de fluxo invertida, pelo qual podem ser obtidas as áreas de influência de cada cume numa dada região, e passaram a considerar a altura do ponto mais baixo da borda da área de influência como a cota das bases das elevações.

Hott et al. (2004, 2005) desenvolveram um método também baseado em MDE hidrológicamente consistente para áreas maiores, e utilizaram escalas menos detalhadas, de 1:50.000 e 1:250.000. Eles notaram uma diminuição na extensão das APPs conforme a diminuição no detalhamento da escala e na resolução espacial dos dados. Os autores citados acima utilizaram um direcionamento de fluxo único, conhecido como D8, desenvolvido por O'Callaghan e Mark (1984), onde é permitido a uma célula receber o fluxo das oito direções em uma grade 3x3, mas só é permitida a saída do fluxo em uma das oito direções.

Leonardi (2010) desenvolveu um algoritmo de extração automática – dentro do SIG gratuito SPRING (CÂMARA et al., 1996) – para obtenção do terço superior de morros e montanhas, utilizando direcionamento de fluxo multicaminhos, que permite saída de fluxo múltipla e evita direções de fluxo paralelo ao se basear na declividade, para determinar as bases das elevações. Neste algoritmo, a altura da base é a do ponto mais baixo e mais próximo ao cume, coincidindo com o canal de drenagem vizinho. Este critério era utilizado pelo Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) quando o ACF estava em vigor, e foi escolhido aqui para delimitar as APPs em topos de morro e montanha pelo ACF. Leonardi (2010) utilizou Modelo Digital de Terreno (MDT) em escala 1:10.000, a mesma escala que o MPSP trabalha, e ainda não foram encontrados na literatura trabalhos que tenham utilizado este algoritmo em escala 1:250.000.

2.2. Estudos sobre a influência da cobertura da terra nas respostas hidrológicas

A avaliação dos impactos que as mudanças de uso e cobertura da terra causam aos processos hidrológicos continua sendo um desafio para os hidrologistas (BREUER et al., 2009). Inicialmente, os estudos eram experimentais, seja na escala de parcelas, vertentes ou de pequenas bacias hidrográficas (ESHLEMAN, 2004).

Os estudos na escala de bacias hidrográficas datam de aproximadamente 90 anos atrás, como o de Bates e Henry (1928) no estado do Colorado, Estados Unidos (citado por VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001). Eles podem ocorrer de três formas. Uma delas é o método de bacias pareadas, onde uma bacia funciona como controle e outra recebe um tratamento. A dificuldade deste tipo de estudo está em encontrar bacias climática e geomorfologicamente semelhantes (VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001), e também nos custos – ambientais e financeiros – de alguns tipos de tratamentos, apesar de ser possível aproveitar uma situação que esteja ocorrendo independente do estudo. Exemplos de tratamentos seriam o desmatamento, a substituição do tipo de cobertura, e ainda o reflorestamento, entre outros.

A segunda forma de se estudar impactos das mudanças de cobertura sobre a hidrologia das bacias hidrográficas é por meio de estudos retrospectivos, que se utilizam de informações passadas de cobertura da terra e hidrológicas (e.g. vazão). Para detectar os impactos, são utilizados métodos estatísticos que capturem sinais de modificação na hidrologia conforme foram ocorrendo mudanças na cobertura da terra. Como estes sinais frequentemente são menores do que se existisse um experimento controle, este método não está sujeito a um critério científico rigoroso (VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001).

Pode-se ainda, unir estas duas abordagens acima descritas, como é o caso do trabalho de Linhares (2006), que estudou a influência do desmatamento na hidrologia da Bacia do Rio Ji-Paraná (RO), por meio de análise observacional

de mudança de cobertura e resposta hidrológica para um período de 23 anos, usando como controle uma bacia de mesmo porte e na mesma região (Amazônia), na qual praticamente não houve exploração durante o mesmo período.

Apesar das desvantagens ou dificuldades destes dois primeiros métodos de estudos em bacias hidrográficas, eles formaram a base para o conhecimento e desenvolvimento de parâmetros usados nos modelos computacionais fisicamente baseados, que surgiram na década de 1970, e se constituem no terceiro método para realizar estudos acerca das respostas hidrológicas às mudanças de uso e cobertura nas bacias hidrográficas (VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001; ESHLEMAN, 2004). No início, os modelos ainda eram utilizados somente em pequenas escalas devido à pequena dimensão espacial possibilitada pelos recursos de imagens (p. ex., fotografias aéreas) e aos recursos computacionais de menor potência que os atuais, mas permitiram o conhecimento detalhado acerca dos processos hidrológicos envolvidos nas bacias em relação ao uso ou cobertura da terra específicos (ESHLEMAN, 2004).

Com recursos computacionais mais potentes, a crescente disponibilidade de ferramentas como os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) e com a facilidade de acesso a imagens de satélite, tornou-se possível o aumento na área das bacias estudadas, uma vez que o manejo dos recursos hídricos demanda um fortalecimento em pesquisas focadas em bacias hidrográficas maiores. Para isso é necessário saber se os processos estudados em pequena escala possuem a mesma importância em escalas maiores (ESHLEMAN, 2004; KRYSANOVA et al., 1998; SOULSBY et al., 2006).

Segundo Sivapalan (2005), como os processos hidrológicos estão sujeitos a diferentes escalas espaciais, indo desde os processos em “um poro individual do solo, uma folha de vegetação ou uma ravina, para pequenas encostas até grandes bacias hidrográficas”, as quais por sua vez estão sujeitas aos

processos meteorológicos em escala ainda maior, a simulação por modelagem hidrológica torna-se ainda mais complexa. Em geral, os processos verificados em laboratório ou em pequena escala espacial têm sido extrapolados para a modelagem de bacias maiores. Porém, o desenvolvimento de modelos para bacias de médio a grande porte nem sempre deve ser acompanhado pelo aumento na complexidade dos mesmos, uma vez que, nos ambientes naturais, as retroalimentações envolvidas nas interações entre os processos algumas vezes anulam ou minimizam seus efeitos (SIVAPALAN, 2005).

Para aumentar a escala dos estudos, muitas vezes é necessário degradar detalhes dos dados existentes com o intuito de reduzir o tempo de processamento ao rodar os modelos. Armstrong e Martz (2008) estudaram o efeito da redução de detalhes da cobertura da terra (30 m de resolução original de pixel para generalizações de 60, 120, 240, 480 e 960 m) em uma bacia hidrográfica média (125 km²) em região montanhosa e utilizaram um modelo hidrológico semi-distribuído, o *Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes* (SLURP). Eles concluíram que o modelo apresentou pouca diferença nas vazões simuladas para o exutório entre os mapas de cobertura menos detalhados e o mapa original com pixel de 30 m de resolução horizontal.

Atualmente, existem muitos modelos hidrológicos distribuídos para bacias hidrográficas de mesoescala. O *Soil and Water Integrated Model* (SWIM) foi brevemente analisado, e possui módulos baseados no *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e MATSALU (KRYSANOVA et al., 1998). Ele não pareceu adequado a este trabalho por necessitar de divisões em sub-bacias relativamente pequenas e com cobertura da terra com certa homogeneidade. Os dados de vazão disponíveis para a Bacia do Rio Verde a divide em sub-bacias relativamente grandes, e a cobertura da terra na região é altamente heterogênea.

Quanto ao *Water balance Simulation Model* ETH (WaSiM-ETH) (SCHULLA; JASPER, 2007), apesar de ser bom para simular o fluxo de água dentro de

cada célula de grade, não possui um roteamento lateral entre elas, sendo a água diretamente adicionada aos canais de drenagem, o que não é recomendado para áreas montanhosas com relevo complexo (RÖBLER; LÖFFLER, 2010).

O SHETRAN (cujas siglas SHE vem de *Système Hydrologique Européen* e TRAN foi adicionada após a adição de um módulo de transporte de sedimentos) (EWEN et al., 2002), apesar de simular processos hidrológicos para bacias hidrográficas de porte médio, comporta áreas de drenagem de até 5.000 km², e a Bacia do Rio Verde ultrapassa em mais de 1.000 km² esta dimensão. Além disso, representa de forma limitada a vegetação (CUARTAS, 2008).

O DHSVM foi desenvolvido na Universidade de Washington por Wigmosta e colaboradores na década de 1990, com a intenção de unir e detalhar os fenômenos físicos envolvidos no sistema solo-vegetação-atmosfera no nível de bacia hidrográfica. É um modelo paramétrico físico-distribuído (pixel a pixel) para pequenas a médias bacias hidrográficas (5 km² a 10.000 km²) e permite a simulação de um único evento ou de uma série multianual. Este modelo foi criado originalmente com sete módulos que representam os balanços de água e energia: evapotranspiração, acumulação e derretimento de neve, interceptação e evaporação pelo dossel, movimento de água na zona de vadosa, escoamentos superficial e subsuperficial saturado e fluxo de água nos canais de drenagem (WIGMOSTA et al., 1994, 2002). Mais recentemente, a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos na bacia hidrográfica também passaram a ser simulados (DOTEN; LETTENMAIER, 2004; DOTEN et al., 2006).

As primeiras aplicações do DHSVM em trabalhos publicados sobre a influência da cobertura da terra foram estudos de Storck et al. (1998, 1999) e Bowling et al. (2000), em pequenas bacias hidrográficas com climas temperados, tratando sobre os efeitos do corte de florestas sobre a vazão ou acúmulo e derretimento de neve em regiões montanhosas. Os primeiros estudos a utilizarem o DHSVM

com cenários de cobertura para simular os impactos das mudanças de cobertura da terra sobre a hidrologia foram os de VanShaar e Lettenmaier (2001) e VanShaar et al. (2002). Nestes, eles estudaram quatro bacias hidrográficas de pequena a média escala – a menor bacia com 26,9 km² e resolução espacial de 30 m, e a maior bacia com 1.033 km² e resolução espacial de 120 m – na Bacia do Rio Colúmbia. Todos os estudos acima citados foram realizados no Estado de Washington na região do Noroeste Pacífico.

Mais recentemente, o DHSVM tem sido satisfatoriamente aplicado na verificação dos impactos da urbanização de bacias hidrográficas em climas temperados (CUO et al., 2008). Cuo et al. (2009) também utilizaram o DHSVM no Noroeste Pacífico, em um conjunto de 15 bacias hidrográficas vizinhas – com área de drenagem máxima de 8.060 km² e mínima de 178 km² – totalizando uma área de 30.000 km², e estudaram o efeito de um século de mudanças climáticas e de cobertura sobre essa região. Eles desenvolveram um mapa de 1883 baseado em reconstrução de dados históricos sobre a densidade florestal da região, e compararam com os resultados de um mapa de 2002.

Um exemplo de estudo fora das regiões temperadas foi o de Thanapakpawin et al. (2006), que aplicaram o DHSVM para analisar os efeitos da transição floresta-agricultura e agricultura-floresta sobre o regime hidrológico de uma bacia de mesoescala (3.853 km²) no norte da Tailândia por meio do uso de cenários de cobertura da terra desenvolvidos a partir de dois mapas de anos diferentes (1993 e 2000).

Dentre as aplicações no Brasil, Kruk (2008) utilizou o DHSVM acoplado a um modelo de previsões climáticas regional, o Eta, na Bacia do Rio Bocaina (251,36 km² de área de drenagem) na Serra do Mar, e obteve resultados satisfatórios do modelo hidrológico. Cuartas (2008, 2012) utilizou o DHSVM em relevo plano, numa microbacia monitorada no Rio Cuieiras, 60 km ao norte de

Manaus (AM), e observou um bom desempenho quanto à umidade do solo e ao lençol freático, mas limitações quanto às vazões máxima e mínima nas épocas de cheia e de seca, respectivamente. Mais recentemente, Alvarenga (2015) também aplicou o DHSVM em estudo de mudanças de cobertura da terra e climáticas em uma microbacia localizada na cabeceira da Bacia do Rio Grande, na região da Serra da Mantiqueira.

O DHSVM ainda não foi aplicado em uma bacia de mesoescala brasileira das dimensões da Bacia do Rio Verde (6.290 km²), e nem calibrado e validado para um período de mais de dez anos. As respostas hidrológicas frente ao cumprimento ou não da antiga legislação florestal quanto às APPs de topo de morro e montanha, bem como as consequências no regime hidrológico dessa alteração na proteção às matas nativas também ainda não foram simuladas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A região deste estudo localiza-se ao sul do estado de Minas Gerais e fica totalmente inserida no bioma Mata Atlântica (Lei nº 11.428 de 2006) (BRASIL, 2006). A Bacia Hidrográfica do Rio Verde faz parte da Sub-bacia do Rio Grande, a qual, por sua vez, está inserida na Bacia do Rio Paraná. A delimitação da Bacia do Rio Verde aqui considerada foi realizada a partir da estação fluviométrica Porto dos Buenos (45°29'22" W, 21°36'38" S, com área de drenagem de 6.290 km²), da Agência Nacional de Águas (ANA), localizada próximo à entrada do Lago de Furnas. Sendo assim, neste trabalho a bacia não coincide totalmente com a delimitada pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Verde (GD4). A área de estudo pode ser visualizada na Figura 3.1.

Nesta bacia, são encontrados 29 municípios total ou parcialmente inseridos dentro de seus limites. O principal rio encontrado na Bacia do Rio Verde é o que dá nome à bacia, que flui no sentido SE-NO em direção ao Lago de Furnas e cujas nascentes mais altas se encontram a sotavento da Serra da Mantiqueira, próximo à divisa entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

O clima na região de estudo, pela classificação de *Köppen-Geiger*, é do tipo *Cwb* na maior parte da bacia (sul e sudoeste), e *Cwa* em menor parte da bacia (norte e nordeste). Ambos são subtropicais úmidos com inverno seco: a precipitação média costuma ser inferior a 60 mm em pelo menos um mês do inverno. Diferem entre si na temperatura média durante o mês mais quente do ano: a do tipo *Cwb* é inferior a 22 °C, enquanto a do tipo *Cwa* é superior a este valor (SÁ JR., 2009).

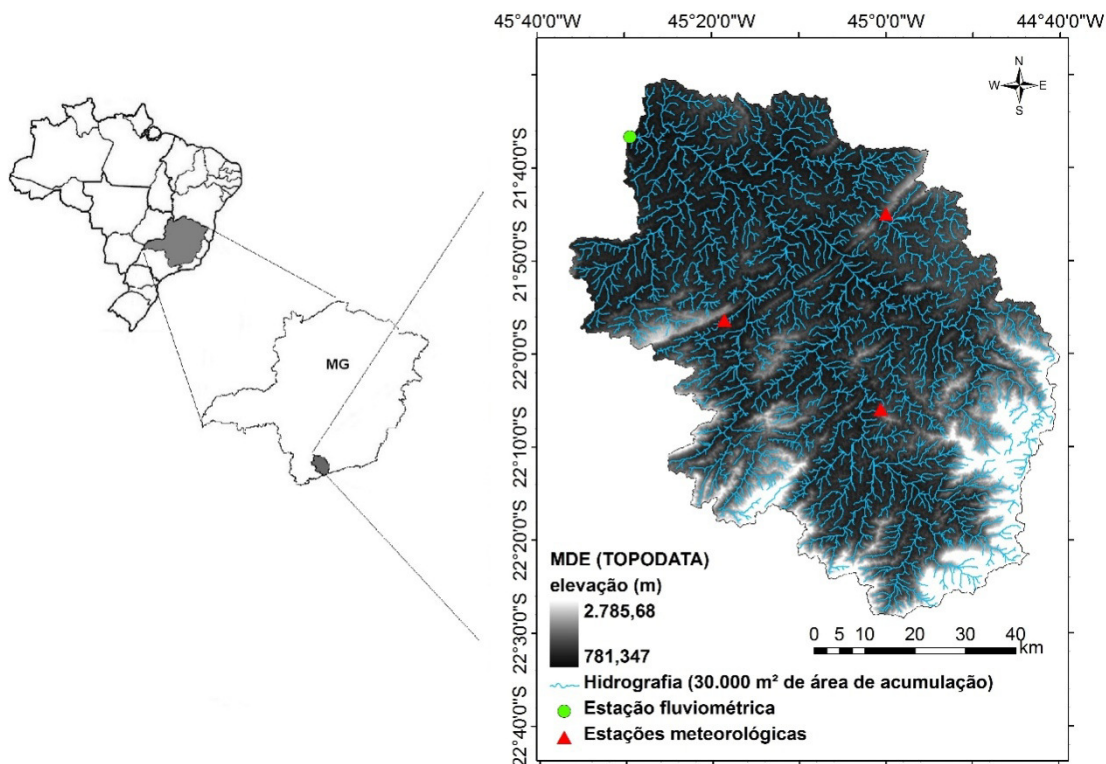


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

Fontes: Altimetria do Projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008); Localização da estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA, 2010); Localização das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013).

Os tipos de solos encontrados são os Neossolos Litólicos húmicos, Latossolos Brunos distróficos, Cambissolos Háplicos distróficos, Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, Latossolos Vermelhos distróficos e Argissolos Vermelho-Amarelos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1999) (Figura 3.2).

Quanto à geologia, a província estrutural da Mantiqueira é um dos principais terrenos Pré-Cambrianos da Plataforma Sul Americana, e formou-se ao final do Neoproterozóico (1.000 Ma a 570/540 Ma). Guarda registro da evolução geotectônica do Neoproterozóico e preserva estruturas paleotectônicas do Arqueano (3.800 Ma a 2.500 Ma), Paleoproterozóico (2.500 Ma a 1.600 Ma) e Mesoproterozóico (1.600 Ma a 1.000 Ma). O litotipo predominante é um biotita-

anfíbólito ortognaisse de composição tonalítica a granítica, com bandamento originado provavelmente de migmatização. A deformação destas rochas é a responsável pelo estiramento de corpos magmáticos diferenciados entre si e pela disposição em camadas paralelas. A foliação gnáissica é orientada entre N-S e NNE-SSW (NOCE et al., 2007; PERES et al., 2004).

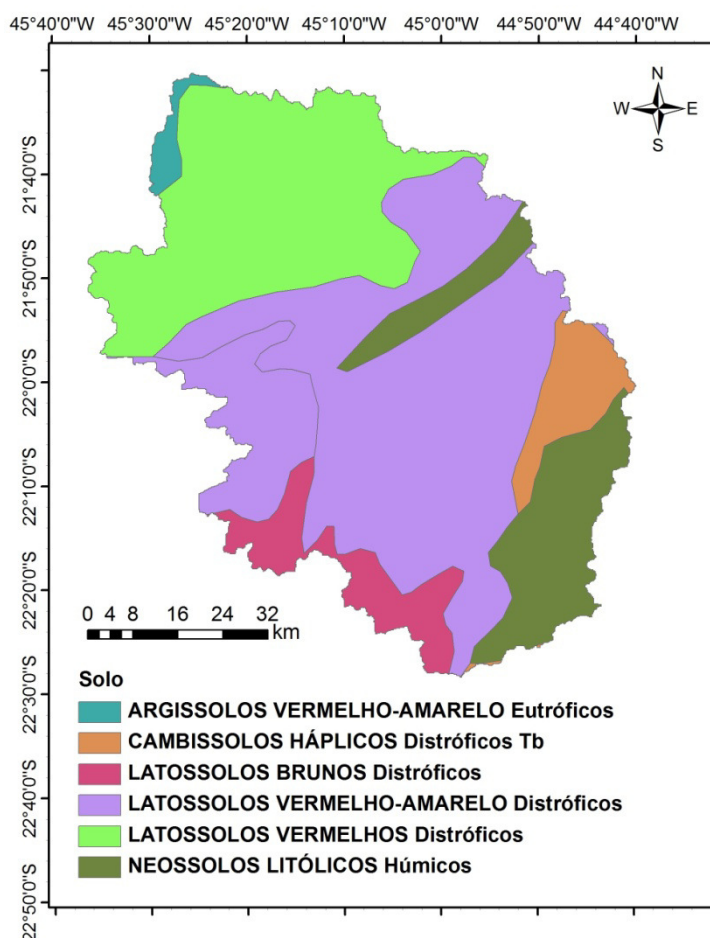


Figura 3.2 – Tipos de solos presentes na Bacia do Rio Verde.

Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999)

A Bacia do Rio Verde fica no domínio morfoclimático dos “mares de morros” (AB’SÁBER, 1977), embora não esteja na área *core* deste domínio. Sua geomorfologia é complexa e, de acordo com Marques Neto e Perez Filho (2014), que a estudaram detalhadamente, seu ponto culminante alcança 2.992 m de altitude, na Pedra da Mina, localizada ao sul da bacia (44°50’34”W,

22°25'39"S). A elevação da foz é de aproximadamente 788 m (CNES/ASTRIUM, 2015).

As variações topográficas e de formação dos solos são em grande parte responsáveis pelas distintas fitofisionomias apresentadas pela vegetação originalmente desenvolvida no sul de Minas Gerais (MEIRELES, 2003), apresentando, em sua formação original, florestas estacionais semidecíduas, florestas ombrófilas densas, abertas e mistas e, acima dos 1.600 m de altitude, encontram-se campos rupestres de altitude (BENITES et al., 2001; 2003; FSOSMA/INPE, 2014; MEIRELES, 2003).

Como a exploração e ocupação da Mata Atlântica ocorrem desde o período colonial e a área de estudo não é uma exceção, a vegetação primitiva encontra-se reduzida a esparsos remanescentes (Tabela 3.1), muitos deles perturbados pelo corte seletivo ou localizados nas áreas mais elevadas devido à dificuldade de acesso (DEAN, 1996, p.59-82; OLIVEIRA-FILHO; MACHADO, 1993). Nestes locais, foram criadas diversas Unidades de Conservação (UCs), das quais a mais extensa é a Área de Proteção Ambiental (APA) da Mantiqueira, localizada nos municípios de cabeceira da bacia (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO, 2013).

Tabela 3.1 – Área de vegetação natural remanescente que ocupa cada município inserido na Bacia do Rio Verde delimitada neste trabalho.

Município	Área Município (ha)	Vegetação Natural (ha)	Vegetação Natural (%)
Aiuruoca	64.968	7.141	11
Alagoa	16.136	2.240	14
Baependi	75.056	7.971	11
Cambuquira	24.638	1.924	8
Campanha	33.559	1.400	4
Carmo de Minas	32.229	2.372	7
Caxambu	10.048	893	9
Conceição do Rio Verde	36.968	2.491	7
Cristina	31.133	2.755	9
Cruzília	52.242	4.104	8
Dom Viçoso	11.392	1.279	11
Elói Mendes	49.954	681	1
Itamonte	43.179	16.567	38
Itanhandu	14.336	2.706	19
Jesuânia	15.385	1.045	7
Lambari	21.311	2.034	10
Monsenhor Paulo	21.654	516	2
Olímpio Noronha	5.463	380	7
Passa Quatro	27.722	6.350	23
Pedralva	21.799	1.267	6
Pouso Alto	26.304	2.490	9
São Gonçalo do Sapucaí	51.669	3.025	6
São Lourenço	5.802	209	4
São Sebastião do Rio Verde	9.085	889	10
São Thomé das Letras	36.975	3.007	8
Soledade de Minas	19.687	1.184	6
Três Corações	82.804	3.507	4
Varginha	39.540	1.258	3
Virgínia	32.652	2.282	7

Fonte: Fundação SOS Mata Atlântica (FSOSMA) em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2014.

Quanto ao histórico recente de uso do solo, a Bacia do Rio Verde possui aproximadamente metade (52% ± 5,2%) de sua área de cultivo representada pela lavoura permanente, sendo que o café tem ocupado em média 92% ± 1,5% desta área considerando o período de 1990 a 2013. Já a área ocupada

pelas plantações de milho ocupa em média $65\% \pm 6,2\%$ do total da área de lavoura temporária. Este uso diverge do território brasileiro, que utiliza $89\% \pm 1,5\%$ para lavoura temporária, e do estado de Minas Gerais, cujas áreas plantadas para lavoura temporária têm ocupado em média $76\% \pm 2,0\%$, do total de área de cultivo, considerando o mesmo período de análise (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2015).

Apesar do IBGE não possuir dados com as áreas de florestas plantadas, possui série histórica anual (1990-2013) para dados de volume de extração vegetal. As médias de produção variam amplamente de ano para ano na região de estudo, e os principais produtos provenientes de eucalipto e pinheiro brasileiro são: lenha ($34.050 \text{ m}^3 \pm 28.074 \text{ m}^3$), madeira em tora ($30.307 \text{ m}^3 \pm 27.915 \text{ m}^3$), e carvão vegetal ($405 \text{ t} \pm 700 \text{ t}$). Os mapeamentos do Inventário Florestal de Minas Gerais, um programa da Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais em parceria com a Universidade Federal de Lavras, também apontam áreas com florestas plantadas na região de estudo.

3.2. Base de dados e softwares utilizados

O sensor de observação da Terra utilizado para o mapeamento da cobertura da terra foi o *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5, órbita/ponto 218/75 e 218/76 das datas: 06 de agosto de 2006 e 21 de setembro de 2011. As bandas espectrais utilizadas foram TM3, TM4 e TM5 e os dados foram obtidos do sítio eletrônico do *U.S. Geological Survey* (<http://glovis.usgs.gov>). O mapa de cobertura da terra foi gerado a partir da imagem de 2006, e a imagem do ano de 2011 foi usada para a aferição em campo.

O mapa da área de aplicação da Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428 de 2006) (IBGE, 2012) com suas fitofisionomias originais estabelecidas por meio do Decreto nº 6.660 de 2008 (BRASIL, 2008), foi utilizado para compor o cenário de cobertura Pristina. O mapa de Unidades de Conservação (UCs) utilizado no desenvolvimento de dois dos cenários de cobertura, explicados mais adiante,

foram adquiridos do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBIO (2013).

Os dados altimétricos utilizados para rodar o modelo hidrológico são da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM - USGS, 2006) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com resolução espacial de 3 arco-segundos (~90 m), e foram aqui degradados para 150 m. Para delimitar as Áreas de Preservação Permanente (APPs), foram utilizados os dados do Projeto TOPODATA, cuja resolução horizontal foi refinada dos dados SRTM, passando de 3 arco-segundos para 1 arco-segundo (~30 m), e a escala de 1:250.000 foi mantida (VALERIANO, 2008).

Os dados meteorológicos diários de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, insolação e velocidade do vento foram obtidos por meio do banco de dados históricos BDMEP do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as estações São Lourenço, Lambari e Lavras. Estes dados foram utilizados para os cálculos das demais variáveis meteorológicas – precipitação, temperatura, umidade relativa, entre outras – necessárias como parâmetros de entrada no modelo hidrológico.

As séries históricas de vazão (2000-2012) da estação fluviométrica Porto dos Buenos, utilizadas para calibração do modelo hidrológico, foram obtidas da ANA, por meio do Portal Hidroweb.

Os principais softwares utilizados foram:

- a) *ArcInfo*, tanto na sua versão *Desktop* (*ArcMap*) – principalmente na delimitação da Bacia do Rio Verde, extração de rede de drenagem e APPs de topo para o Novo Código Florestal (NCF) – bem como na versão *Workstation* (*Arc*) – para geração de arquivo com a profundidade do solo na bacia e de rede de drenagem a ser inserida no DHSVM;

- b) *SPRING*, especialmente no mapeamento da cobertura da terra e na delimitação de APPs em topo de morro e montanha para o Antigo Código Florestal (ACF);
- c) *GPS Track Maker*, no mapeamento dos pontos observados em campo;
- d) *Google Earth Web* (GEW), sobretudo na aferição por interpretação visual do mapa de cobertura da terra e da rede hidrográfica;
- e) ENVI + IDL, para o desenvolvimento do mapa de solo baseado nos ambientes gerados pelo modelo HAND.

3.3. Mapeamento da cobertura da terra

O mapeamento das imagens TM/Landsat-5 foi realizado pelo método de classificação híbrida, adequado para regiões montanhosas (SWAIN, 1978; LINDENLAUB; DAVIS, 1978). Este método consiste basicamente em uma etapa não-supervisionada, onde são extraídas as assinaturas espectrais dos objetos, seguida de uma etapa supervisionada pelo intérprete, que agrupa as classes espectrais em classes temáticas.

Os passos descritos neste item foram realizados separadamente para cada órbita/ponto, sobre as imagens de 2006 e de 2011, com exceção da edição manual, que foi realizada somente sobre a imagem de 2006.

Após o georreferenciamento da cena, a área de estudo foi recortada e as bandas espectrais TM3, TM4 e TM5 passaram por correção atmosférica por subtração do pixel escuro (CHAVEZ JR., 1988). Em seguida, foi realizada a razão entre as bandas TM4 e TM3 (imagem aqui denominada *R4/3*), o que diminuiu o sombreamento provocado pelo relevo e diferenciou solo de vegetação (YOOL et al., 1986). Após aumentar o contraste da imagem *R4/3*, foi realizada uma segmentação detalhada (similaridade = 10 níveis de cinza, área mínima = 8 células, ou 7.200 m²) para ser utilizada como divisora das regiões

das quais foram extraídos os atributos do conjunto de imagens no momento da classificação não supervisionada.

Foi utilizado um modelo linear de mistura espectral (SHIMABUKURO; SMITH, 1991) para produzir imagens dos componentes solo (imagem *MixSolo*), vegetação (imagem *MixVeg*) e sombra (imagem *MixSombra*) a partir das bandas TM3, TM4 e TM5. Os valores da assinatura espectral dos alvos foram obtidos da própria imagem, por meio da escolha de pixels puros.

A etapa não supervisionada foi realizada sobre as imagens *R4/3*, *MixSolo* e *MixVeg*, pelo algoritmo *Isoseg* com limiar de 75% de aceitação, o que gerou mais de 30 classes espectrais em cada cena das duas datas analisadas.

Após este processo, foi realizado o mapeamento das classes espectrais para classes temáticas, por meio de interpretação visual de uma imagem sintética (R5 G4 B3) e do *Google Earth Web* (GEW), quando havia data compatível. As classes temáticas de cobertura foram agrupadas em: (1) Pasto, (2) Agricultura, (3) Floresta, (4) Capoeira, (5) Urbana, (6) Eucalipto, (7) Solo exposto, (8) Água e (9) Afloramento rochoso. Os mapas temáticos de cada cena e mesma data foram então justapostos para formar os dois mapas de cobertura de terra (2006 e 2011). Da classe Água foram retirados os rios e córregos, e permaneceram apenas lagos encontrados na área de estudo, uma vez que o objetivo primeiro deste mapeamento foi rodar o modelo hidrológico, e o mesmo gera a rede de drenagem. Nesse caso a classe Água foi substituída pela classe que estava mais próxima ao corpo d'água, em geral Capoeira e Pasto.

Este método foi aferido em campo no ano de 2012 com uma amostragem de 236 pontos divididos em 20 ninhos sobre o mapa de cobertura de 2011, e aferida uma segunda vez pelo GEW, e obteve concordância global de 75 % e índice *Kappa* de 0,67 sem edição manual. O mesmo método de classificação foi aplicado sobre a imagem de 2006, e sua aferição foi realizada sobre 300 pontos aleatórios por interpretação visual da imagem sintética e com o auxílio do GEW, após a edição manual.

O mapa de cobertura do ano de 2006 foi então utilizado nas análises de comparação da cobertura da terra presente nas APPs de topo para o Antigo Código Florestal (ACF) e para o Novo Código Florestal (NCF). Para entrada no modelo hidrológico, a resolução horizontal deste mapa foi interpolada para 150 m pelo método do vizinho mais próximo, e foi utilizado durante o processo de calibração do modelo.

3.4. Cenários de cobertura da terra

Os cenários de cobertura da terra apresentados neste trabalho são hipotéticos e estáticos, e apresentam diferentes níveis de degradação da vegetação, em sua maioria, relacionados à modificação nos parâmetros para delimitação de APPs nos topos das elevações. Os cenários dos itens *b*, *c* e *d* foram desenvolvidos na resolução de 30 m e depois reamostrados para 150 m para entrada no modelo hidrológico (Figura 3.3).

Os cenários de cobertura desenvolvidos neste trabalho foram:

- a) **Pristina**, que representa uma vegetação intocada e é o mais preservado, onde todas as formações florestais do mapa da Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428 de 2006) (IBGE, 2012) foram agrupadas para a classe Floresta e a pequena área de Savana ou Cerrado do mesmo mapa, que se caracteriza por apresentar árvores mais baixas e espaçadas, foi agrupada para a classe Capoeira;
- b) **ACF**, que aplica os critérios estabelecidos pelo Antigo Código Florestal (Lei nº 4.771/65) em conjunto com a Resolução CONAMA nº 303/2002 para as APPs em topos de morros e montanhas, e é mais preservado que o experimento Controle;
- c) **NCF-RIO**, um pouco mais preservado que o NCF, representando a possibilidade em se considerar a base das elevações como a altura

do ponto de drenagem mais próximo do topo, e não a altura do ponto de sela;

- d) **NCF**, que aplica os critérios estabelecidos pelo Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/12) para a delimitação de APPs em topos de elevações, e é praticamente igual ao experimento Controle;
- e) **NCF-FUT-PAS**, que simula uma cobertura mais degradada que a atual, com as áreas de floresta onde existiam APPs de topos pelo ACF substituídas por pastagem; e
- f) **NCF-FUT-AGRI**, que também simula uma cobertura mais degradada que a atual, com as áreas de floresta onde existiam APPs de topos pelo ACF substituídas por agricultura.

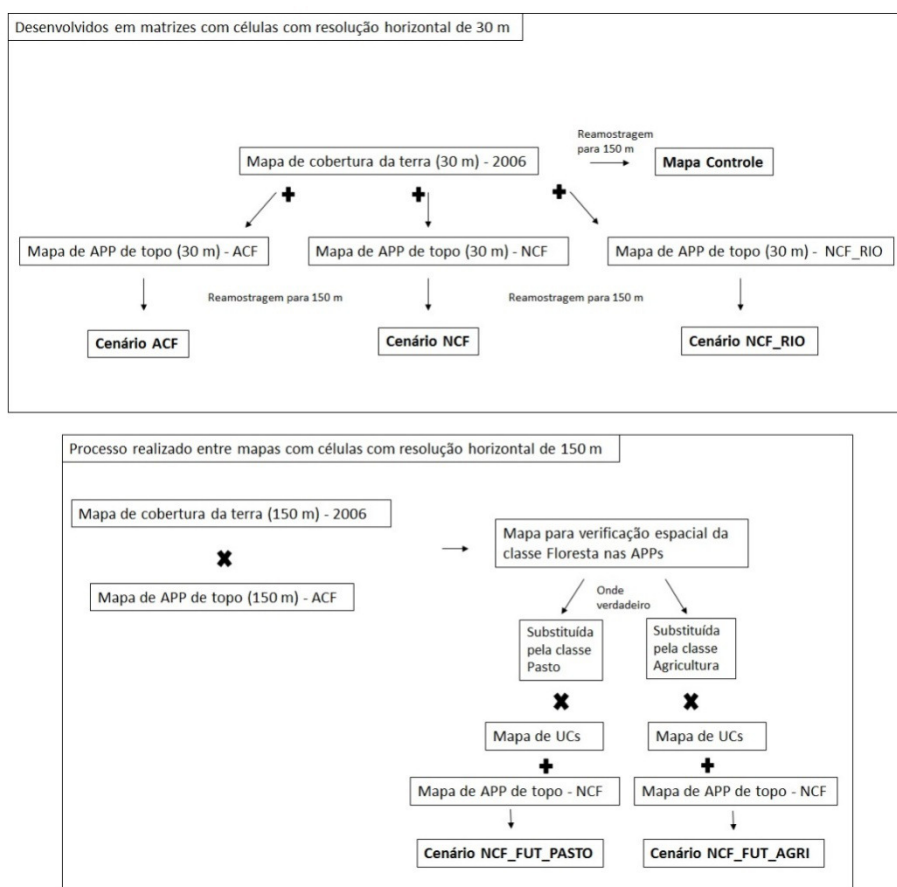


Figura 3.3 – Esquema resumido das combinações entre mapas e respectivas resoluções horizontais de células de grade durante o desenvolvimento dos cenários de cobertura da terra relacionados com o CF.

3.4.1. Cenário Vegetação Pristina

Como descrito no item 3.2, o mapa da área de aplicação da Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428 de 2006) foi utilizado para compor o cenário de cobertura denominado aqui de Pristina. Este mapa foi fornecido em formato vetorial, em escala nacional (1:5.000.000), e convertido em uma matriz com células de grade de 150 m para entrar no modelo hidrológico. Após recortar o mapa para a região de estudo, as fitofisionomias florestais nele contidas foram agrupadas na classe Floresta, e a pequena parte representada com área de Savana, que se caracteriza por apresentar árvores mais baixas e espaçadas, foi considerada aqui como classe Capoeira.

3.4.2. Cenários relacionados ao Código Florestal

Para produzir os mapas dos cenários de cobertura da terra relacionados com o Código Florestal, foi necessário delimitar as APPs de topo de morro e montanha segundo os critérios estabelecidos pelo ACF (em conjunto com a Resolução CONAMA 303/2002) e NCF.

Dois métodos foram combinados: o de Hott et al. (2005) e o desenvolvido por Leonardi (2010). Isto possibilitou a extração automática de topos no SPRING a partir de um MDE em escala 1:250.000 para toda a área da Bacia do Rio Verde, de acordo com a Resolução CONAMA nº 303/2002. O método completo de Leonardi (2010) não foi realizado principalmente pela necessidade em se obter os pontos cotados dos cumes das elevações como parâmetros iniciais para geração de isolinhas, o que foi proporcionado pela inversão do MDE (Ribeiro et al., 2002; Hott et al., 2005). Já pelo método completo de Hott et al. (2005), não seria possível considerar as bases das elevações como a hidrografia vizinha, como recomenda o MPSP, além deles utilizarem direcionamento de fluxo D8, e não multicaminhos. O mapa resultante foi utilizado no cenário de cobertura de acordo com a Lei nº 4.771/65 (ACF).

Já para a Lei nº 12.651/12, foi aplicado o método de Hott et al. (2005) para delimitar APPs em topos de morro e montanha – sem contemplar linhas de cumeada – atualizando os parâmetros em acordo com o CF em vigência, como já publicado por Oliveira e Fernandes Filho (2013). O mapa gerado foi utilizado no cenário de cobertura referente ao NCF.

Assim, dois mapas com as APPs em topos de elevações foram produzidos – um para o ACF e outro para o NCF. As linhas de cumeada (segmentos de 1000 m) – parâmetro estipulado pela Resolução nº 303/2002 do CONAMA – não foram consideradas, pois o método de extração automática de topos do SPRING delimita os morros e montanhas separadamente, a partir dos cumes (LEONARDI, 2010). O NCF também não contempla linhas de cumeada, até

porque geralmente não existem mais APPs em elevações próximas o suficiente para delimitá-las.

Foi também produzido um mapa de APP alternativo e que preserve um pouco mais a vegetação em topos de morro e montanha, denominado aqui como NCF-RIO. Este mapa se caracteriza por manter a determinação do NCF quanto ao parâmetro de altura do cume em relação à base de no mínimo 100 m e declividade maior que 25° para o terço superior da elevação ser delimitado como APP. No entanto, a altura de base considerada não foi a do ponto de sela, mas sim a do canal de drenagem mais próximo ao cume.

Os outros dois cenários relacionados ao CF são possibilidades consequentes da mudança na legislação. O cenário NCF-FUT-AGRI representa a possibilidade de toda a cobertura da classe Floresta, que estava efetivamente presente nas APPs em topo de morro e montanha segundo o ACF, ser substituída pela classe Agricultura, enquanto o cenário NCF-FUT-PASTO, representa a possibilidade de esta mesma área ser ocupada pela classe Pasto.

Mais detalhes acerca do desenvolvimento dos cenários de cobertura seguem nos próximos itens.

3.4.2.1. APPs em de topo de elevações para o Novo Código Florestal

O mapa de APPs em topo de elevações resultante dos procedimentos descritos a seguir foi gerado para compor o cenário de cobertura da terra denominado de NCF. A parte do método de Hott et al. (2005) que vai até a identificação das APPs em topos de elevações, sem considerar as linhas de cumeada e alterada para os parâmetros do NCF, consiste basicamente no procedimento das seguintes operações:

- a) Aquisição de um MDE hidrologicamente consistente, por meio do preenchimento de depressões espúrias;

- b) Inversão do MDE gerado no passo anterior por meio da subtração deste por um valor de altitude que seja maior que a altitude mais alta encontrada na região de estudo;
- c) Obtenção da direção de fluxo do MDE invertido e delimitação das microbacias de drenagem dessa direção de fluxo invertida, resultando que os limites dessas bacias invertidas são como uma malha de drenagem totalmente interconectada (Figura 3.4), ou as áreas de influência das elevações;

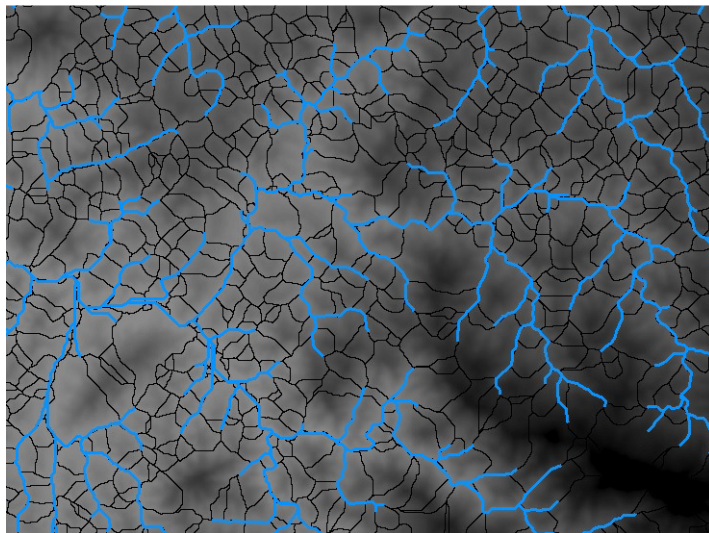


Figura 3.4 – Áreas de influência dos cumes (linha preta) sob rede de drenagem convencional (linha azul), mostradas sobre MDE invertido (as partes mais claras representam menor altitude).

- d) Transformação da malha com as áreas de influência dos cumes em pontos vetoriais, que são interpolados com o MDE original e então a altura em cada ponto é obtida, sendo o valor máximo (maior altitude) encontrado em cada borda da área de influência, o ponto de sela;

- e) Inferência da altura dos cumes das elevações, considerando a altitude máxima encontrada na zona interna de cada área de influência, seguida de transformação em pontos vetoriais e interpolação destes com o MDE original;
- f) Geração de uma tabela de proximidade entre os pontos vetoriais dos cumes e dos limites das áreas de influência, na qual somente o ponto de sela mais próximo de cada cume seja listado, possibilitando o posterior cálculo da diferença de altitude entre os cumes e seus respectivos pontos de sela mais próximos;
- g) Identificação das áreas de influência pertencentes a cumes com altura mínima de 100 m em relação à base e com declividade média de 25°;
- h) Cálculo da diferença entre a altitude de cada célula do MDE e a altitude da base (imagem *MDE Mínimo*), seguido do cálculo da variação da altitude (imagem *Variação*) nestes locais por meio de estatística zonal;
- i) A APP de topo de elevação é então definida pela retirada dos dois terços inferiores das elevações, por meio da divisão entre as imagens *MDE Mínimo* e *Variação* ($MDE\ Mínimo / Variação \geq 0,667$), restando o terço superior (os 0,333 restantes) de cada elevação na parte central das bases.

3.4.2.2. APPs em topo de morro e montanha para o Antigo Código Florestal (ACF)

Esse processo foi desenvolvido com a finalidade de compor o cenário de cobertura da terra denominado ACF. Para a delimitação do terço superior dos topos pelo ACF, foram aproveitados os itens *a*, *b*, *c* e *e* do Item 3.4.2.1. A base dos morros e montanhas para a delimitação de acordo com o ACF foi considerada como a altura do ponto da drenagem mais próximo à elevação, sendo necessários dados com os canais de drenagem. Como os dados de

hidrografia disponibilizados pela ANA e pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) são grosseiros para a finalidade deste trabalho, foi gerada uma rede de drenagem a partir dos dados TOPODATA.

A rede de drenagem foi extraída pelo método de O'Callaghan e Mark (1984), que segue o direcionamento em oito direções de fluxo (D8). O limiar de área acumulada para o início das drenagens de cabeceira foi de 30.000 m², e pode ser visualizada juntamente com a área de estudo, na Figura 3.1. Este parâmetro foi escolhido após algumas tentativas, sendo o que apresentou melhor concordância com a hidrografia visualizada por meio do GEW.

A partir do MDE, foram geradas isolinhas equidistantes a cada 10 m verticais e a grade triangular a partir dos pontos cotados usando a rede de drenagem como linha de quebra. Feito isto, foi possível delimitar de forma automática o terço superior das elevações que se enquadram como morros ou montanhas de acordo com o ACF (altura mínima de 50 m em relação à base e declividade máxima superior a 17°), utilizando como altura de base a do ponto do canal de drenagem mais próximo ao cume.

Foi necessário obter dados de referência para comparar a delimitação dos terços superiores dos morros e montanhas para o ACF, uma vez que ainda não existe análise publicada na escala 1:250.000 utilizando o algoritmo automático de extração de topos do SPRING. Os dados de referência foram produzidos por especialistas do Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) (2012), em uma área que também possui relevo montanhoso, localizada no município de São José dos Campos, estado de São Paulo.

As análises do MPSP (2012) foram realizadas na escala 1:10.000 por meio do algoritmo de extração de topos em modo automático e também não consideraram as linhas de cumeada conforme a Resolução CONAMA nº 303/2002.

Além da diferença de escala entre as APPs de topo de morro e montanha delimitadas aqui e pelo MPSP, há a diferença nos métodos de obtenção: (1) da altura dos cumes, (2) da altura da base e (3) do próprio MDE. As análises do MPSP utilizaram pontos cotados dos cumes por meio de cartas topográficas, enquanto aqui estes foram inferidos a partir do MDE, como descrito nos passos *a*, *b*, *c* e *e* do item 3.4.2.1. Quanto à altura da base, o MPSP usou a rede de drenagem do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo, e no presente trabalho foi utilizada uma rede de drenagem gerada por geoprocessamento, como já descrito acima. Quanto ao MDE, o do MPSP foi gerado a partir das isolinhas equidistantes a cada 10 m verticais contidas nas cartas topográficas, enquanto neste trabalho foi utilizado o TOPODATA.

Assim, o procedimento descrito acima para delimitação de APPs de acordo com o ACF foi realizado na mesma área do município de São José dos Campos e a área resultante foi comparada com o mapa gerado pelo MPSP (2012), para referência.

3.4.2.3. Cobertura da terra presente nas APPs em topo de elevações

A análise da cobertura da terra presente nas APPs de topo de morro e montanha, realizada em matriz de células com resolução horizontal de 30 m, ocorreu para complementar a compreensão do significado da mudança da legislação florestal para estas APPs. O fato da água presente nos canais de drenagem não ter entrado para a classe de cobertura Água, como já explicado no item 3.3, não assume importância nesta análise, uma vez que nos topos das elevações não há presença de drenagem.

Para o mapa de APPs de topos segundo o ACF, foi possível realizar também análise de adequação dos tipos de cobertura presentes nessas APPs. Como o NCF permite a criação de gado, o plantio de espécies exóticas e cultivos perenes, esta análise de adequação não foi realizada sobre o mapa de APPs de topo de elevação para esta versão mais recente do CF.

Para ambos os mapas de APPs em topo de elevações (ACF e NCF), foi realizada uma tabulação cruzada com o mapa de cobertura de 2006, e então foram feitos os cálculos de áreas por meio das tabelas geradas para verificar a extensão e a representatividade de cada classe de cobertura dentro das APPs.

Antes das análises, foi importante verificar se as células de grade entre as camadas coincidiam exatamente uma sobre a outra. Em caso negativo, as imagens não coincidentes foram georreferenciadas.

3.4.2.4. Delimitação alternativa de APPs em topo de morro e montanha

Esta delimitação foi realizada com o intuito de compor o cenário NCF-RIO. O processo foi seguido como descrito no item 3.4.2.2, com a diferença que a altura mínima entre o cume e a base da elevação foi de 100 m e a declividade média foi maior que 25°, para que seu terço superior fosse delimitado como APP. A finalidade do desenvolvimento deste mapa foi gerar um cenário um pouco mais preservado do que o NCF.

3.4.2.5. Combinação dos mapas de APPs com o mapa de cobertura

A junção entre os mapas de APPs com o mapa de cobertura foi necessária para desenvolver os cenários de cobertura da terra relacionados com o Código Florestal. Aqui também é importante ressaltar que as imagens cujas células de grade não coincidiram exatamente uma sobre a outra, quando comparadas entre as camadas, foram georreferenciadas.

Uma característica de imagens temáticas é receber um valor inteiro para cada classe temática. Tanto o mapa de cobertura da terra quanto os mapas de APPs possuem essa característica. Sendo assim, essas junções foram realizadas por meio de multiplicações entre os dados gerados e reclassificações posteriores, uma vez que cada classe de cobertura recebeu um valor (valores de 1 a 9, correspondentes às classes citadas no item 3.3).

Nos mapas de APPs, as áreas com APP receberam o valor 100, e as áreas sem APP receberam o valor 1, para garantir que onde não existisse APP a classe de cobertura permanecesse a mesma no ato da multiplicação. Posteriormente à multiplicação entre camadas, os mapas foram reclassificados, onde os valores na ordem das centenas (100, 200, 300 ... 900, ou seja, a cobertura estava inserida em APP) receberam o valor correspondente à classe Floresta (valor 3, no caso).

3.4.2.6. Cenários futuros decorrentes da aplicação do NCF

Os possíveis cenários de cobertura da terra consequentes do NCF, NCF-FUT-AGRI e NCF-FUT-PASTO, foram desenvolvidos a partir da edição do mapa de cobertura de 2006, dos mapas de APPs pelo ACF e NCF e de um mapa das Unidades de Conservação (UCs). Os mapas resultantes apresentam maior nível de degradação vegetal que o Controle (mapa de 2006).

Os mapas com as APPs em topos de morro e montanha do ACF foram primeiramente cruzados com o mapa de cobertura da terra. Nas áreas dessas APPs em que havia efetivamente a classe Floresta, as mesmas foram substituídas pela classe Agricultura em um mapa (NCF-FUT-AGRI), e por Pasto em outro mapa (NCF-FUT-PASTO), sobre o mapa de cobertura de 2006.

Feito isto, foi utilizado o mapa com a localização das UCs para que nestas áreas não houvesse alteração de cobertura em relação ao mapa de 2006. A estes mapas gerados, foram acrescentadas as APPs em topo de elevações do NCF (como classe Floresta).

Esse procedimento também foi realizado por meio de multiplicações entre imagens e posteriores reclassificações, tal como no item 3.4.2.5, as quais ocorreram na resolução horizontal final para entrada no modelo hidrológico, ou seja, com células de grade de 150 m.

3.5. *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM)*

O DHSVM é um modelo paramétrico, físico-distribuído, baseado em equações que resolvem, em cada célula de grade e a cada passo de tempo, o balanço de água e energia na bacia hidrográfica. Ele pode ser usado em bacias de pequeno a médio porte (micro a mesoescala), com uma capacidade de simular os fenômenos físicos em bacias de 5 a 10.000 km². Em bacias pequenas (até 100 km²), normalmente é utilizada uma resolução horizontal do pixel de 10 a 30 m, enquanto que em bacias médias, a resolução da célula pode chegar até 150 m, caso deste estudo. Quanto ao passo de tempo, pode ser utilizado desde o horário até o diário (WIGMOSTA et al., 1994), sendo que o último foi aqui utilizado.

Os dados do MDE são utilizados para o controle topográfico da radiação de onda curta absorvida, da precipitação, da temperatura do ar e do movimento da água. A cobertura da terra e as propriedades do solo também utilizam a resolução do MDE, sendo que o DHSVM simula até duas camadas de vegetação, que podem apresentar fração úmida (a fração da precipitação interceptada pelo dossel) e fração seca. Ele considera que o dossel superior pode ocupar uma fração da célula, enquanto o estrato inferior ocupa sempre toda a célula, quando existente.

Desta forma, cada célula de grade pode apresentar dossel superior e inferior, além de tipo de solo, diferentes. Assim, o DHSVM integra os sistemas solo-vegetação-atmosfera em cada célula (Figura 3.5), sendo que cada uma delas é interligada por transporte das camadas superficial e subsuperficial saturada, num esquema quase tridimensional (WIGMOSTA et al., 1994; 2002). O balanço geral de água no sistema solo-vegetação é dado pela equação:

$$\sum_{j=1}^{ns} \Delta S_{Sj} + \Delta S_{io} + \Delta S_{iu} = P - E_{io} - E_{iu} - E_s - E_{to} - E_{tu} - P_{ns} \quad (3.1)$$

Onde n_s representa o número de camadas de solo, ΔS_{Sj} é a variação no armazenamento de água no solo, ΔS_{io} e ΔS_{iu} são as variações de água armazenada nos estratos superior (*overstory*) e inferior (*understory*), respectivamente; P é o volume da precipitação, E_{io} e E_{iu} são a evaporação da interceptação nos estratos superior e inferior, respectivamente; E_s é a evaporação do solo, E_{to} e E_{tu} são a transpiração dos estratos superior e inferior, respectivamente; e P_{ns} é a percolação (movimento vertical descendente) da zona de raízes mais profunda, a qual recarrega o lençol freático.

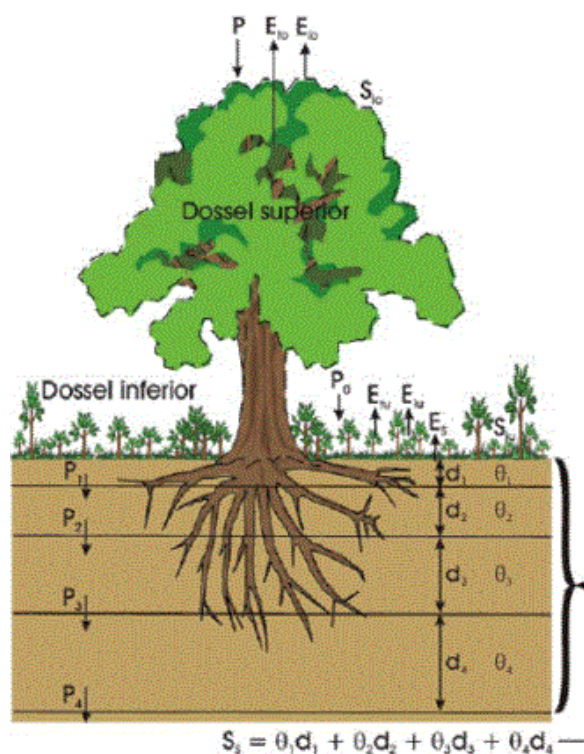


Figura 3.5 – Representação do balanço de água em uma célula de grade. P_4 representa, aqui, a percolação para o lençol freático.

Fonte: Cuartas (2008), adaptada de Wigmosta et al. (1994).

A precipitação, a temperatura e pressão de vapor do ar, a radiação solar, a velocidade e direção do vento, também são determinadas para cada ponto de grade a uma altura de referência sobre o dossel superior especificada pelo usuário, sendo usada aqui a altura de 30 m. O modelo utiliza o método de *Penman-Monteith* para o cálculo da evapotranspiração da vegetação, sendo

que o dossel superior pode demandar água das camadas mais profundas do solo, enquanto o estrato inferior capta água somente da camada mais superficial do solo. Abaixo, segue uma descrição mais detalhada acerca dos principais processos hidrológicos simulados pelo DHSVM.

3.5.1. Evapotranspiração

No modelo considera-se que a evaporação, tanto do solo como da água interceptada pela vegetação, ocorre à taxa máxima (evaporação potencial), sendo calculada pelo método de *Penman*. A interceptação da precipitação pela vegetação é calculada por um módulo na sub-rotina de evapotranspiração do DHSVM. Ele calcula a capacidade máxima de interceptação, a partir do Índice de Área Foliar (LAI), para cada um dos dois estratos da vegetação. Quando esta capacidade é atingida, a precipitação passa diretamente através dos dosséis, chegando ao solo.

Para a transpiração da vegetação é utilizado o método de *Penman-Monteith*, para cada estrato, no qual são adicionados termos para condutância do dossel ao método de evaporação de *Penman*:

$$ET = \frac{\Delta(K + L - G) + \rho_a c_a C_{at} e_a^* (1 - W_a)}{\rho_w \lambda_v [\Delta + \gamma(1 + C_{at}/C_{can})]} \quad (3.2)$$

Onde Δ é a declividade da curva de pressão de vapor, K é a radiação líquida de onda curta, L é a radiação líquida de onda longa, G é o fluxo de calor líquido do solo, ρ_a é a densidade do ar, c_a é o calor específico do ar, C_{at} é a condutância atmosférica, e_a^* é a pressão de vapor do ar, W_a é a transferência turbulenta, ρ_w é a densidade do ar úmido, λ_v é o calor latente de vaporização, γ é a constante psicrométrica, e C_{can} é a condutância do dossel.

A condutância do dossel é dependente da espécie vegetal, da temperatura do ar, do déficit de pressão de vapor e do fluxo de Radiação Fotossinteticamente Ativa, e calculada separadamente para cada estrato de vegetação.

3.5.2. Movimento de água no solo

O DHSVM simula o movimento de água no solo em multicamadas, sendo que a superfície do solo pode receber água da precipitação ou por escoamento superficial das células adjacentes, e a capacidade máxima de infiltração – definida pelo usuário – é quem determina a profundidade em que a água pode infiltrar a cada passo de tempo. A quantidade de água em excesso torna-se escoamento superficial e migra para a célula vizinha mais baixa no passo de tempo seguinte. Como cada estrato de vegetação pode capturar água de uma ou mais camadas do solo, a captura de água via transpiração é inicialmente calculada para cada dossel em cada camada de solo. A evaporação, no entanto, fica restrita à camada mais superficial do solo.

Os cálculos do balanço hídrico que o DHSVM atualmente utiliza para estes parâmetros são apresentados detalhadamente no trabalho de Wigmosta et al. (2002). O balanço geral de massa para as camadas superior, intermediária e inferior são representadas pelas equações:

$$d_1(\theta_1^{t+\Delta t} - \theta_1^t) = I_f - Q_v(\theta_1) - \sum_{j=1}^2 f_{rj1} E_{tj} - E_s + V_{ex2} - V_{ex1} \quad (3.3)$$

$$d_k(\theta_k^{t+\Delta t} - \theta_k^t) = Q_v(\theta_{k-1}) - Q_v(\theta_k) - \sum_{j=1}^2 f_{rjk} E_{tj} + V_{exk+1} \quad (3.4)$$

$$d_{ns}(\theta_k^{t+\Delta t} - \theta_k^t) = Q_v(\theta_{ns-1}) + (Q_{Sin}^t - Q_S^t)\Delta t \quad (3.5)$$

Onde d_k é a espessura da camada, θ_k é a umidade média da camada k , I_f é o volume da água infiltrado durante o passo de tempo, Q_v é a percolação (volume da água transferido na direção descendente) para a próxima camada, f_{rjk} é a fração de raízes na camada de vegetação j na camada do solo k , V_{exk} é o volume da água devido à ascensão do lençol freático, E_s é o volume de umidade do solo evaporada da camada superficial e Q_{Sin}^t e Q_S^t são,

respectivamente, os volumes do fluxo lateral na zona saturada que entram e saem da coluna do solo no início do intervalo de tempo.

A percolação é calculada pela Lei de *Darcy*, assumindo um gradiente hidráulico unitário, com a equação de *Brooks-Corey* para calcular a condutividade hidráulica. Esta, por sua vez, depende da porosidade, tamanho dos poros e umidade residual do solo.

O fluxo subsuperficial saturado (lençol freático) ocorre célula a célula, por aproximação cinemática, no caso de encostas íngremes com solos finos e permeáveis, onde o gradiente hidráulico deve ser aproximado pela declividade da superfície do solo; ou por difusão, no caso de relevo plano, quando o gradiente hidráulico deve ser aproximado pela declividade local do lençol freático.

Uma descrição mais detalhada do DHSVM pode ser obtida em Wigmosta et al. (1994; 2002) e nas teses de Cuartas (2008) e Kruk (2008).

3.6. Detalhamento dos dados de entrada do modelo hidrológico

3.6.1. Topografia, profundidade do solo e rede de drenagem

A delimitação da Bacia do Rio Verde na resolução de 150 m foi extraída a partir dos dados SRTM originais, cuja resolução horizontal é de aproximadamente 90 m. A resolução horizontal de 150 m é máxima permitida pelo DHSVM, e foi escolhida porque possibilitou que uma maior largura de canais fosse representada durante o processo de geração de drenagem por meio de um algoritmo de pré-processamento do modelo, e no qual as larguras e profundidades dos canais devem ser configuradas de acordo com o ordenamento dos canais e as características de rede de drenagem da área de estudo.

A área acumulada que melhor representou o regime de vazão foi uma de 850.000 m², no caso deste tamanho de célula de grade. Áreas de acumulação

menores resultaram em séries de vazão média diária de ordem de grandeza pelo menos 100 vezes mais baixas que as observadas, devido ao extremo detalhamento da rede de drenagem.

A profundidade do solo na bacia também foi testada durante a pré-calibração. O modelo não permite a profundidade mínima de 0 m (zero), mesmo que a bacia possua afloramento rochoso, uma vez que as raízes da vegetação só podem chegar até a profundidade mínima estabelecida. Após vários testes, a profundidade mínima escolhida neste trabalho foi de 2,5 m e a profundidade máxima, 10 m.

3.6.2. Mapas de cobertura

A resolução horizontal do mapa de cobertura da terra de 2006, cujo desenvolvimento foi explicado no item 3.3, foi reamostrada pelo método do vizinho mais próximo, passando de células de grade de 30 m para células de 150 m. Este mapa foi utilizado durante o processo de calibração e validação do DHSVM para a área de estudo, fazendo parte do experimento Controle.

Para os cenários de cobertura, a resolução horizontal em que foram desenvolvidos está descrita em seus itens correspondentes. As rodadas do DHSVM com os cenários de cobertura se iniciaram em 1º de setembro de 2000, a partir do estado (interceptação, umidade do solo e vazão nos canais) em que se encontrava o experimento Controle nesta data. Como as análises hidrológicas se iniciam neste trabalho a partir de 1º de outubro de 2000, as simulações das respostas hidrológicas dos cenários ocorrem como se a mudança na cobertura da terra tivesse ocorrido há um mês.

3.6.3. Mapa com os tipos de solo

O mapa de solos utilizado foi desenvolvido por meio do modelo normalizado de terrenos *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) (NOBRE et al., 2011; RENNÓ et al., 2008), que permite obter mapas de ambientes associados ao

conteúdo da água no solo usando somente dados topográficos. Estes mapas de ambiente podem ser associados a tipos de solos como demonstrado por Cuartas et al. (2012). Neste trabalho, foram classificados três ambientes: (I) $HAND \leq 5$ m, representando as áreas saturadas (Baixio); (II) $5 \text{ m} < HAND \leq 15$ m, representando a área de transição com o lençol freático próximo à superfície (Transição); e (III) $HAND > 15$ m, representando as áreas não saturadas com lençol freático profundo (Vertentes e Platô).

Optou-se por este mapa devido ao bom desempenho que os mapas gerados pelo modelo HAND e usados como mapas de solos vêm demonstrando no sentido de facilitar a calibração de modelos hidrológicos distribuídos em bacias com escassez de dados de solo ou que necessitam de muitos parâmetros de entrada (ALVARENGA, 2015; CUARTAS et al., 2012; NOBRE et al., 2011).

3.6.4. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos são temperatura média ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m/s), umidade relativa do ar (%), radiação de onda curta incidente (W/m^2), radiação de onda longa incidente (W/m^2) e precipitação acumulada (m). Estes dados não foram modificados na comparação de um cenário de cobertura para outro.

Como as séries históricas fornecidas pelo BDMEP do INMET não possuem dados de radiação solar, a radiação solar de onda curta incidente foi calculada por meio da equação:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3.7)$$

Sendo que esta é a equação de *Angström* que relaciona a radiação solar com a radiação extraterrestre e a duração solar relativa, onde R_s é a radiação de onda curta ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), n é a duração efetiva de brilho solar (horas), N é a duração máxima possível de brilho solar ou luz diurna (horas), R_a é a radiação

extraterrestre ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), e $a_s + b_s$ é a fração de radiação extraterrestre que alcança a Terra em dias claros (ALLEN et al., 1998).

A radiação de onda longa incidente foi calculada por meio da equação de Swinbank (1963):

$$R_l = 5,31 \cdot 10^{-14} T^6 \quad (3.8)$$

Onde T é a temperatura (K) e R_l é a radiação de onda longa incidente (mW/cm^2).

A velocidade do vento obtida do INMET teve que passar por cálculo de redimensionamento devido à altura de referência utilizada no modelo ser de 30 m, 10 m acima da vegetação mais alta. Como os sensores das estações convencionais utilizadas estão localizados 10 m acima da superfície do solo, foi utilizada a seguinte equação empírica, considerando uma atmosfera estável (BRAS, 1990, p. 205):

$$\frac{U_1}{U_2} = \ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right) / \ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right) \quad (3.9)$$

Onde Z_1 é a altura do vento a 10 metros, Z_2 é a altura do vento a 30 metros e Z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica, sendo que na altura de 10 m e para velocidades do vento menores do que $2,25 \text{ m s}^{-1}$, foi utilizado $Z_0 = 0,001 \text{ m}$ e, para velocidades do vento maiores do que $2,25 \text{ m s}^{-1}$, foi usado $Z_0 = 0,005 \text{ m}$.

3.7. Calibração do DHSVM

O modelo foi rodado no passo de tempo diário, com período de aquecimento de quase cinco anos (1º de janeiro de 1996 a 30 de setembro de 2000). Os períodos escolhidos para calibração e validação obedeceram à sazonalidade hidrológica de vazão na região de estudo iniciando em outubro e finalizando em setembro, o mês mais seco. A calibração foi realizada pelas médias mensais

para o período de outubro de 2000 a setembro de 2006 e a validação, para o período de outubro de 2006 a setembro de 2012.

A calibração do DHSVM para a Bacia do Rio Verde foi manual e pode ser dividida em duas etapas principais: (1) a escolha da área acumulada e da profundidade do solo, e (2) a modificação dos parâmetros físicos de vegetação (LAI e fração de raízes em cada zona) e solo (condutividade hidráulica lateral e decaimento da condutividade com a profundidade) inicialmente encontrados na literatura.

Após obter boa concordância visual entre os gráficos de vazão simulada com a observada, o refinamento da calibração e validação foi realizado pelo cálculo de índices estatísticos. Os índices observados foram: coeficiente de determinação de *Pearson* (R^2), eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE), erro médio quadrático (RMSE), Índice de Concordância (d) e *bias* percentual (PBIAS).

O coeficiente de determinação de *Pearson* foi obtido por meio da Equação 3.10, e varia de -1 a 1, sendo que um R^2 de 0 significa que não há uma correlação linear entre os dados simulados e observados, já um R^2 de -1 ou 1 significa uma correlação linear perfeita, negativa ou positiva, respectivamente (MORIASI et al., 2007).

O NSE (Equação 3.11) quantifica a variância residual relativa à variação dos dados, indicando o quanto o dado simulado versus o observado se encaixa em uma linha 1:1, e seu valor varia de $-\infty$ a 1, sendo 1 seu valor ótimo (SINGH et al., 2004).

O RMSE (Equação 3.12) é um índice de erro que resulta na mesma unidade do constituinte analisado, e é considerado satisfatório se seu valor ficar abaixo da metade do valor do desvio padrão observado (SINGH et al., 2004).

O Índice de Concordância, desenvolvido por Willmott (1981) mede o grau da predição de erro do modelo e varia entre 0 e 1, sendo 1 uma concordância perfeita (Equação 3.13).

O PBIAS (Equação 3.14) mede a tendência média dos dados simulados em se apresentarem maiores (valores negativos) ou menores (valores positivos) que os dados observados.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)(X_{si} - \bar{X}_s)}{[\sum_{i=1}^n (|X_{oi} - \bar{X}_o|)^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^n (X_{si} - \bar{X}_s)^2]^{0.5}} \right\} \quad (3.10)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - \bar{X}_o)^2} \quad (3.11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si})^2} \quad (3.12)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (|X_{si} - \bar{X}_o| + |X_{oi} - \bar{X}_o|)^2} \quad (3.13)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si}) * (100)}{\sum_{i=1}^n X_o} \right] \quad (3.14)$$

Onde n é o número total de observações, X_{oi} é a i ésima observação para o constituinte sendo avaliado, X_{si} é o i ésimo valor simulado para o constituinte sendo avaliado. A barra sobre a variável representa o valor médio da variável durante o período analisado.

Os parâmetros que satisfizeram estatisticamente a calibração e validação do DHSVM para a Bacia do Rio Verde combinados com os dados geográficos já

mencionados foram usados no arquivo de configuração do DHSVM, e são descritos nas próximas subseções.

3.7.1. Parâmetros físicos utilizados

3.7.1.1. Gerais

Os parâmetros gerais da área de estudo que devem entrar no arquivo de configuração são basicamente os caminhos dos dados meteorológicos e dos mapas de entrada, o sistema de coordenadas e localização, número de linhas e colunas, resolução de célula de grade, passo de tempo, data de início e de fim da rodada, rugosidade do solo, limiar de temperatura abaixo do qual a precipitação cai em forma de neve, altura de referência das medidas meteorológicas e taxas de decaimento da temperatura e da precipitação com a altitude.

O sistema de coordenadas utilizado foi o *Universal Transverse Mercator* (UTM), com *Datum* WGS/84, e a latitude e longitude centrais da Bacia do Rio Verde são, respectivamente, -21,987630 GD e -45,138584 GD. Os números de linhas e colunas dos arquivos de mapas são 757 e 693, respectivamente. O tamanho das células de grade, como já dito, foi de 150 m, e o passo de tempo de 24 horas. A rugosidade superficial – ou microrrelevo – do solo nu foi estabelecida em 0,023 m, valor médio encontrado em Latossolo e Argissolo antes do preparo para cultivo (CARVALHO FILHO et al., 2007; CASTRO et al., 2006).

O limiar de temperatura a partir do qual a precipitação cai em forma de chuva foi acima de 1,5 °C. A altura de referência para simular as observações meteorológicas foi estabelecida em 30 m, sendo 10 m acima do dossel superior mais alto, como recomendado pelos implementadores do modelo para manter a estabilidade do mesmo. O decaimento da temperatura com a altitude utilizado foi de 0,0065 °C m⁻¹, que é a taxa usada em escala global, e o aumento da precipitação com a altitude foi de 0,0001 m m⁻¹. Estes dois últimos parâmetros são utilizados conjuntamente com a topografia durante a interpolação dos

dados meteorológicos entre as estações fornecidas. No caso, a interpolação foi realizada pelo método do inverso da distância.

3.7.1.2. Parâmetros de solo

Os parâmetros de solo necessários para rodar a versão 3.1.2 do DHSVM são: condutividade lateral e vertical, decaimento exponencial da condutividade com a profundidade, limiar de profundidade, infiltração máxima, albedo superficial, porosidade, distribuição de poro-pressão, pressão de entrada de ar, umidade residual, capacidade de campo, ponto de murcha, densidade aparente, condutividade térmica e capacidade térmica.

Os parâmetros condutividade, porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha e densidade foram obtidos e ajustados a partir dos resultados do trabalho de Junqueira Jr. (2006) para a cabeceira da Bacia do Rio Grande, mais especificamente para a microbacia do Ribeirão Lavrinhas, localizada no município de Bocaina de Minas (MG), na Serra da Mantiqueira. O expoente de decaimento da condutividade com a profundidade foi ajustado por meio de tentativas a partir do valor 1,0 utilizado na tese de Kruk (2008). O albedo superficial foi obtido a partir de Tucci (2009).

A distribuição de tamanhos dos poros com a profundidade e a pressão de entrada de ar nos mesmos foi obtida por meio de comunicação pessoal com Alvarenga (2015), que calibrou o DHSVM para a microbacia do Ribeirão Lavrinhas, a qual é amplamente estudada pelo Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, e pelo qual realizou seu trabalho.

A umidade residual foi obtida de Silva (2009) para o solo de outra nascente da Bacia do Rio Grande (Ribeirão Marcela) localizada em uma região cuja área de recarga é predominada por pastagem (cerca de 70%). A capacidade de infiltração foi testada a partir da utilizada por Kruk (2008) e ajustada, coincidindo com a infiltração contida no trabalho de Nortcliff e Thornes (1981) para uma microbacia na Amazônia. A condutividade térmica foi obtida do

trabalho de Kruk (2008) em uma microbacia localizada na Serra do Mar, e a capacidade térmica foi a mesma contida no tutorial do modelo. Estes dois últimos parâmetros não possuem influência significativa sobre as simulações de vazão (KRUK et al., 2007).

O limiar de profundidade é um parâmetro obrigatório da versão mais recente do DHSVM (versão 3.1.2), e deve ser igual ou maior do que a profundidade mínima do solo para que a transmissividade não seja 0 (zero). Sendo assim, aqui foi estabelecida em 2,5 m.

Os parâmetros utilizados como ajustes no processo de calibração foram principalmente a condutividade hidráulica lateral e o expoente de decaimento da condutividade com a profundidade. Os parâmetros de solo que melhor se ajustaram à Bacia do Rio Verde, no caso da resolução de célula de 150 m e em conjunto com todos os outros dados do experimento Controle, podem ser encontrados na seção dos Resultados.

3.7.1.3. Parâmetros de vegetação

Os parâmetros de vegetação necessários exclusivamente para o dossel superior ao rodar o DHSVM são: fração de cobertura do dossel, fração do tronco até a copa, coeficiente de atenuação aerodinâmica e coeficiente de atenuação da radiação. A fração de cobertura do estrato inferior sempre é considerada que ocupe 100% da célula de grade.

Os parâmetros utilizados tanto para o estrato superior quanto inferior são: altura, máxima e mínima resistência estomatal, limiar de umidade, déficit de pressão de vapor, fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), número de zonas de raízes, profundidade das zonas de raízes, fração de raízes em cada zona, Índice de Área Foliar (LAI) mensal e albedo mensal.

O número de zona de raízes é o mesmo para os dois estratos de vegetação, porém as raízes do estrato inferior não chegam à camada mais profunda do

solo. A versão do DHSVM utilizada neste trabalho ainda possibilita que uma fração da célula de grade seja considerada impermeável, o que foi desenvolvido para rodar o modelo em áreas que contenham centros urbanos. Neste caso, o percentual de água estipulado que precipita na célula não infiltra e seu escoamento obedece à direção do fluxo contida no arquivo de direção de fluxo.

A tabela com os parâmetros finais utilizados em cada classe de cobertura encontra-se no Apêndice A deste trabalho, e faz parte da seção de Resultados. Os parâmetros das classes Solo exposto, Água e Afloramento rochoso não são apresentados porque estas não possuem camada de vegetação. Nessas classes de cobertura, ambos os estratos de vegetação foram configurados com a opção “Falso”.

Somente após a calibração e validação do DHSVM para a Bacia do Rio Verde, o conjunto dos parâmetros utilizados foi considerado como o experimento Controle deste trabalho, e então foram analisadas as demais respostas hidrológicas obtidas.

3.8. Montagem dos experimentos de modelagem

O experimento Controle foi simulado desde 1º de janeiro de 1996 até 30 de setembro de 2012. O período de 1º de janeiro de 1996 até 30 de setembro de 2000 serviu como aquecimento para a análise dos resultados, que foi realizada para o período de 1º de outubro de 2000 a 30 de setembro de 2012. Desta forma, as condições iniciais de umidade do solo, água interceptada e vazão nos canais de drenagem não assumiram tanta importância.

Os estados em que se encontravam a umidade do solo, a água interceptada e a vazão nos canais de drenagem no dia 1º de setembro de 2000 do experimento Controle foram utilizados como condições iniciais para rodar cada cenário de cobertura. Sendo assim, ao analisar os processos hidrológicos a partir de 1º de outubro de 2000, foram analisadas respostas às mudanças de

cobertura ocorridas após o período de um mês, passando da cobertura contida no mapa de 2006, para a cobertura de cada cenário.

3.9. Análises comparativas das simulações

A diferença entre o experimento Controle e os cenários de cobertura foi somente os mapas de cobertura da terra utilizados. Para comparar o Controle com cada cenário de cobertura, as respostas hidrológicas simuladas pelo DHSVM foram analisadas principalmente sob a forma de gráficos, em escala temporal mensal. As respostas analisadas foram: vazão na foz da bacia, evapotranspiração total, interceptação pela vegetação, processos subsuperficiais médias da área da bacia como um todo (percolação, umidade do solo e profundidade do lençol freático) e escoamento superficial.

Também foram aplicados testes estatísticos não-paramétricos para comparação das médias mensais do período analisado. O primeiro deles foi o teste de *Mann-Whitney*, para verificar se houve diferença estatística entre a resposta de cada cenário e o Controle, com 5% e 10% de probabilidade de erro, sendo apresentada sempre a menor. O segundo teste aplicado foi *Kruskal-Wallis*, no nível de significância de 5%, onde foram estabelecidos sete tratamentos, sendo o primeiro tratamento o Controle, e os cenários de cobertura representaram os outros seis tratamentos. Este teste possibilitou a verificação do grupo estatístico ao qual a resposta hidrológica de cada tratamento pertencia.

No caso da análise da vazão média mensal, os testes estatísticos foram também separados entre período de seca e de cheia. O critério para a separação entre seca e cheia foi considerar meses com vazão média do Controle menor do que $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ como meses de seca (maio a novembro), e acima desta média, meses de cheia (dezembro a abril).

O PBIAS da vazão mensal de cada cenário de cobertura em relação ao experimento Controle também foi calculado na escala de tempo mensal, para

quantificar o percentual de sub ou sobre estimativa quanto a esta resposta hidrológica.

4. RESULTADOS

4.1. Cobertura da terra e parâmetros utilizados

A amostragem aleatória com 300 pontos realizada sobre a imagem classificada e editada de 2006 obteve concordância global de 93% e índice *Kappa* de 0,92, o que pode ser demonstrado por meio da matriz de confusão da imagem resultante contida na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Matriz de confusão – realizada após edição – para validação do mapa de cobertura da terra de 2006.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	Acurácia do Produtor (%)
a) Pasto	77	2		2						95
b) Agricultura	3	42		2						89
c) Floresta		3	66	2						93
d) Capoeira	1			53						98
e) Urbana					13					100
f) Eucalipto		2		2		12				75
g) Solo exposto	1						4			80
h) Água								5		100
i) Afloramento rochoso									8	100
Acurácia do consumidor (%)	94	86	100	87	100	100	100	100	100	

A análise de cobertura da terra resultou em um predomínio da classe Pasto na Bacia do Rio Verde. Da área total da bacia hidrográfica, 64,8% foi ocupada pela classe Pasto, 19,9% pela classe Floresta, 7,9% pela classe Capoeira, 5,5% pela classe Agricultura, 1,3% pela classe Urbana, e a classe Eucalipto representou 0,2%. As outras três classes identificadas (Solo exposto, Água e Afloramento rochoso) somaram os 0,3% restantes, com 0,1% cada. As áreas calculadas das classes de cobertura podem ser visualizadas na Tabela 4.2, e sua espacialização, na Figura 4.1. Este cálculo foi realizado sobre o mapa com resolução de células de grade de 30 m.

Tabela 4.2 – Áreas das classes de cobertura calculadas para a Bacia do Rio Verde, a partir de classificação de imagens TM/Landsat-5, de setembro de 2006.

Classe de cobertura	km²
Pasto (inclui campos naturais)	4.076,8
Agricultura (principalmente café)	348,3
Floresta	1.252,4
Capoeira	497,9
Urbana	81,4
Eucalipto	14,2
Solo exposto	7,7
Água (presente em lagos)	3,6
Afloramento Rochoso (inclui mineração)	7,8
Total	6.290,21

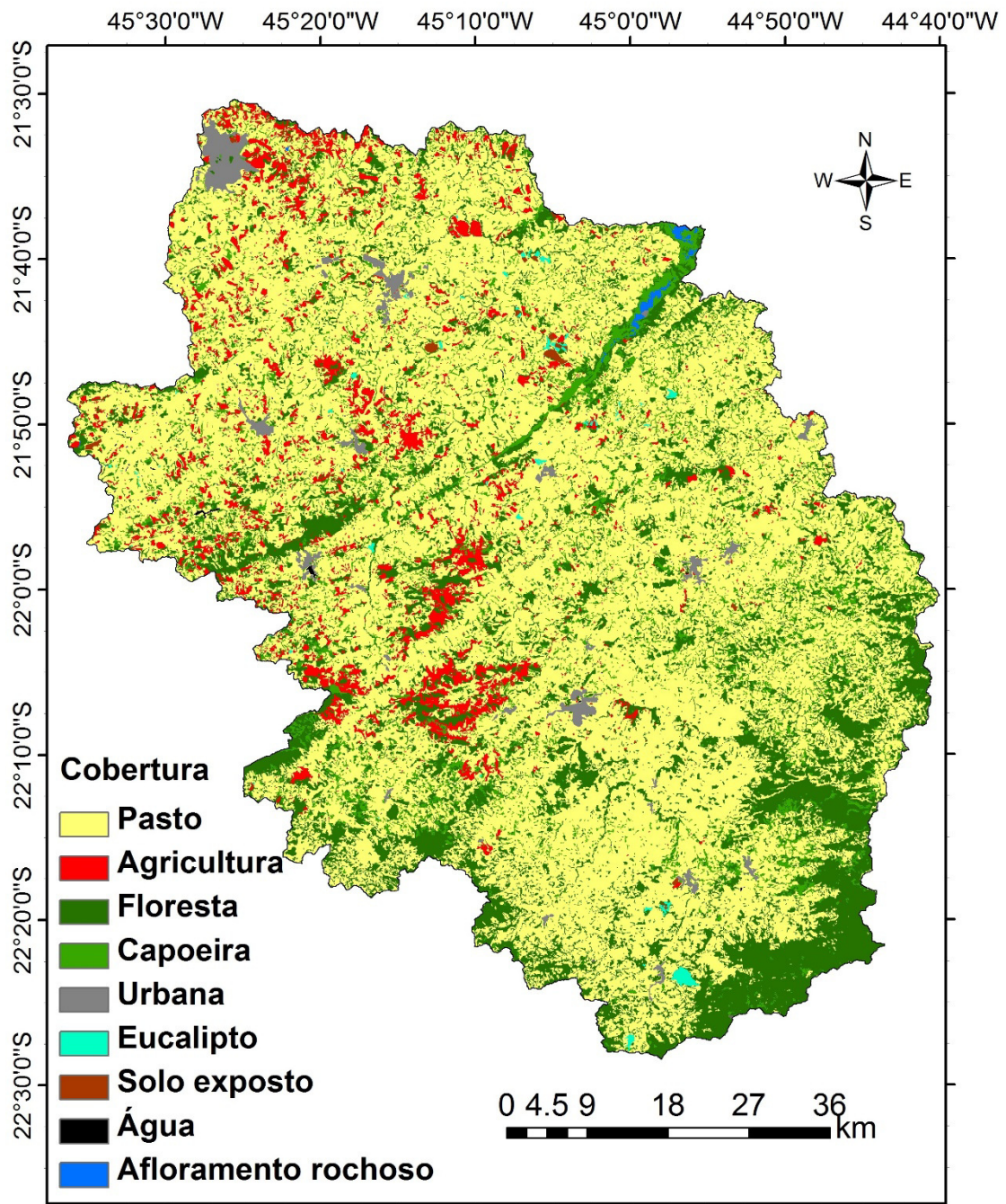


Figura 4.1 – Mapa de cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Verde produzido a partir de imagens TM/Landsat-5, de setembro de 2006.

Os parâmetros de vegetação utilizados para simular cada classe de cobertura da terra no modelo hidrológico podem ser visualizados na Tabela A.1 no Apêndice A deste documento, junto com seus autores ou lógica utilizada.

4.2. Análise de APPs de topo de elevação

4.2.1. Comparação de escala na geração de APPs de topo de morro e montanha para o ACF

A comparação da escala empregada aqui e a usada pelo MPSP (2012), para uma área montanhosa do município de São José dos Campos (SP) para o ACF, resultou que as áreas delimitadas nas escalas 1:10.000 e 1:250.000 foram de 6,36 km² (29,80% da região) e 5,30 km² (24,86% da região), respectivamente(Figura 4.2).

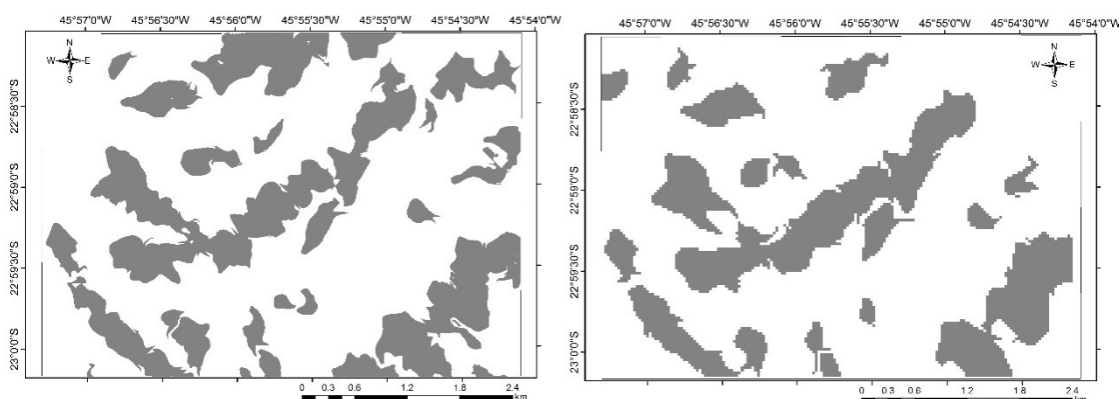


Figura 4.2 – APPs em topo de morro e montanha geradas pelo MPSP na escala 1:10.000 (esquerda) e pelo método empregado aqui, na escala 1:250.000 (direita).

4.2.2. APPs de topo de elevação pelo AFC e NCF

A área estabelecida como APP neste trabalho foi de 22,426% da área da bacia (1.410,619 km²) para o ACF e de 0,004% da área da bacia (0,245 km²) para o NCF, representando um decréscimo de 99,98% da extensão das APPs em topos de morros, montes, montanhas e serras. A diferença nos resultados gerados com a aplicação dos parâmetros do ACF e do NCF pode ser visualizada na Figura 4.3.

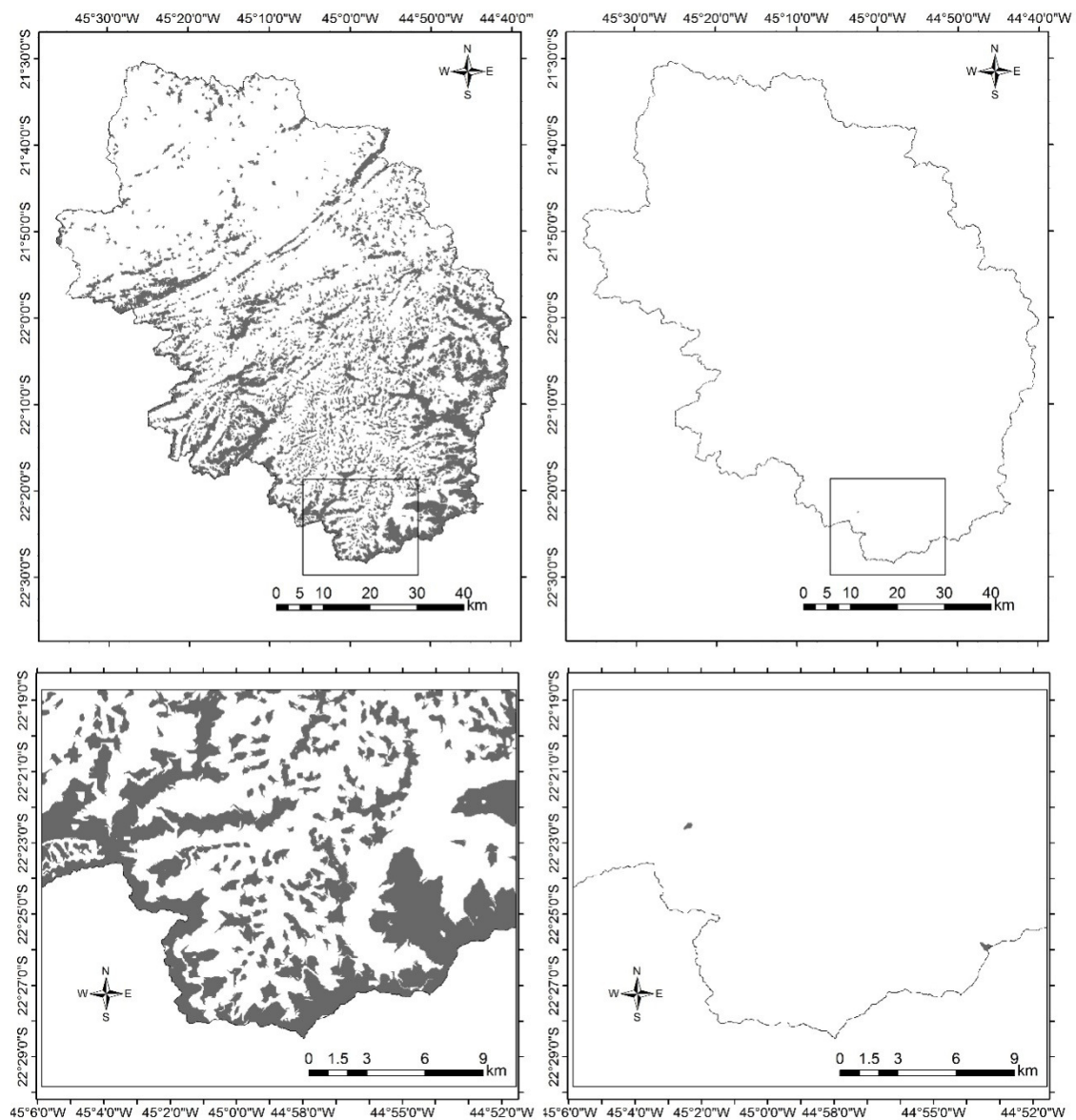


Figura 4.3 – Mapas de APPs em topo de elevação gerados a partir do MDE do Projeto TOPODATA, para o ACF (esquerda) e para o NCF (direita). Abaixo de cada um, a região delimitada pelo retângulo é mostrada em detalhe para possibilitar a visualização das duas APPs delimitadas para o NCF.

4.2.3. Mapa de APP alternativo

O mapa de APP alternativo, combinando os critérios de altura do cume em relação à base e declividade do NCF, com a localização da base sendo o ponto da drenagem mais próxima ao cume do ACF, resultaria em uma área de 78,48 km² de APP de topo, representando um decréscimo de 94,44% de APPs de topo em relação ao ACF.

4.2.4. Cobertura da terra presente nas APPs

As classes de cobertura consideradas adequadas quando presentes em APPs de topos de morros e montanhas para o ACF foram: Floresta, Capoeira e Água (represada em lagos), devido ao Afloramento rochoso aqui classificado representar em maior parte atividade de mineração. Para o NCF, todas as classes foram consideradas adequadas, uma vez que o pastoreio e cultivo de espécies exóticas perenes (como o café e o eucalipto) em áreas consolidadas foram liberados. Por meio da observação da Tabela 4.3, pode ser notado que, para o ACF, 58,6% das classes encontradas nas APPs eram inadequadas.

Tabela 4.3 – Extensão e percentual das classes de cobertura da terra presentes nas APPs nos topos das elevações, resultado de tabulação cruzada entre as áreas das APPs para o ACF (2ª à 4ª coluna) e o NCF (5ª à 7ª coluna) e o mapa de cobertura da terra de 2006 gerado a partir de imagens TM/Landsat-5.

CLASSES	APPs nos Topos das Elevações – ACF			APPs nos Topos das Elevações – NCF		
	km ²	% em relação às APPs de topo	% em relação à área da bacia	km ²	% em relação às APPs de topo	% em relação à área da bacia
Pasto	738,844	52,377	11,746	0,077	31,250	0,001
Agricultura	78,447	5,561	1,247	0,000	0,000	0,000
Floresta	471,931	33,456	7,503	0,162	66,176	0,003
Capoeira	111,609	7,912	1,774	0,006	2,574	0,000
Urbana	3,153	0,223	0,050	0,000	0,000	0,000
Eucalipto	1,988	0,141	0,032	0,000	0,000	0,000
Solo exposto	0,524	0,037	0,008	0,000	0,000	0,000
Água	0,017	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Afloramento rochoso	4,106	0,291	0,065	0,000	0,000	0,000

4.3. Cenários de cobertura para simulação no DHSVM

Os mapas com os cenários de cobertura da terra desenvolvidos para entrar como mapa de vegetação no modelo hidrológico podem ser visualizados na Figura 4.4. O cenário NCF possui a mesma proporção de tipos de cobertura que o experimento Controle, com uma diferença de 1.575 m² a mais de classe Floresta. A Tabela 4.4 apresenta as áreas respectivas de cada classe cobertura para cada cenário desenvolvido, calculadas em células de grade de 150 m.

Pela Tabela 4.4 pode ser observado que o cenário Pristina, ACF, NCF-RIO e NCF possuem, respectivamente, 5.035,028 km² (+79,94%), 1.015,155 km² (+16,12%), 206,663 km² (+3,28%) e 0,067 km² (+0,001%) de área de Floresta a mais que o Controle, sendo portanto, mais preservados que o mesmo. Já os cenários NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI possuem 252,068 km² (-4,00%) de área de Floresta a menos que o Controle, sendo então considerados mais degradados.

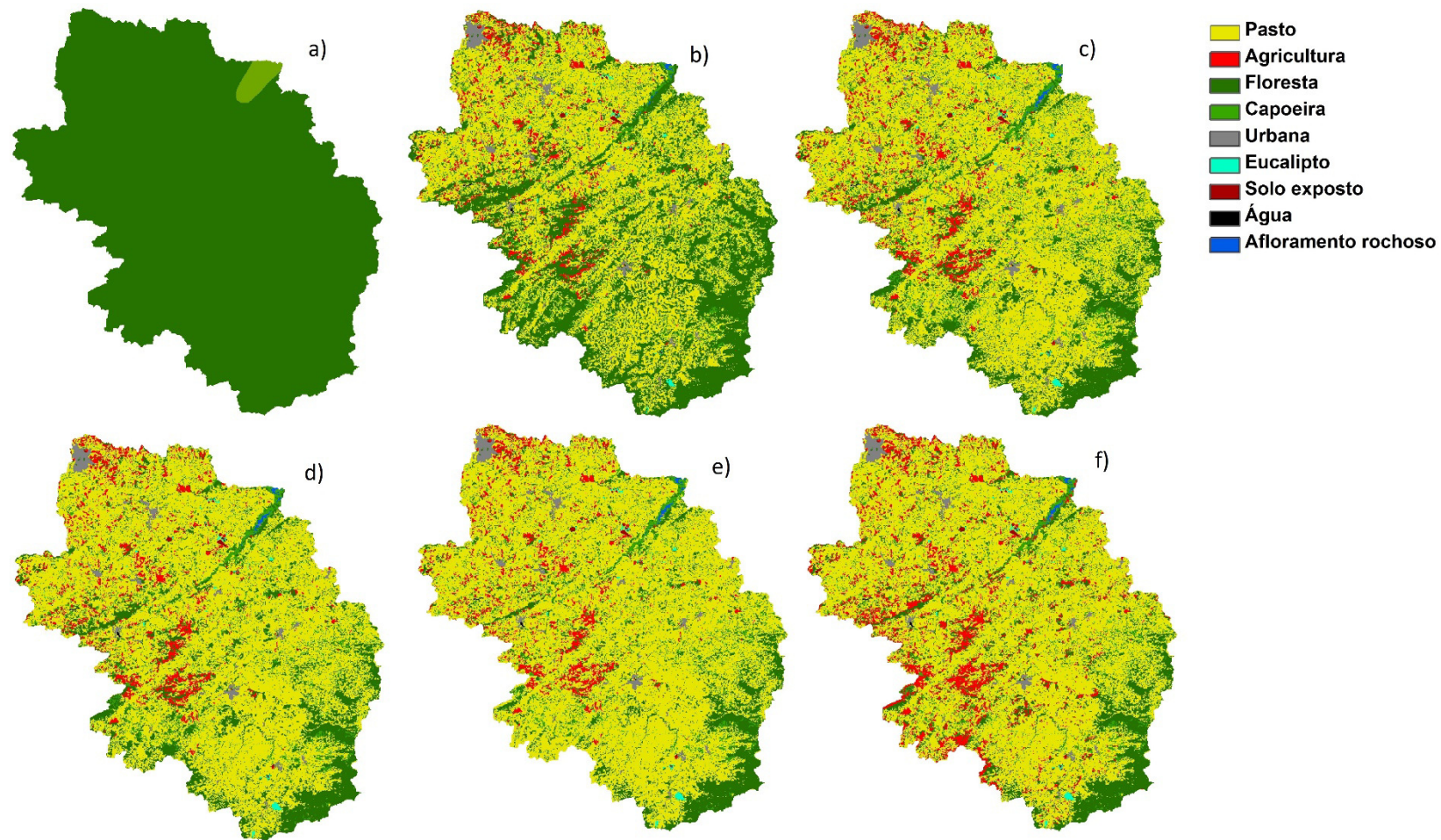


Figura 4.4 – Mapas dos cenários de cobertura da terra para a Bacia do Rio Verde. Legenda dos cenários: a) Pristina; b) ACF; c) NCF-RIO; d) NCF; e) NCF-FUT-PAS; f) NCF-FUT-AGRI.

Tabela 4.4 – Áreas das classes de cobertura presentes no experimento Controle e nos cenários de cobertura da terra, calculadas a partir dos mapas com células de grade de 150 m de resolução horizontal.

	Controle		Pristina		ACF		NCF-RIO		NCF		NCF-FUT-PASTO		NCF-FUT-AGRI	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Pasto	4.266,83	67,75	0,00	0,00	3.334,12	52,94	4.060,17	64,47	4.266,77	67,75	4.518,90	71,75	4.266,83	67,75
Agricultura	333,52	5,30	0,00	0,00	269,96	4,29	333,52	5,30	333,52	5,30	333,52	5,30	585,59	9,30
Floresta	1.186,76	18,84	6.221,79	98,79	2.201,92	34,96	1.393,43	22,12	1.186,83	18,84	934,70	14,84	934,70	14,84
Capoeira	398,34	6,32	76,39	1,21	387,70	6,16	398,34	6,32	398,34	6,32	398,34	6,32	398,34	6,32
Urbana	81,23	1,29	0,00	0,00	78,44	1,25	81,23	1,29	81,23	1,29	81,23	1,29	81,23	1,29
Eucalipto	13,86	0,22	0,00	0,00	12,33	0,20	13,86	0,22	13,86	0,22	13,86	0,22	13,86	0,22
Solo exposto	7,61	0,12	0,00	0,00	7,16	0,11	7,61	0,12	7,61	0,12	7,61	0,12	7,61	0,12
Água	2,77	0,04	0,00	0,00	2,77	0,04	2,77	0,04	2,77	0,04	2,77	0,04	2,77	0,04
Afloramento rochoso	7,27	0,12	0,00	0,00	3,80	0,06	7,27	0,12	7,27	0,12	7,27	0,12	7,27	0,12
Total (km²)	6.298													

4.4. Modelo Digital de Elevação e mapas resultantes

O Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM com resolução espacial de 150 m e os mapas resultantes da rotina pré-processamento que gerou os arquivos com a rede de drenagem e com a profundidade do solo na Bacia do rio Verde, a partir do MDE e da máscara da bacia, associados com os parâmetros iniciais escolhidos (área de acumulação de 850.000 m² e profundidade mínima e máxima de 2,5 a 10,0 m, respectivamente), podem ser visualizados na Figura 4.5.

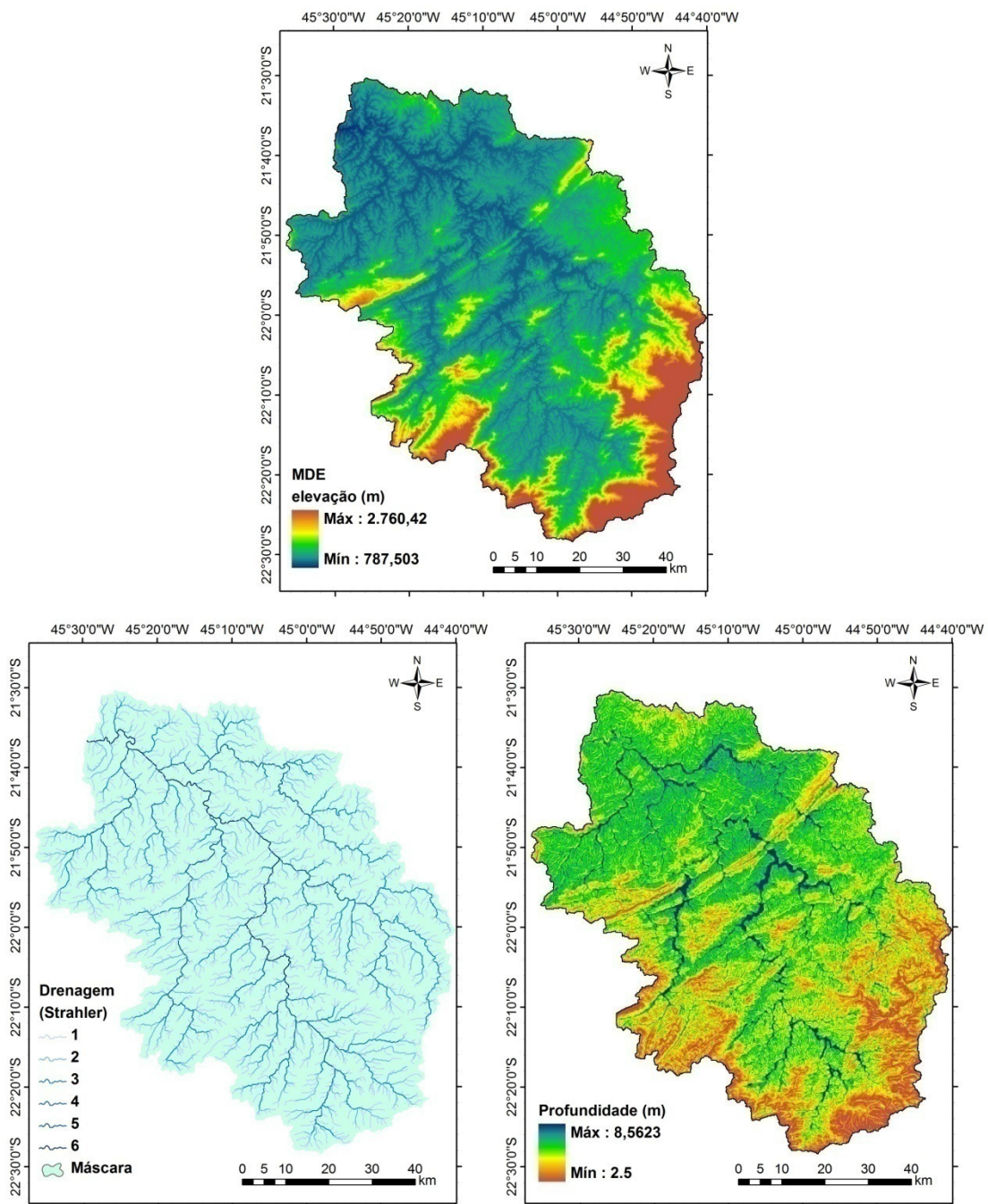


Figura 4.5 – MDE em 150 m de resolução espacial (acima), rede de drenagem sobre a máscara com o limite da bacia (embaixo, à esquerda), e mapa de profundidade do solo (embaixo, à direita) na Bacia do Rio Verde.

Fonte: *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, 2010).

4.5. Mapa e parâmetros de solo

O mapa de ambientes gerado pelo modelo HAND foi aqui utilizado como o mapa de classes de solos, o que permitiu que seus parâmetros fossem ajustados em função do potencial de drenagem dos mesmos, e pode ser visualizado na Figura 4.6. A classe Baixo é saturada, a classe Transição representa as áreas com lençol freático de profundidade intermediária e potencialmente alagáveis, e a classe Vertentes e Platô representa as regiões da bacia com lençol freático mais profundo. A área representada pelo solo presente no baixo é de 1.101,87 km², a extensão do solo presente na área de transição é de 904,97 km² e a área de vertentes e platô possui 4.291,34 km².

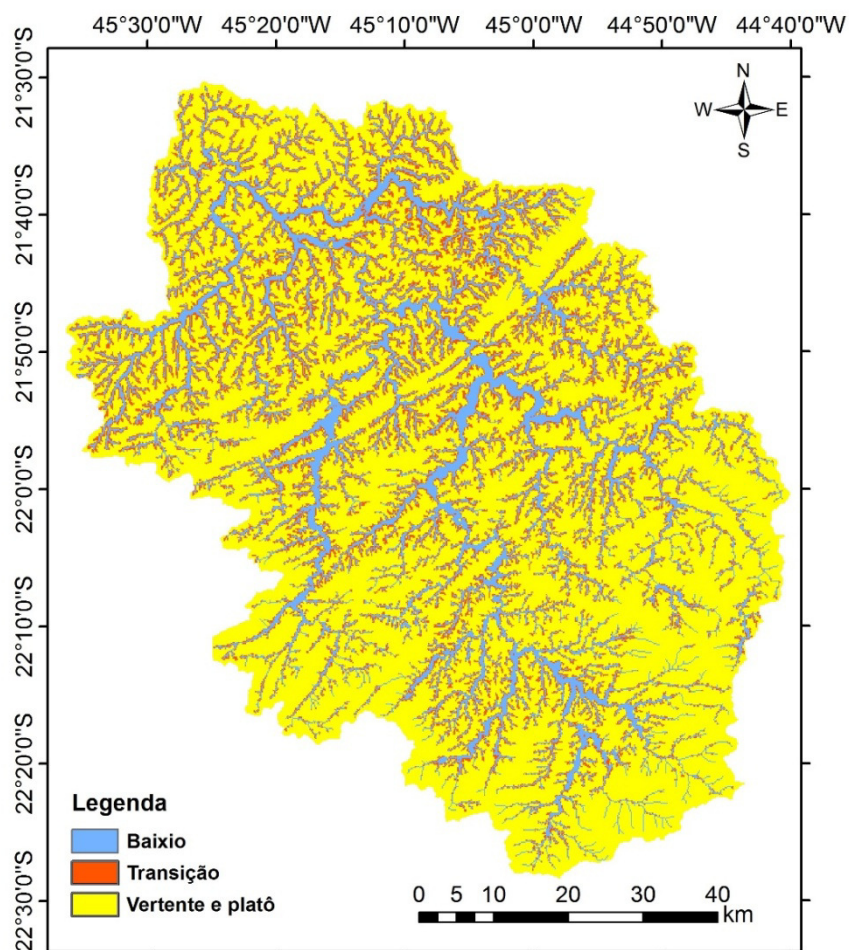


Figura 4.6 – Mapa de classes de solos desenvolvido por meio do descritor de terrenos HAND para a Bacia do Rio Verde.

Tabela 4.5 – Parâmetros de solo utilizados na calibração e validação do DHSVM para a Bacia do Rio Verde.

	1 - BAIXIO			2 - TRANSIÇÃO			3 - PLATÔ		
Condutividade lateral ($m s^{-1}$)*	0,000033			0,000028			0,000019		
Expoente de decaimento*	0,01			0,3			0,005		
Limiar de profundidade (m)	2,5			2,5			2,5		
Infiltração máxima ($m s^{-1}$)*	0,00042			0,00042			0,00042		
Albedo superficial	0,15			0,15			0,15		
Número de camadas	3			3			3		
Porosidade (%)	0,62	0,63	0,64	0,58	0,62	0,63	0,61	0,63	0,65
Distribuição de poro-pressão	0,37	0,41	0,43	0,37	0,41	0,43	0,37	0,41	0,43
Pressão de entrada de ar	0,76	0,87	1,13	0,76	0,87	1,13	0,76	0,87	1,13
Conteúdo de umidade residual (%)	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,075	0,075	0,075
Capacidade de campo (%)	0,29	0,30	0,32	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,24
Ponto de murcha permanente (%)	0,14	0,14	0,14	0,12	0,12	0,12	0,09	0,09	0,09
Densidade ($kg m^{-3}$)	1000	1250	1300	1200	1250	1350	1050	1100	1150
Condutividade vertical ($m s^{-1}$)*	3,3E-5	3,2E-5	3,1E-5	2,8E-5	2,8E-5	2,7E-5	1,9E-5	1,8E-5	1,7E-5
Condutividade térmica ($W m^{-1} °C$)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Capacidade térmica ($J m^{-3} °C$)	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6	1,4E+6
Coefficiente de Manning ($m^{-1/3} s$)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035

* Parâmetros que foram ajustados, a partir da literatura, até atingir calibração.

4.6. Calibração e validação do DHSVM

As médias mensais das vazões, tanto observadas na estação Porto dos Buenos da ANA quanto simuladas pelo DHSVM, podem ser observadas na Figura 4.7, bem como a precipitação acumulada, calculada pelo próprio DHSVM a partir da interpolação entre as três estações do INMET, para o mesmo período. Pode ser notado que a maior precipitação acumulada (748,2 mm) e a maior vazão média mensal, tanto simulada ($621,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) quanto observada ($501,56 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), foram detectadas durante o mês de janeiro de 2007.

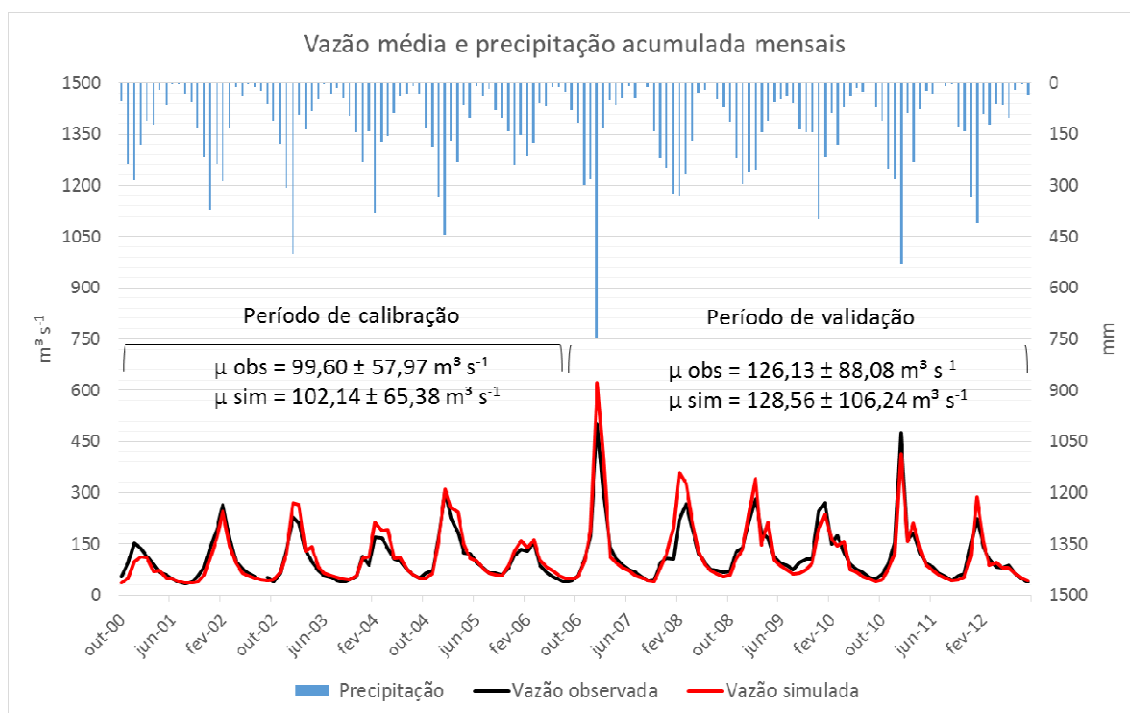


Figura 4.7 – Precipitação acumulada mensal na Bacia do Rio Verde e vazões médias mensais observadas e simuladas na estação Porto dos Buenos da ANA, com os valores médios (μ) dos dados observados (obs) e simulados (sim) para os períodos de calibração (out-2000 a set-2006) e validação (out-2006 a set-2012).

Por meio do gráfico contido nesta figura, pode ser percebido também que dos doze picos de vazão mensais do período de análise, sete ocorreram durante o mês de janeiro (2001, 2003, 2005, 2007, 2010, 2011 e 2012), quatro ocorreram no mês de fevereiro (2002, 2004, 2008 e 2009) e um ocorreu dividido em dois picos menores, em janeiro e março (2006).

Os índices estatísticos R^2 , NSE, RMSE, d e PBIAS, resultantes da comparação entre as vazões observadas e simuladas, estão contidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Índices estatísticos resultantes da comparação entre as vazões médias mensais observadas e simuladas.

	Período de calibração	Período de Validação
R^2	0,90	0,91
NSE	0,87	0,84
RMSE ($m^3 s^{-1}$)	20,84	34,78
d	0,77	0,79
PBIAS (%)	-2,55	-1,93

4.7. Análise da vazão do experimento Controle

4.7.1. Sazonalidade

A primeira análise realizada foi a vazão média anual dos meses para o período analisado, para conhecer o regime das vazões da Bacia do Rio Verde. A média mais alta observada ($239,49 m^3 s^{-1}$) e simulada ($260,53 m^3 s^{-1}$) foi no mês de janeiro, enquanto a mais baixa, tanto a observada ($52,34 m^3 s^{-1}$) quanto a simulada ($48,20 m^3 s^{-1}$), ocorreu durante o mês de setembro (Figura 4.8). O coeficiente de determinação de Pearson se apresentou bastante alto nesta análise ($R^2 = 0,97$).

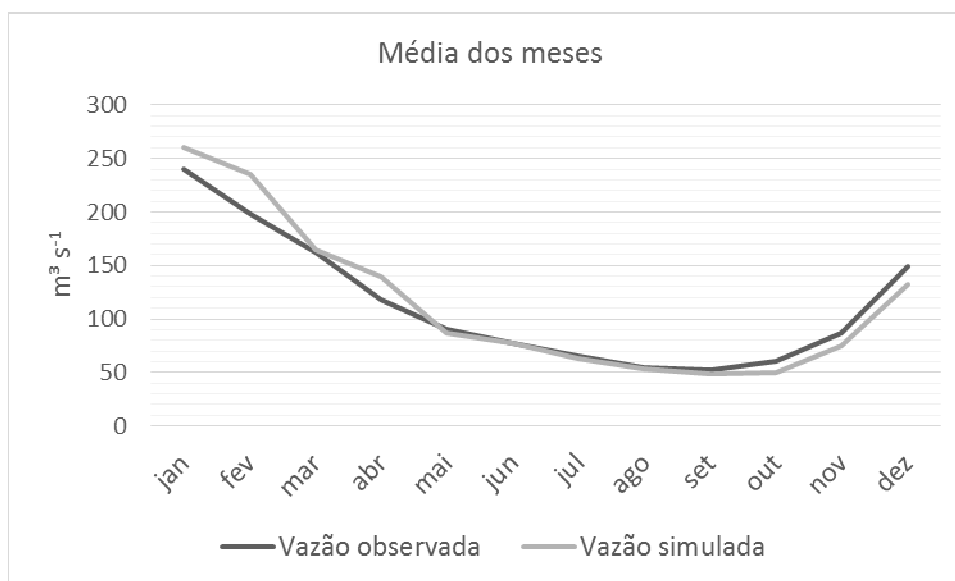


Figura 4.8 – Vazão média dos meses observada e simulada para o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

4.7.2. Vazão média diária

Para o experimento Controle, foram também realizadas análises hidrológicas na escala de tempo diária. A vazão média diária observada e simulada do período completo de análise pode ser observada na Figura 4.9, e o coeficiente de determinação de Pearson para esta análise ficou em 0,82. Na mesma figura pode ser observada a precipitação acumulada diária, que foi obtida por meio da interpolação, realizada pelo próprio DHSVM, dos dados obtidos a partir das três estações meteorológicas do INMET inseridas na área de estudo.

A maior vazão média diária observada foi de $927,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e ocorreu no dia 17 de janeiro de 2011, onze dias depois da maior precipitação acumulada diária do período, que alcançou 80,9 mm de chuva, no dia 7 de janeiro de 2011. A maior vazão média diária simulada pelo DHSVM ocorreu em 3 de fevereiro de 2007, com uma média de $828,92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para verificar em maior detalhe estas respostas, estes períodos foram separados na Figura 4.10.

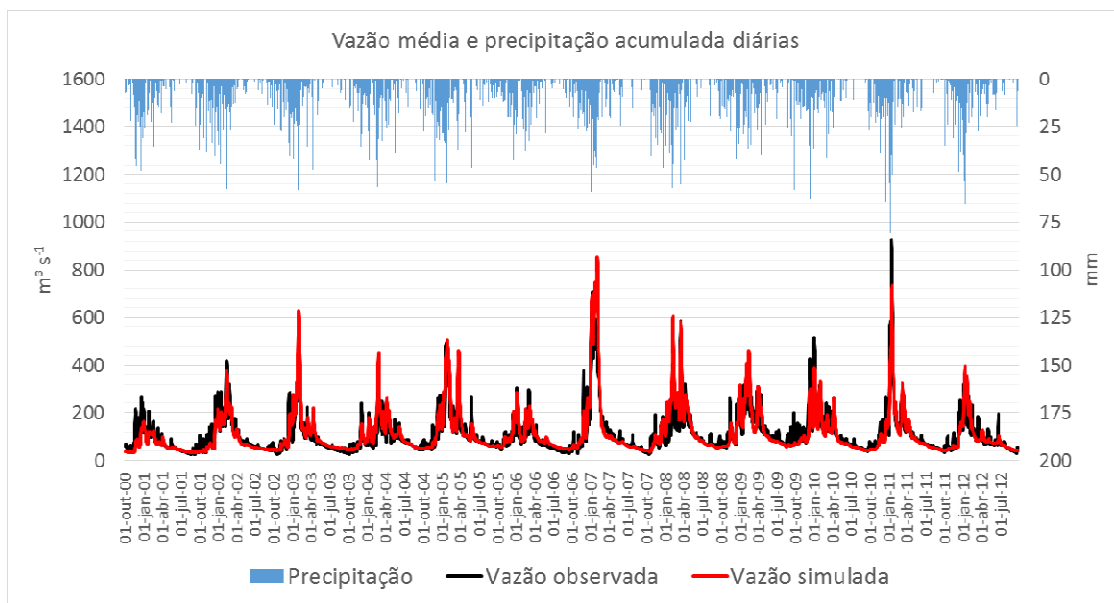


Figura 4.9 – Precipitação diária acumulada na Bacia do Rio Verde e vazão média diária observada e simulada na estação Porto dos Buenos da ANA para todo o período analisado (01-out-2000 a 30-set-2012).

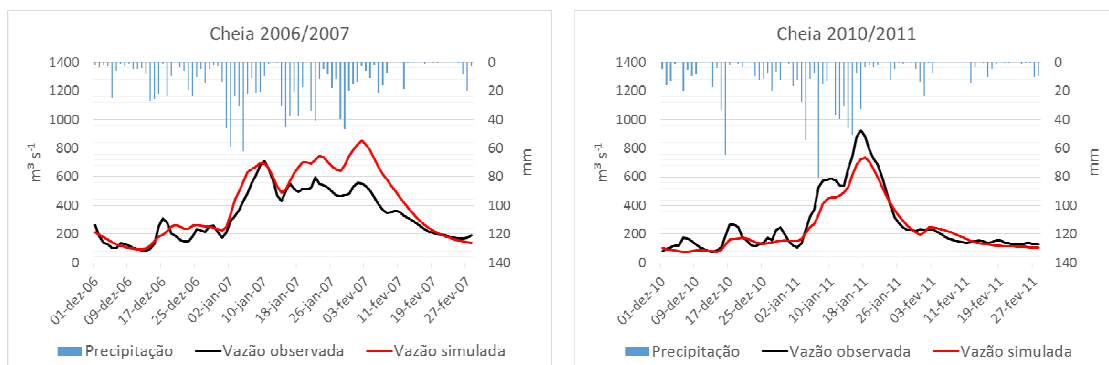


Figura 4.10 – Vazão diária e precipitação dos períodos de cheia de 2006/2007 (esquerda) e 2010/2011 (direita).

Apesar da cheia de 2010/2011 ter apresentado o dia com maior índice de chuva, pode ser observado que durante a cheia de 2006/2007, houveram eventos de precipitação mais frequentes. Pode ser notado também que a simulação durante a cheia de 2010/2011 foi suavizada em relação à vazão observada. Já para o período de cheia de 2006/2007, a vazão simulada se apresentou igual ou maior do que a observada.

4.7.3. Outros processos hidrológicos

Os demais processos hidrológicos, como evapotranspiração, interceptação, umidade do solo, percolação, profundidade do lençol freático e escoamento superficial foram analisados em conjunto com os cenários de cobertura da terra.

4.8. Respostas hidrológicas aos cenários de cobertura

4.8.1. Vazão

As vazões médias mensais para os cenários de cobertura da terra podem ser visualizadas no gráfico da Figura 4.11. Pode ser notado que a linha do experimento Controle está sobreposta pela linha do cenário NCF, uma vez que este cenário não apresentou diferença em relação ao Controle. As vazões médias diárias para o período da cheia de 2006/2007 podem ser observadas na Figura 4.12, para comparar visualmente o tempo de resposta entre os cenários de cobertura.

O valor médio das vazões médias mensais para o experimento Controle e para os cenários de cobertura são apresentados na Tabela 4.7, e o PBIAS de cada cenário em relação ao Controle são apresentados na Tabela 4.8.

Na Figura 4.13 são exibidas as curvas de permanência das vazões médias mensais do Controle e dos cenários de cobertura e, na Tabela 4.9 são apresentadas as vazões de referência Q_{50} (que mostra que em 50% do tempo a vazão permaneceu igual ou maior a determinado valor, no caso), Q_{60} e Q_{90} .

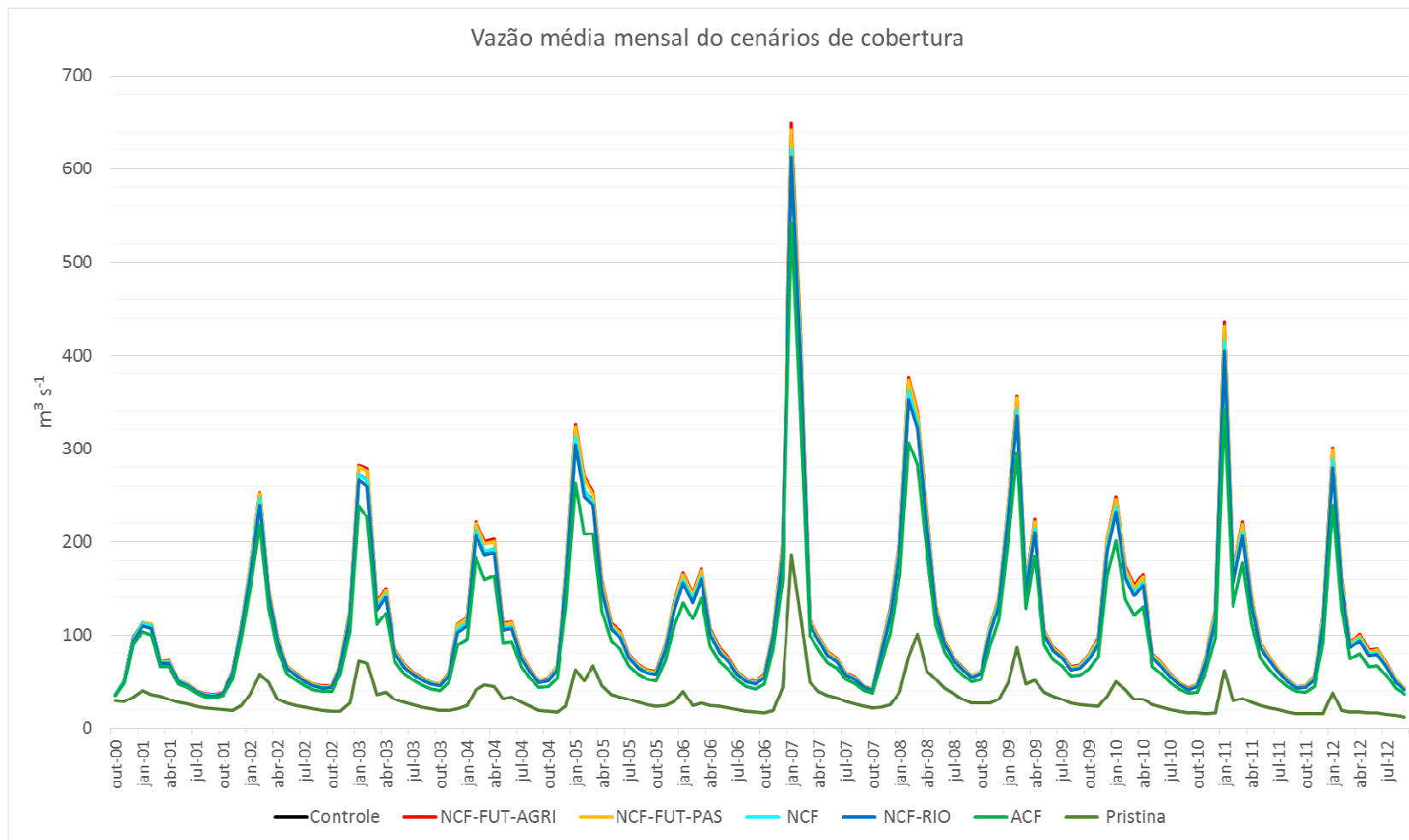


Figura 4.11 – Vazão média mensal simulada para cada cenário de cobertura da terra na estação Porto dos Buenos. A linha do experimento Controle não aparece por coincidir com a linha do cenário NCF.

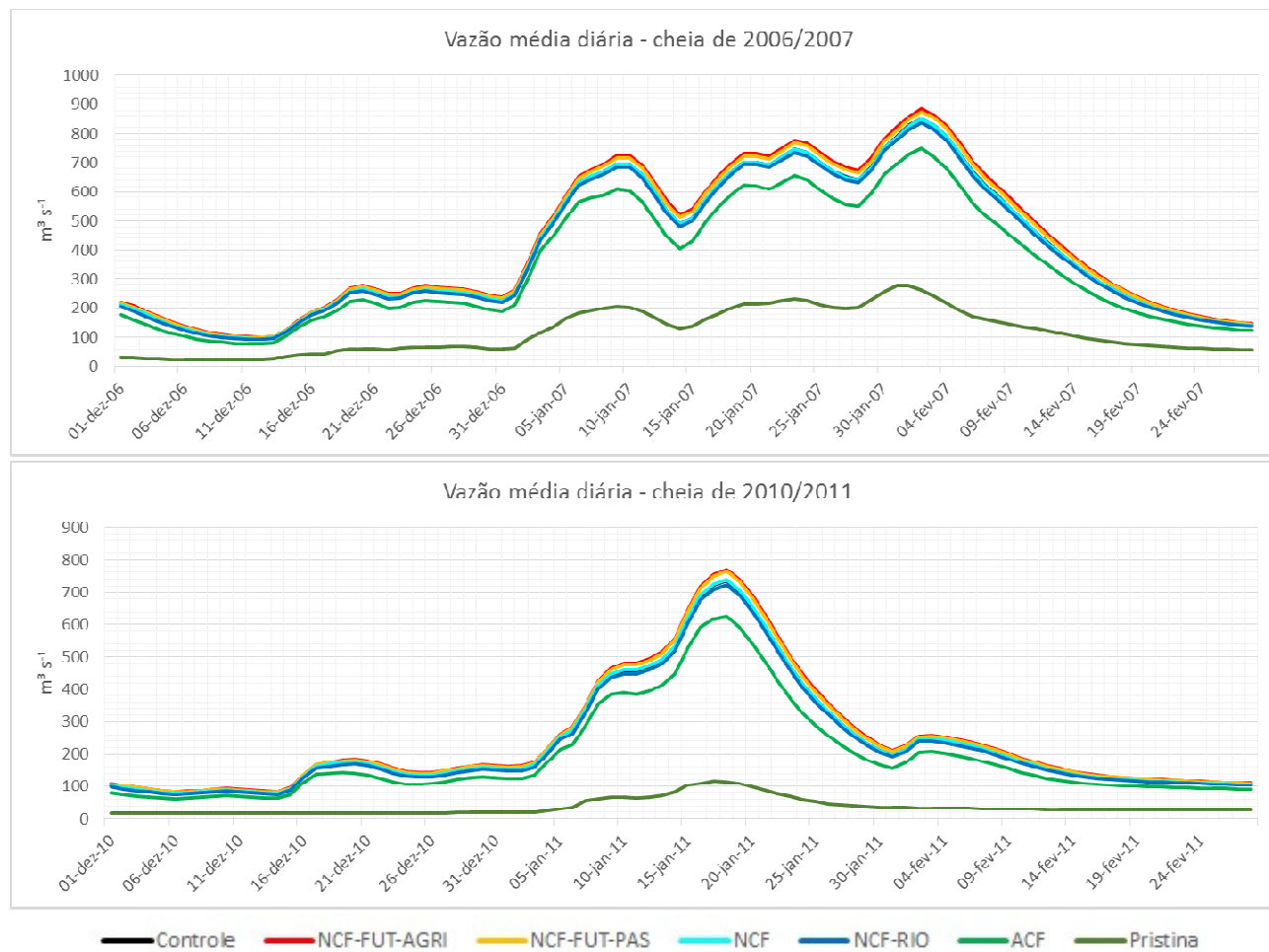


Figura 4.12 – Vazão média diária simulada durante os períodos de cheia de 2006/2007 e 2010/2011 para o experimento Controle e cenários de cobertura.

Tabela 4.7 – Valores médios e desvio padrão calculados a partir das médias mensais de vazão resultantes da simulação do experimento Controle e dos cenários de cobertura, considerando o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	Período total		Período de cheia (dez-abr)		Período de seca (mai-nov)		Mann-Whitney - H ₀ rejeitada? (% probabilidade) * Período total
	μ (m ³ s ⁻¹)	σ (m ³ s ⁻¹)	μ (m ³ s ⁻¹)	σ (m ³ s ⁻¹)	μ (m ³ s ⁻¹)	σ (m ³ s ⁻¹)	
Controle	115,35b**	88,90	186,34b	99,09	64,65b	19,82	-
Pristina	32,63a**	21,13	44,53a	27,68	24,12a	7,01	Sim (5%)
ACF	99,36b	75,47	159,22b	84,72	56,60b	16,46	Sim (5%)
NCF-RIO	112,98b	87,11	182,23b	97,46	63,51b	19,43	Não (5%)
NCF	115,32b	89,08	186,50b	99,24	64,47b	19,79	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	119,07b	92,46	192,94b	102,99	66,32b	20,64	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	120,18b	93,37	194,68b	104,09	66,97b	20,93	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀= As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância.

Tabela 4.8 – PBIAS da vazão média mensal dos cenários de cobertura em relação ao Controle.

	PBIAS (%) em relação ao Controle		
	Período total	Cheia (dez-abr)	Seca (mai-nov)
Pristina	71,72	76,10	62,68
ACF	13,86	14,55	12,45
NCF-RIO	2,06	2,20	1,76
NCF	0,03	-0,09	0,27
NCF-FUT-PAS	-3,23	-3,54	-2,58
NCF-FUT-AGRI	-4,19	-4,48	-3,59

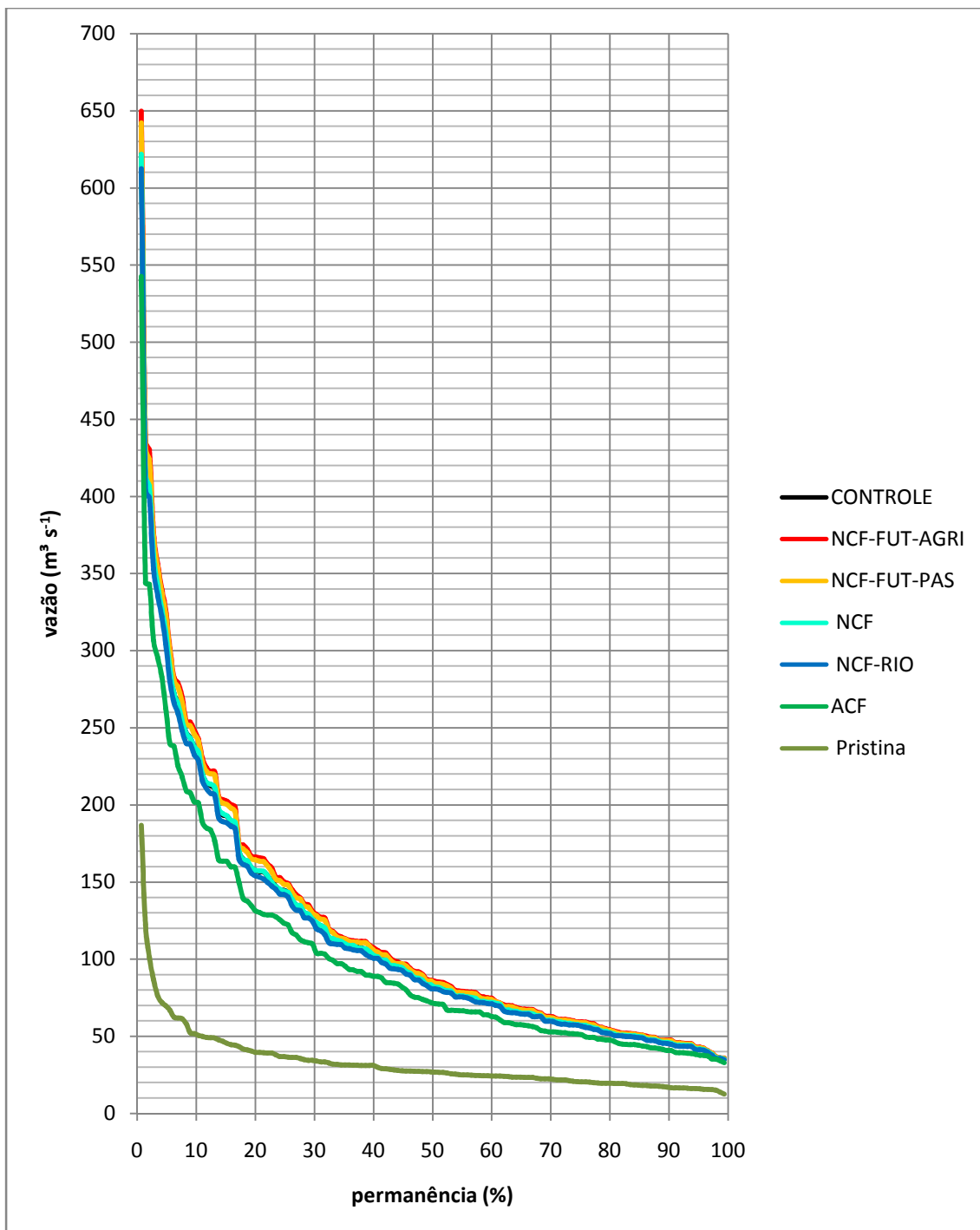


Figura 4.13 – Curva de permanência das vazões médias mensais do Controle e cenários de cobertura. A linha do Controle está sobreposta pela linha do cenário NCF.

Tabela 4.9 – Valores das vazões de referência ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) obtidos da curva de permanência das médias mensais para o Controle e cenários de cobertura.

	Q_{50}	Q_{60}	Q_{90}
Controle	82,15	72,10	45,74
NCF-FUT-AGRI	85,68	74,67	47,54
NCF-FUT-PAS	84,48	73,80	47,10
NCF	81,95	72,00	45,61
NCF-RIO	80,73	71,12	44,75
ACF	71,19	62,78	40,78
Pristina	26,75	24,38	16,70

4.8.2. Evapotranspiração

Algumas datas com e sem precipitação foram escolhidas para a geração de saídas opcionais na forma de mapas com os dados simulados pelo DHSVM (Figura 4.14). Em geral, as datas foram escolhidas no 15º dia do mês de seca e de cheia, com exceção das datas de 2 de fevereiro de 2007, que foi escolhida por ser um dia antes da maior vazão simulada, e 17 de janeiro de 2011, que foi escolhida no dia da maior vazão observada do período analisado.

Na Tabela 4.10 podem ser encontrados os percentuais de evapotranspiração de todo o período analisado, para o Controle e cenários de cobertura, usando como base a precipitação total do período. Na Figura 4.15, é mostrada a média dos meses para o período analisado, para verificar a sazonalidade da evapotranspiração na Bacia do Rio Verde. Por meio de sua observação pode ser notado que o mês de abril é o que possui a maior média simulada pelo DHSVM, e o mês de setembro, a menor.

Os valores médios de evapotranspiração para o experimento Controle e para os cenários de cobertura são exibidos considerando todo o período de análise é apresentado na Tabela 4.11.

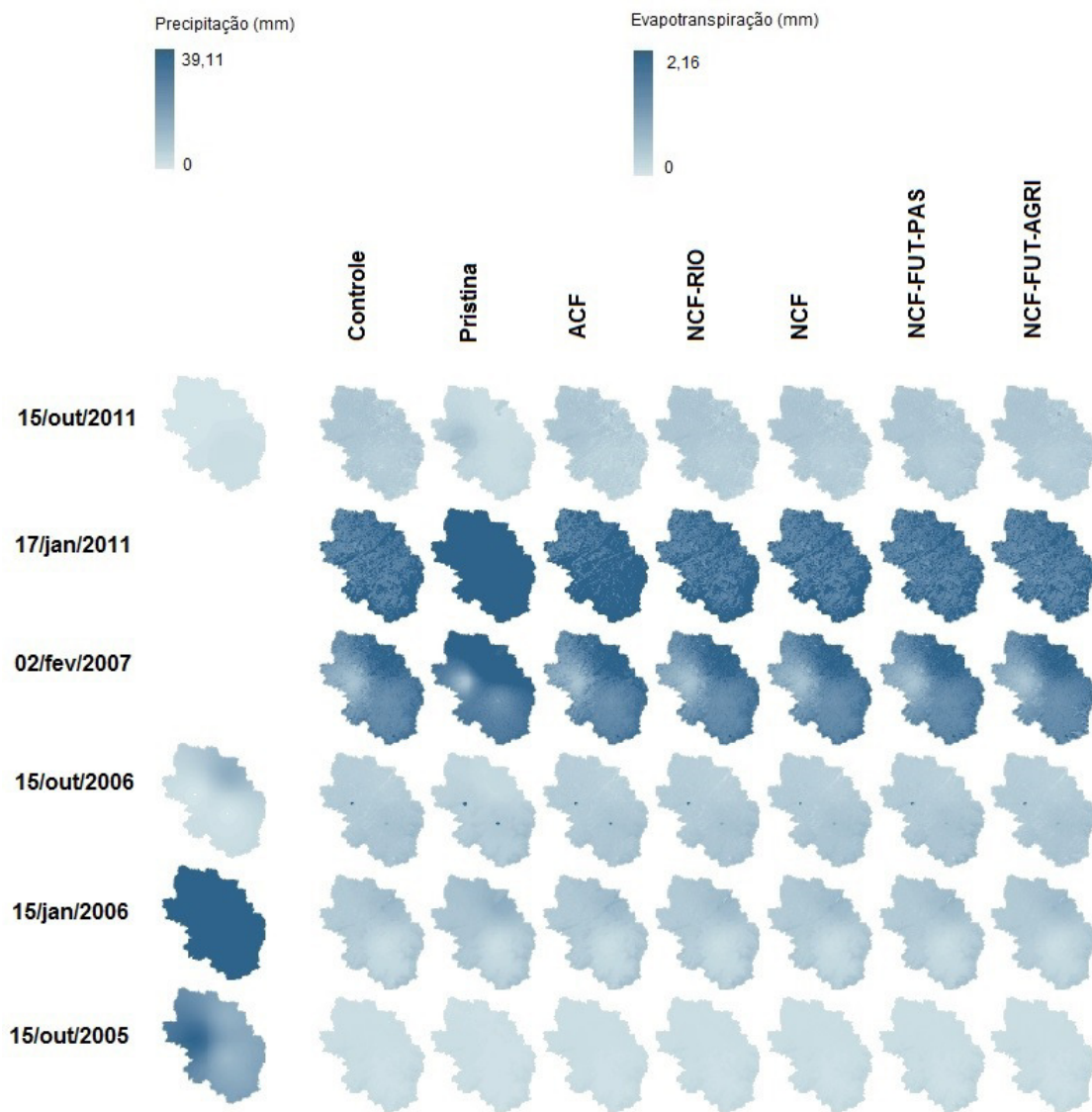


Figura 4.14 – Mapas de saída do DHSVM para evapotranspiração.

Tabela 4.10 – Evapotranspiração percentual simulada na Bacia do Rio Verde para todo o período analisado.

	Evapotranspiração (%)
Controle	62,61
Pristina	92,77
ACF	68,54
NCF-RIO	63,41
NCF	62,63
NCF-FUT-PAS	61,20
NCF-FUT-AGRI	60,80

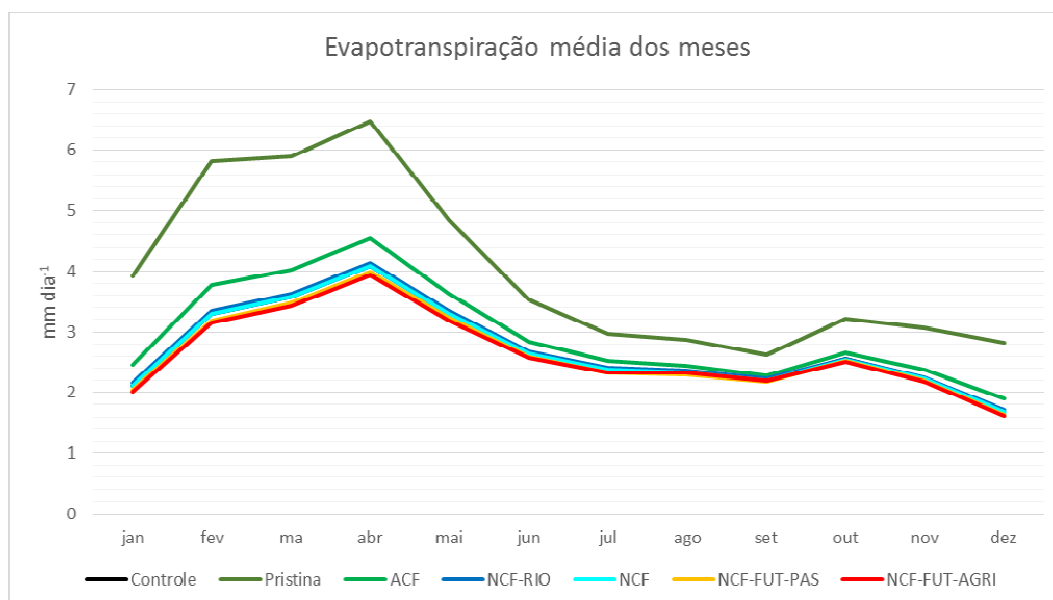


Figura 4.15 – Evapotranspiração média dos meses simulada para o período de outubro de 2000 a setembro de 2012 na Bacia do Rio Verde. A linha do cenário NCF (azul mais claro) encontra-se exatamente sobre a linha do experimento Controle, que não aparece.

Tabela 4.11 – Valores médios de evapotranspiração simulados para a Bacia do Rio Verde, calculados a partir das médias mensais resultantes do experimento Controle e dos cenários de cobertura, considerando o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	μ (mm)	σ (mm)	Mann-Whitney - H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Controle	2,70a**	0,91	-
Pristina	4,00b**	1,86	Sim (5%)
ACF	2,95a	1,08	Sim (10%)
NCF-RIO	2,73a	0,93	Não (5%)
NCF	2,70a	0,91	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	2,64a	0,88	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	2,62a	0,86	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀ = As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância.

4.8.3. Interceptação

A interceptação de água pelo dossel (estrato superior) é uma das saídas no arquivo de balanço de massa do DHSVM. Na Figura 4.16, é mostrado o gráfico com a precipitação e interceptação acumuladas mensais. A Tabela 4.12 apresenta o total e a Tabela 4.13, a média da água interceptada pelo dossel superior da vegetação presente na Bacia do Rio Verde, para o experimento Controle e cenários de cobertura, considerando todo o período analisado.

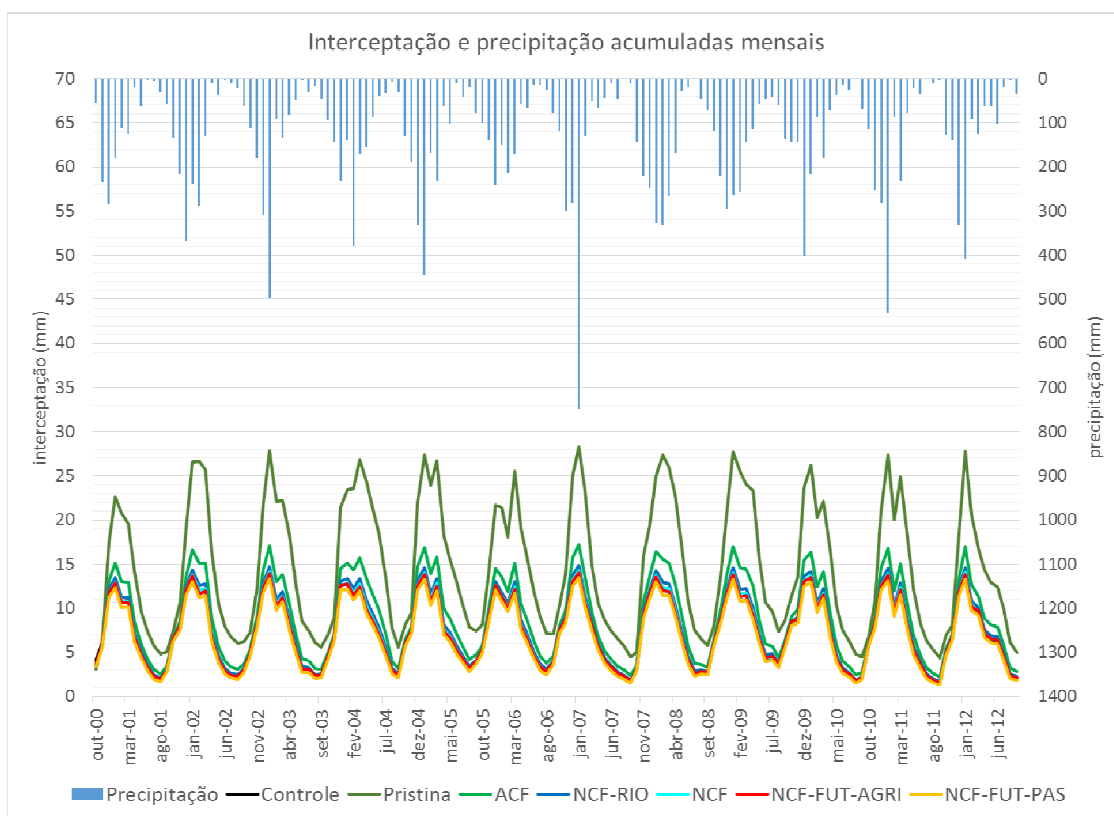


Figura 4.16 – Interceptação e precipitação acumuladas mensais do experimento Controle e dos cenários de cobertura da terra. A linha do cenário NCF (azul mais claro) encontra-se exatamente sobre a linha do experimento Controle, que não aparece.

Tabela 4.12 – Valor total de água interceptada pelo dossel superior da vegetação contida na Bacia do Rio Verde para o período de 1º de outubro de 2000 a 30 de setembro de 2012.

Interceptação		
	mm	%
Controle	1.051,70	5,58
Pristina	2.081,90	11,05
ACF	1.288,48	6,84
NCF-RIO	1.108,44	5,88
NCF	1.055,23	5,60
NCF-FUT-PAS	990,08	5,25
NCF-FUT-AGRI	1.049,04	5,57
Precipitação: 18.845,50 mm		

Tabela 4.13 – Valores médios de interceptação pelo dossel superior simuladas para a vegetação do experimento Controle e cenários de cobertura, calculados a partir das médias mensais, considerando o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	μ (mm dia ⁻¹)	σ (mm dia ⁻¹)	Mann-Whitney H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Controle	0,24a**	0,13	-
Pristina	0,48c**	0,25	Sim (5%)
ACF	0,29b**	0,15	Sim (5%)
NCF-RIO	0,25ab**	0,13	Não (5%)
NCF	0,24ab	0,13	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	0,23a	0,12	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	0,24a	0,13	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀= As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância..

4.8.4. Escoamento superficial

Na Figura 4.17 é exibido o escoamento superficial mensal acumulado para o experimento Controle e para os cenários de cobertura da terra durante todo o período de análise, e pode ser notado que este é maior conforme o nível de degradação da vegetação. A Tabela 4.14 apresenta os valores médios mensais de escoamento superficial para o Controle e cenários de cobertura da terra.

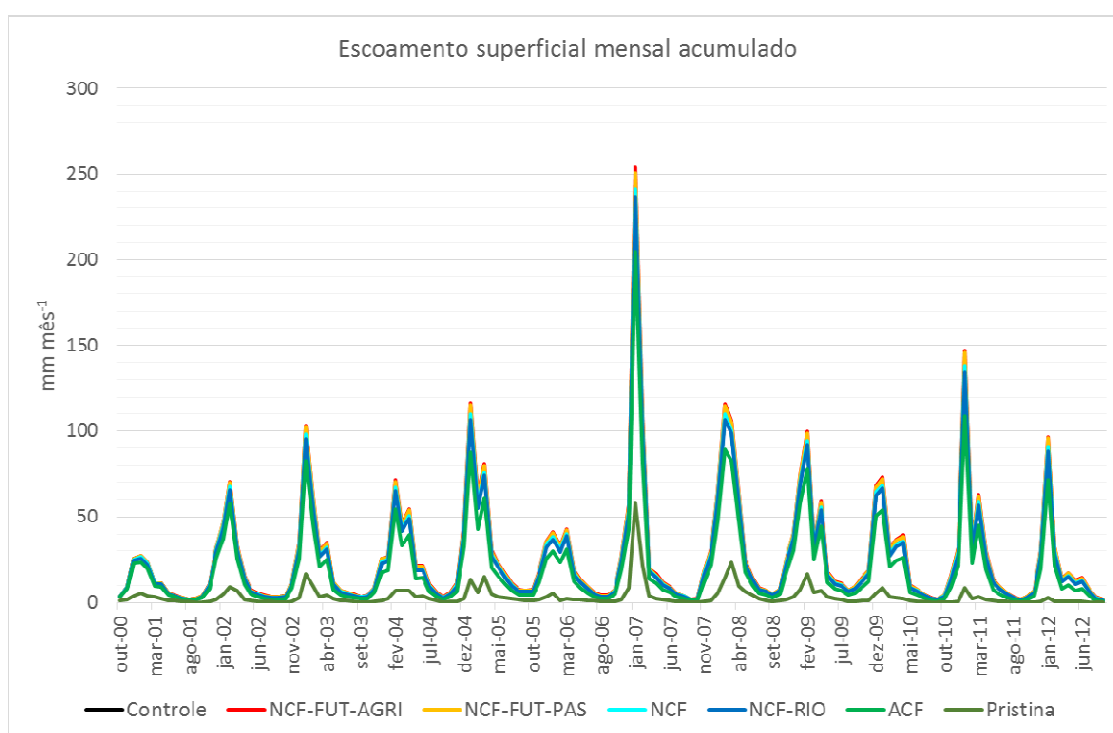


Figura 4.17 – Escoamento superficial acumulado mensal na Bacia do Rio Verde simulado para o experimento Controle e cenários de cobertura.

Tabela 4.14 – Valores médios e desvio padrão calculados a partir das médias mensais de escoamento superficial resultantes da simulação do experimento Controle e dos cenários de cobertura, considerando o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	μ (mm dia ⁻¹)	σ (mm dia ⁻¹)	Mann-Whitney H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Controle	0,84b**	1,07	-
Pristina	0,11a**	0,20	Sim (5%)
ACF	0,65b	0,88	Sim (5%)
NCF-RIO	0,81b	1,04	Não (5%)
NCF	0,84b	1,07	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	0,89b	1,12	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	0,90b	1,13	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀= As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância.

4.8.5. Processos subsuperficiais

Os valores dos processos subsuperficiais percolação, umidade do solo e profundidade do lençol freático são dados pelo DHSVM como médias para toda a área da bacia hidrográfica.

A percolação e a umidade do solo são simuladas nas três camadas de solo, sendo a camada 1 a mais superficial (0 cm a 30 cm de profundidade), a camada 2, de profundidade intermediária (30 cm a 1 m de profundidade), e a camada 3, maior profundidade (1 m a 2 m de profundidade).

4.8.5.1. Percolação

Os valores médios simulados de percolação para todo o período de análise estão contidos na Tabela 4.15, e na Figura 4.18 são apresentados os gráficos com as médias mensais simuladas para o experimento Controle e para os cenários de cobertura.

Tabela 4.15 – Percolação média simulada nas três camadas de solo, calculados a partir das médias mensais para o período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	μ (mm dia ⁻¹)	σ (mm dia ⁻¹)	Mann-Whitney H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Camada 1 (0 cm - 30 cm)			
Controle	36,42bc**	12,72	-
Pristina	14,45a**	4,53	Sim (5%)
ACF	31,85b**	10,93	Sim (5%)
NCF-RIO	35,92bc	12,52	Não (5%)
NCF	36,44bc	12,72	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	37,61c**	13,16	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	37,99c	13,25	Não (5%)
Camada 2 (30 cm - 100 cm)			
Controle	128,74c	41,57	-
Pristina	41,39a	15,38	Sim (5%)
ACF	110,13b	35,36	Sim (5%)
NCF-RIO	126,48bc	40,86	Não (5%)
NCF	128,42c	41,46	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	133,04c	43,08	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	134,46c	43,42	Não (5%)
Camada 3 (100 cm - 200 cm)			
Controle	314,80c	80,35	-
Pristina	107,64a	33,06	Sim (5%)
ACF	269,24b	66,49	Sim (5%)
NCF-RIO	308,83c	78,78	Não (5%)
NCF	313,41c	79,95	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	324,66c	83,64	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	327,80c	84,42	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀ = As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância.

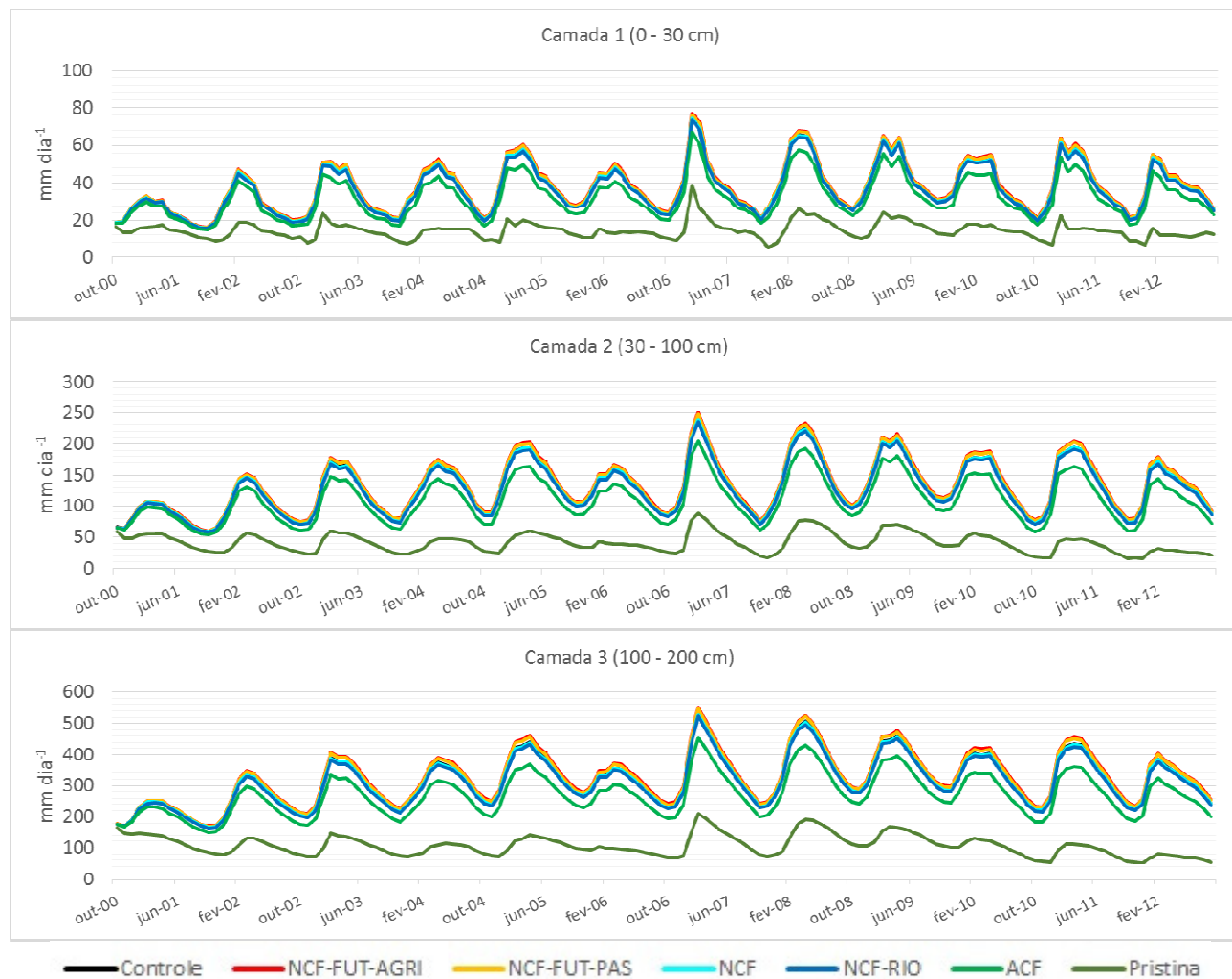


Figura 4.18 – Percolação média mensal simulada na Bacia do Rio Verde nas três camadas de solo.

4.8.5.2. Umidade do solo

Os percentuais médios simulados de umidade em cada camada de solo, calculados a partir das médias mensais para todo o período de análise, são mostrados na Tabela 4.16. Na Figura 4.19, são apresentados os gráficos com as médias mensais.

Tabela 4.16 – Percentuais médios simulados de umidade em cada camada de solo.

	μ (%)	σ (%)	Mann-Whitney H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Camada 1 (0 cm - 30 cm)			
Controle	27,85b**	8,02	-
Pristina	17,73a**	5,96	Sim (5%)
ACF	25,60b	7,58	Sim (5%)
NCF-RIO	27,58b	7,96	Não (5%)
NCF	27,78b	8,01	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	28,32b	8,13	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	28,55b	8,08	Não (5%)
Camada 2 (30 cm - 100 cm)			
Controle	34,50c**	7,39	-
Pristina	20,20a	6,14	Sim (5%)
ACF	31,42b	7,05	Sim (5%)
NCF-RIO	34,12bc	7,33	Não (5%)
NCF	34,40bc	7,38	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	35,12c	7,48	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	35,39c	7,41	Não (5%)
Camada 3 (100 cm - 200 cm)			
Controle	43,99c	4,87	-
Pristina	25,98a	5,27	Sim (5%)
ACF	39,92b	4,70	Sim (5%)
NCF-RIO	43,44c	4,86	Não (5%)
NCF	43,80c	4,86	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	44,78c	4,93	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	44,95c	4,97	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀= As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de *Kruskal-Wallis*, no nível de 5% de significância.

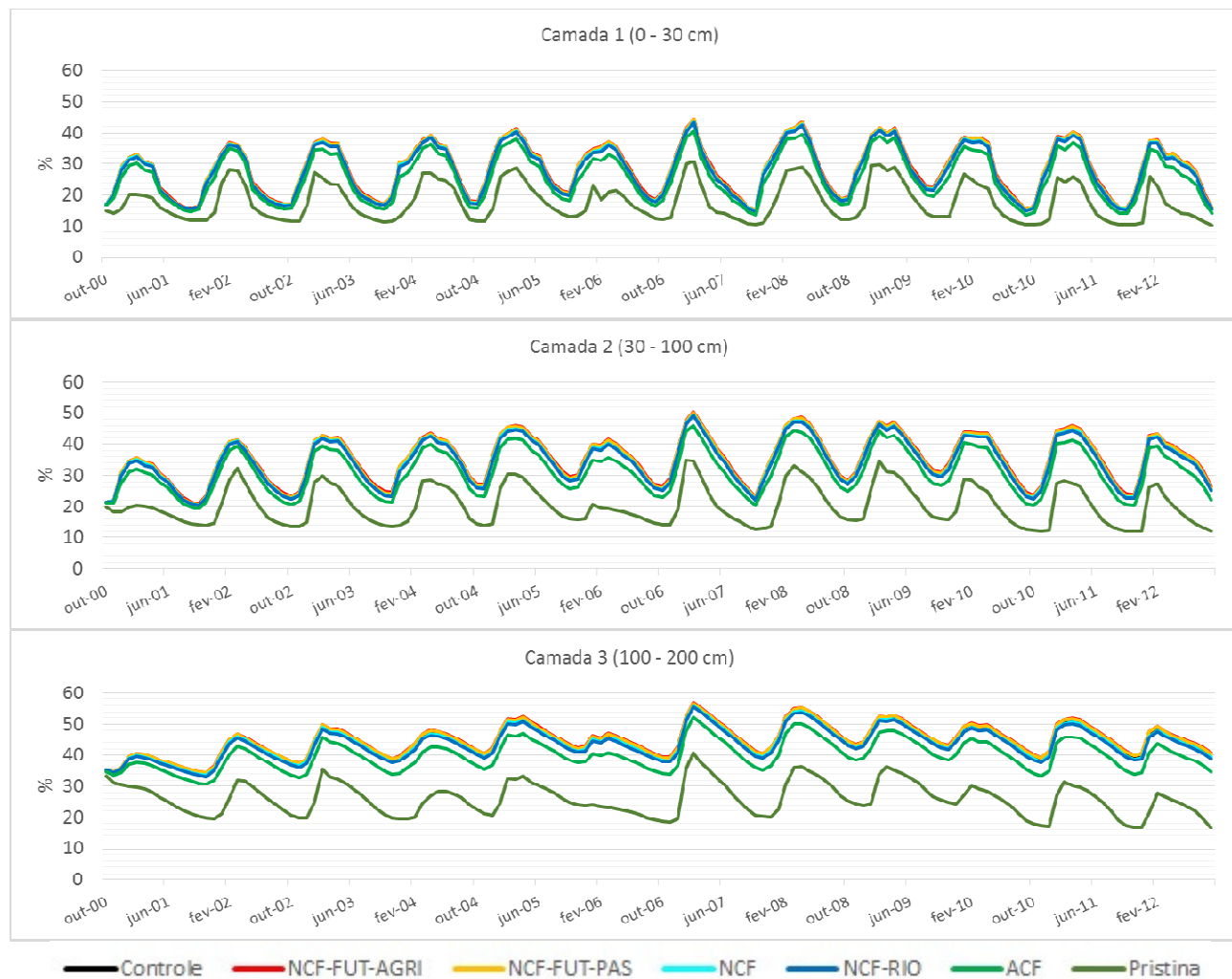


Figura 4.19 – Percentual de umidade do solo média mensal simulada nas três camadas de solo.

Os mapas de saída de umidade do solo simulada para as três camadas de solo seguem nas Figuras 4.20 a 4.22.

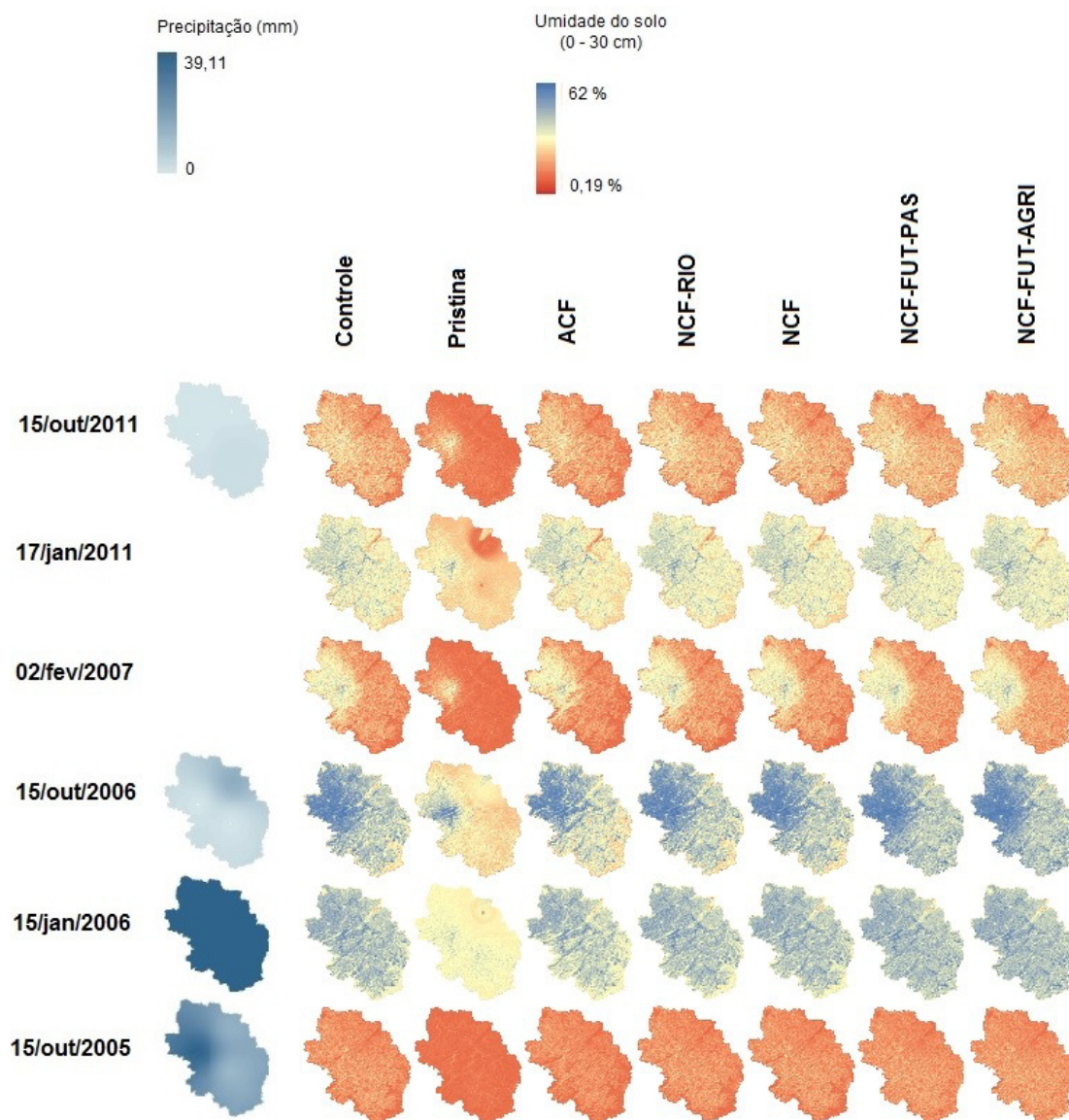


Figura 4.20 – Mapas de umidade do solo simulada na camada mais superficial do solo.

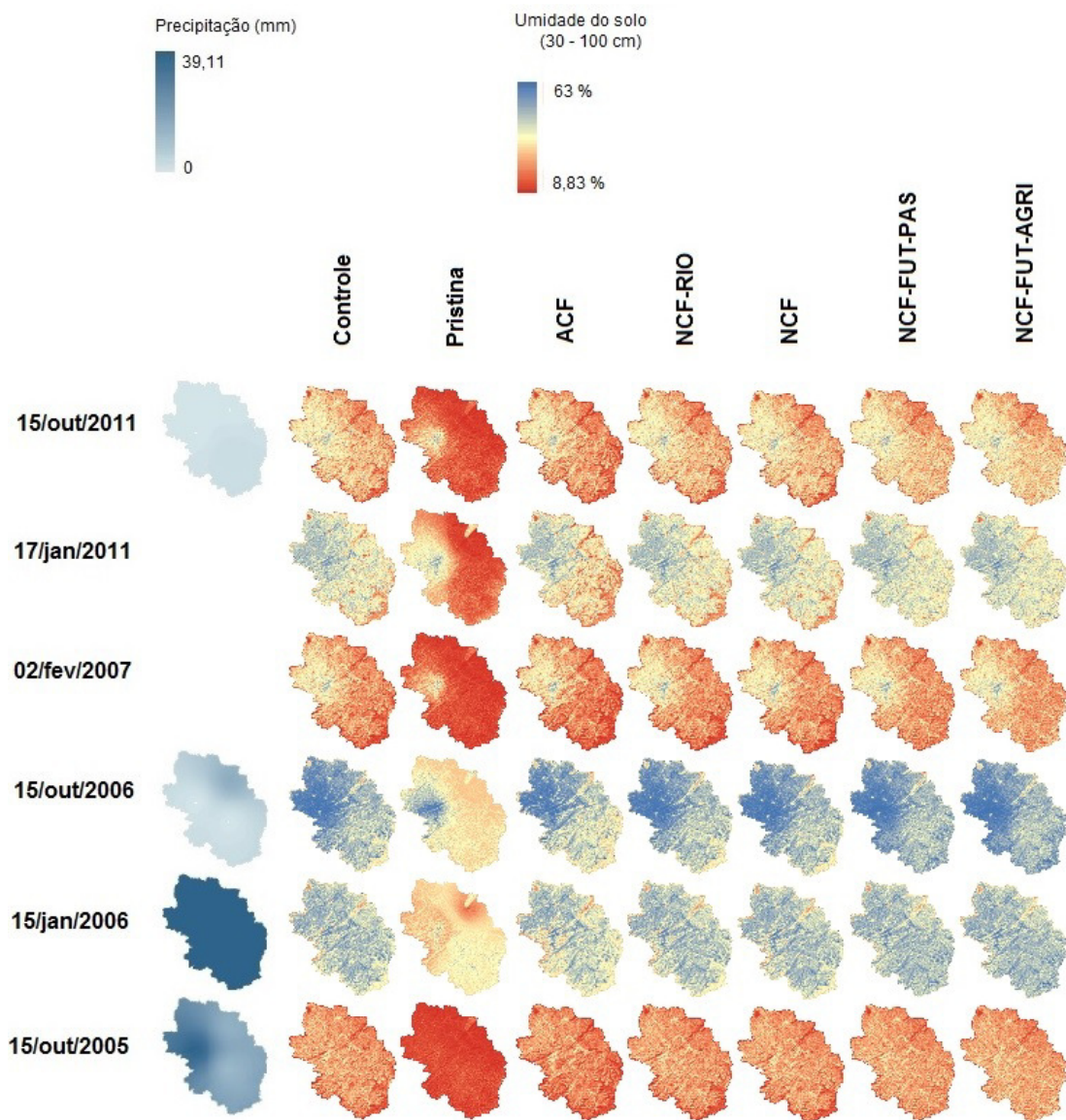


Figura 4.21 – Mapas de umidade do solo simulada na camada de profundidade intermediária do solo.

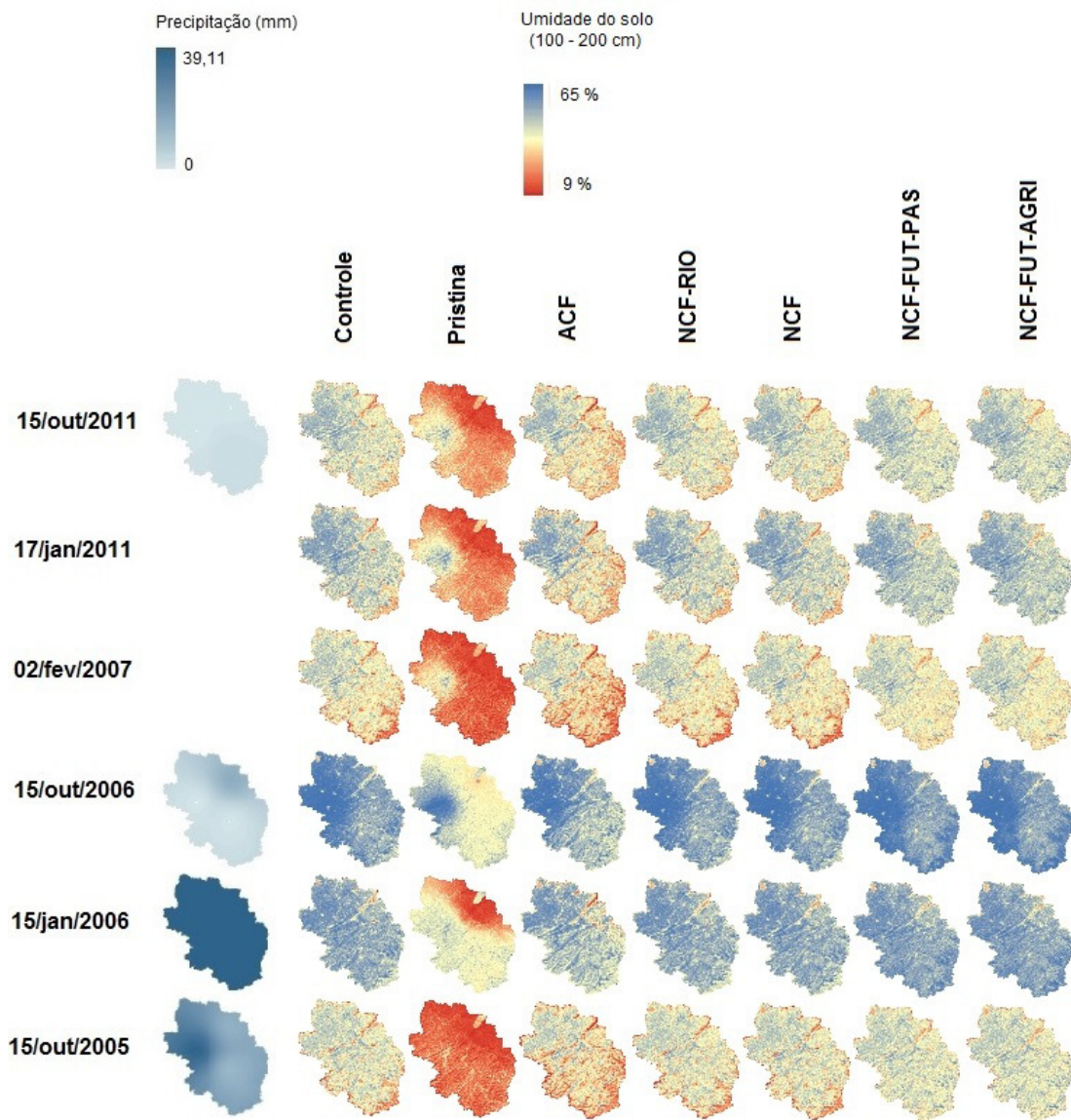


Figura 4.22 – Mapas de umidade do solo simulada na camada mais profunda do solo.

4.8.5.3. Profundidade do lençol freático

Na Figura 4.23, são apresentadas as profundidades médias mensais do lençol freático para o Controle e cenários de cobertura. Na Tabela 4.17, são mostrados os valores médios e desvio padrão do lençol freático para a área da Bacia do Rio Verde, de acordo com as simulações para o experimento Controle e para os cenários de cobertura, considerando todo o período de análise.

Para o lençol freático também foi possível gerar mapas da bacia, e as datas escolhidas são as mesmas que as dos mapas de evapotranspiração (Figura 4.24).

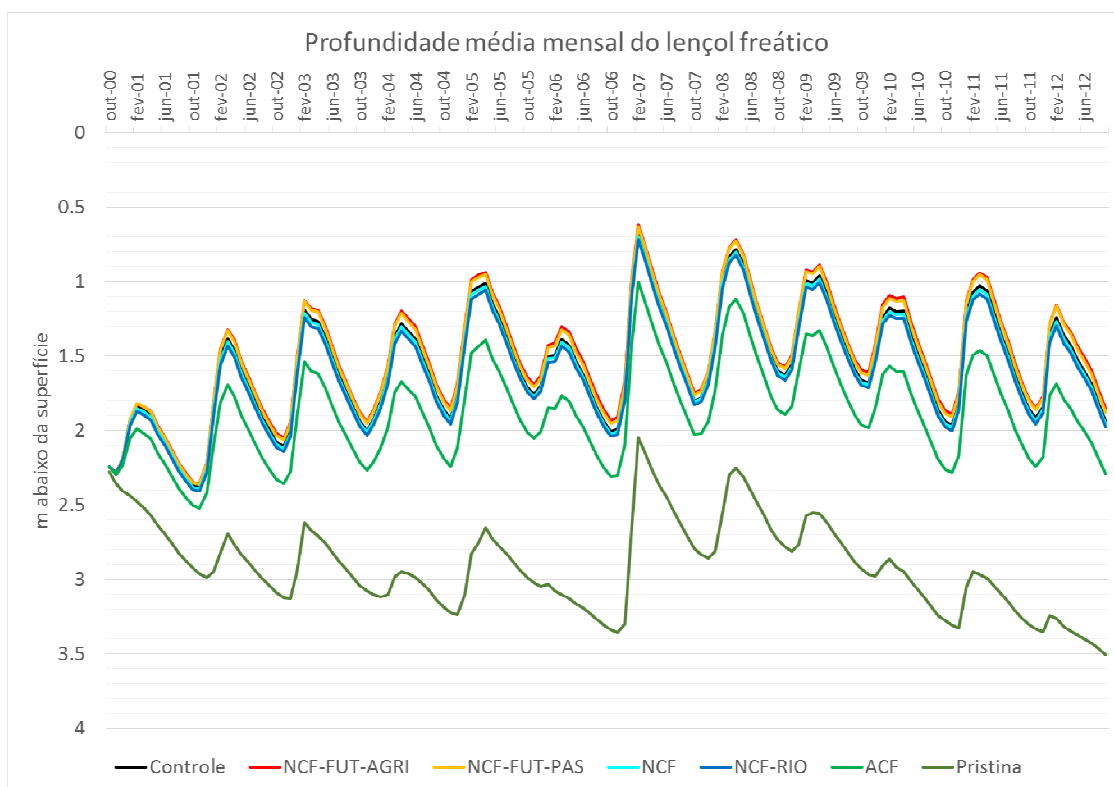


Figura 4.23 – Profundidade média mensal do lençol freático simulada na Bacia do Rio Verde.

Tabela 4.17 – Valores médios de profundidade do lençol freático simulados na Bacia do Rio Verde, calculados a partir das médias mensais do período de outubro de 2000 a setembro de 2012.

	μ (m)	σ (m)	Mann-Whitney H ₀ rejeitada? (% de probabilidade) *
Controle	1,56a**	0,37	-
Pristina	2,91c**	0,30	Sim (5%)
ACF	1,88b**	0,32	Sim (5%)
NCF-RIO	1,60a	0,36	Não (5%)
NCF	1,58a	0,36	Não (5%)
NCF-FUT-PAS	1,51a	0,38	Não (5%)
NCF-FUT-AGRI	1,50a	0,38	Não (5%)

* Teste em relação ao Controle; H₀ = As amostras têm distribuições idênticas (Percentual de probabilidade de erro entre parênteses).

** Ao lado das médias, as letras representam o grupo estatístico a qual cada tratamento (Controle e cenários de cobertura) pertence pelo teste de Kruskal-Wallis, no nível de 5% de significância.

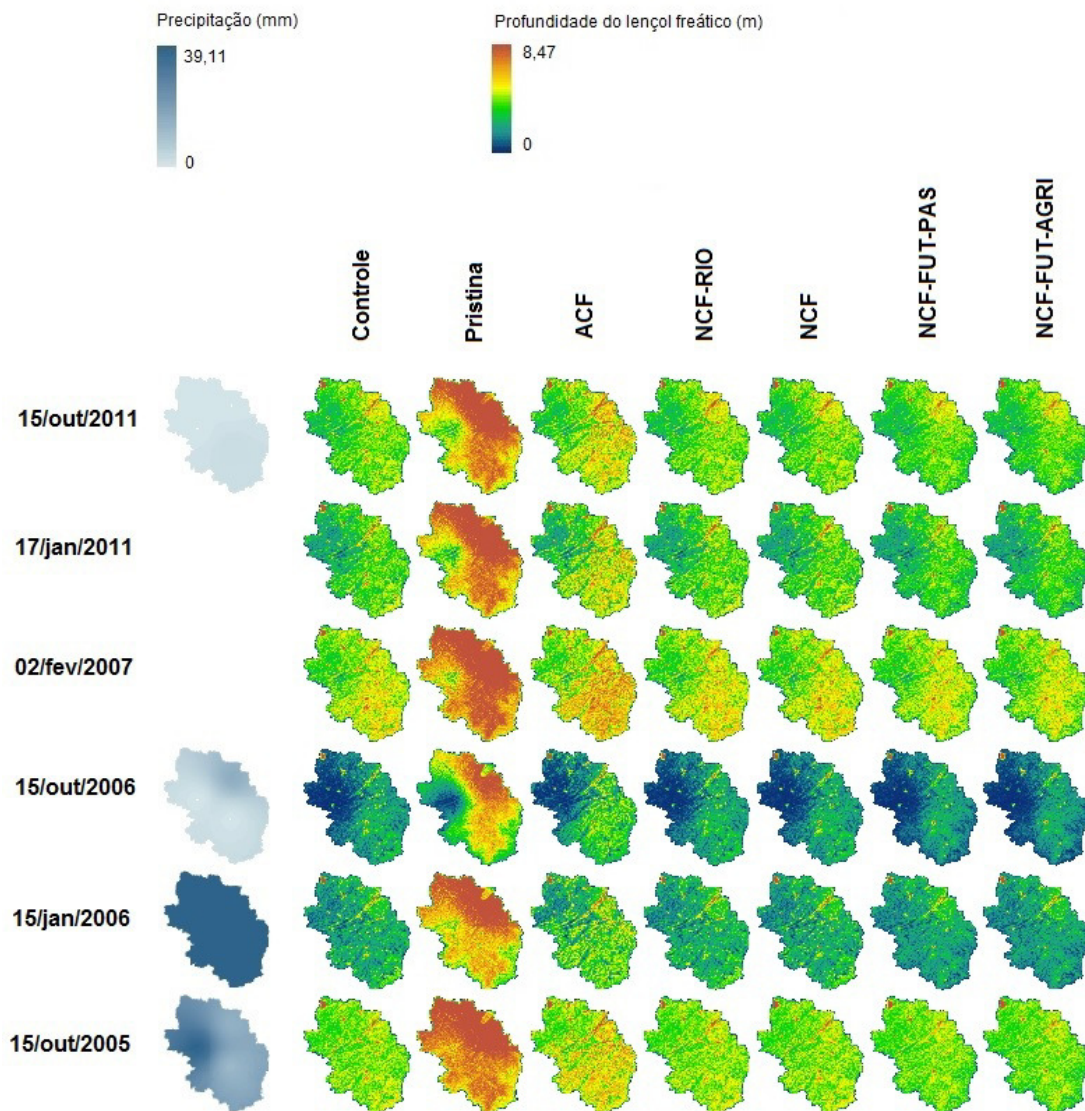


Figura 4.24 – Mapas de saída do DHSVM para profundidade do lençol freático.

5. DISCUSSÃO

5.1. Cobertura da terra

O índice *Kappa* realizado após edição da imagem classificada de 2006 foi considerado muito satisfatório (LANDIS; KOCH, 1977). Oliveira et al. (2014) também desenvolveram um mapa de cobertura da terra, com escala compatível à do presente trabalho, para boa parte da Bacia do Rio Verde delimitada aqui. Eles usaram uma imagem Landsat de 2005 e classificaram por máxima verossimilhança. Eles delimitaram esta bacia a partir de um exutório mais a montante do que o exutório usado neste trabalho, e sua área de drenagem ficou em 4.178 km², ocupando uma área 2.112 km² menor que a Bacia do Rio Verde delimitada a partir da estação Porto dos Buenos da Agência Nacional de Águas (ANA). O mapa por eles desenvolvido e o mapeamento realizado no presente trabalho possuem semelhança visual relativamente boa entre si, com predomínio de pastagem. Infelizmente, eles não descrevem o percentual ou a extensão das classes de cobertura para comparação mais detalhada.

É importante ressaltar, quanto ao predomínio da classe Pasto na Bacia do Rio Verde, que nesta classe também estão agrupados trechos de rios, bem como campos naturais. Outras considerações importantes são que a classe Afloramento rochoso refere-se principalmente à área de mineração predominante na serra de São Thomé das Letras, e a classe Água refere-se à água represada em lagos.

5.2. APPs nos topos das elevações e adequação de cobertura da terra

A comparação de escala 1:250.000 utilizada neste trabalho e 1:10.000 utilizada pelo Ministério Público do Estado de São Paulo (MPSP) (Figura 4.2) foi considerada satisfatória, uma vez que é esperado encontrar diferenças nas áreas resultantes quando existe grande diferença na escala de análise. Sendo

assim, pôde ser dada sequência ao método descrito no item 3.4.2.2 para a Bacia do Rio Verde.

Os resultados apresentados no presente trabalho apontam que a modificação na legislação florestal praticamente extinguiu as APPs em topo de elevações, ao menos nesta escala de análise. Somente em duas elevações foram encontradas APPs pelo NCF. A altitude das duas APPs é de aproximadamente 1.600 e de 2.400 m, sendo uma delas em região de alta montanha (> 1.800 m de altitude). Esta redução de APPs não cumpre, no mínimo, dois requisitos da própria legislação vigente, como preservar a estabilidade geológica e facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, como determina o Artigo 3º, inciso II, ao descrever as funções exercidas pelas APPs (BRASIL, 2012).

Victoria et al. (2008) delimitaram APPs em topo de morro e montanha para todo o Brasil pelo método de Hott et al. (2005) na resolução espacial de 90 m e escala 1:250.000, e a área de Minas Gerais onde fica localizada a Bacia do Rio Verde apresenta alguma concordância visual com o mapa de APPs gerado aqui para o ACF, mas não pode ser analisado em detalhes sem os dados em formato adequado.

Varjabedian e Mechi (2013) testaram os parâmetros do NCF em escala 1:10.000 e obtiveram resultados semelhantes aos encontrados aqui. Na mesma área de São José dos Campos que serviu como dado de referência para este trabalho (Figura 2), eles detectaram um decréscimo de APPs de topo de morro maior que 99% com a mudança na legislação. Oliveira e Fernandes Filho (2013) realizaram testes com os parâmetros do NCF sobre um MDE ASTER (resolução espacial de 30 m) e também relataram dificuldade em encontrar APPs de topos de morros, na região da Zona da Mata Mineira, e notaram que estes ficaram restritos às áreas montanhosas. Notaram ainda que o algoritmo que o ArcGIS utiliza para gerar a declividade a suaviza e então utilizaram outro procedimento para calculá-la de forma que a mesma não fosse suavizada, na tentativa de encontrar APPs de topo de morro. Talvez o MDE

que eles tenham utilizado não seja o mais apropriado, uma vez que o MDE do Projeto TOPODATA já foi testado em comparação com o ASTER para extração de rede de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica e o primeiro demonstrou resultados mais satisfatórios (MANTELLI et al., 2011).

O Grupo de Apoio Técnico Especializado do Ministério Público do Estado do Rio de Janeiro encontrou uma redução de 81,93% das APPs de topo de morro, estudando o 1º Distrito do Município de Nova Friburgo, no Rio de Janeiro, em uma escala de 1:5.000 (TORRES et al., 2012).

Estes resultados são preocupantes, uma vez que tanto neste estudo quanto nos demais estudos que comparam as áreas de APPs de topos de elevações pelos novos parâmetros do Código Florestal em relação aos parâmetros da Resolução CONAMA nº 303/2002, as áreas analisadas possuem relevo complexo. A Bacia do Rio Verde, por exemplo, encontra-se no sistema morfoclimático denominado “mares de morros”, e ainda assim, ironicamente quase não foram evidenciadas APPs nos topos das elevações.

A análise de adequação da cobertura da terra dentro dessas APPs pode indicar um motivo para a ocorrência das modificações na legislação florestal brasileira quanto à questão das APPs de topos de elevações. A maior parte destas APPs aqui analisadas apresentava cobertura inadequada de acordo com o ACF, ainda que campos naturais tenham sido incluídos na classe Pasto, considerada inadequada nesta análise. Com a aprovação do NCF, veio a garantia de ajuste aos proprietários de terras que estavam em situação de insegurança jurídica, tanto por meio dos novos parâmetros para o terço superior de uma elevação ser considerado APP, como por meio do Artigo 63º, que libera as atividades agrossilvipastoris dentro das APPs. A anistia para proprietários que desmataram irregularmente até 2008 e a recuperação de vegetação em APPs com espécies alóctones, como o eucalipto, são agravantes à degradação dos remanescentes florestais.

Embora o NCF possua pontos positivos, como o possível melhor monitoramento por meio dos Cadastros Ambientais Rurais e especificidades às necessidades de pequenos proprietários de terras, a substituição de uma lei que protegia as matas nativas para uma legislação que priva a população de seus serviços ecossistêmicos é, no mínimo, alarmante.

5.3. Mapas de entrada para o DHSVM

5.3.1. Topografia e arquivos gerados a partir dela

A topografia em 150 m de resolução espacial foi suavizada em relação ao SRTM original de 90 m, e o arquivo de profundidade do solo gerado a partir desta topografia mostrou coerência ao apresentar maior profundidade nas partes baixas da bacia.

Para representar o melhor possível a largura dos canais de drenagem de ordens maiores (5 e 6 pelo ordenamento de Strahler), a célula de grade do MDE teve de ser estabelecida como o tamanho máximo aceito pelo DHSVM, 150 m de resolução, uma vez que a área do trecho de rio não pode ultrapassar a área da célula de grade. Esta foi uma limitação encontrada no DHSVM que não foi localizada na literatura e nem no tutorial do modelo, mas somente no fórum de discussão do mesmo.

Esta limitação obrigou a considerar a largura máxima dos canais de ordem 6 em 60 m durante os períodos de cheia e em 15 m durante os períodos secos, sendo que na foz da bacia a largura pode chegar a mais de 100 m ao visualizar e medir a região pelo *Google Earth Web* (GEW).

5.3.1.1. Mapa de solos

Inicialmente, foi testada a utilização de um mapa de tipos de solo produzido pela EMBRAPA (1999) para rodar o DHSVM. Porém, foi notado que durante os ajustes nos parâmetros de solo, as respostas hidrológicas não mantiveram uma lógica compreensível. Isto provavelmente ocorreu devido às informações

daquele mapa que, embora corretas, não coincidem espacialmente com as informações de topografia ou cobertura da terra presentes na Bacia do Rio Verde.

Cuartas (2008) e Cuartas et al. (2012), relataram que a utilização de mapas associados a ambientes, como o descritor de terrenos HAND, que gera ambientes altamente correlacionados à saturação do solo a partir da topografia, facilitou o processo de calibração do modelo DHSVM. No caso desses trabalhos, eles utilizaram este modelo para detalhar as informações do solo em uma microbacia da Amazônia central com resolução de MDE muito detalhada.

Aqui, optou-se por utilizar o descritor de terrenos HAND para associar os ambientes de potencial de drenagem diferenciado, proporcionado pela topografia, como uma tentativa bem sucedida de obter respostas hidrológicas coerentes conforme os ajustes nos parâmetros de solo durante a calibração. Como o mapa de ambientes gerado pelo modelo HAND foi produzido a partir do mesmo MDE pelo qual foram produzidos os mapas da rede de drenagem e de profundidade dos solos, a delimitação de seus ambientes coincide espacialmente com estas informações, ficando apenas as informações de cobertura da terra sem coincidir espacialmente com o relevo. Tal coincidência espacial de informações correlacionadas provavelmente auxiliou na manutenção de uma lógica coerente nas respostas da vazão conforme os ajustes nos parâmetros de solo – condutividade hidráulica, decaimento da condutividade com a profundidade e capacidade de infiltração. Assim, as respostas aos ajustes foram se tornando compreensíveis, o que facilitou a calibração do DHSVM de forma manual.

Uma outra opção seria subdividir as classes de solos de acordo com as classes de cobertura da terra, proporcionando taxas de infiltração diferenciadas para cada tipo de vegetação/cobertura. Porém, o aumento de informações acerca dos parâmetros de solos aumentaria significativamente e, com isso, a complexidade do processo de calibração.

5.3.2. Mapas dos cenários de cobertura da terra

Os mapas que representam maior transição de cobertura em relação ao experimento Controle (Figura 4.1) são dos cenários Pristina e ACF (Figura 4.4), com maiores extensões de classe Floresta. Quanto aos cenários futuros, mais degradados, NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI, estes possuem pequena diferença em relação ao Controle, uma vez que havia pouca área classificada como Floresta dentro das APPs do ACF.

Se a classe Floresta dentro das APPs do ACF em Unidades de Conservação (UCs) tivesse sido substituída pelas classes dos respectivos cenários futuros (Pasto e Agricultura, no caso) após a modificação da lei de topo de morro, a transição de cobertura teria sido significativa. No entanto, não foi desejado avançar com a degradação nestas áreas, uma vez que se espera que em UCs os incentivos para preservação das florestas localizadas em cabeceiras, como, por exemplo, o Projeto Produtores de Água, da ANA, sejam mantidos. A Figura 5.1 mostra parte da Bacia do Rio Verde onde são encontradas as principais UCs em conjunto com as APPs de topo do ACF contidas nestas UCs, e a cobertura de classe Floresta do mapa de 2006, para a visualização espacial destas afirmações.

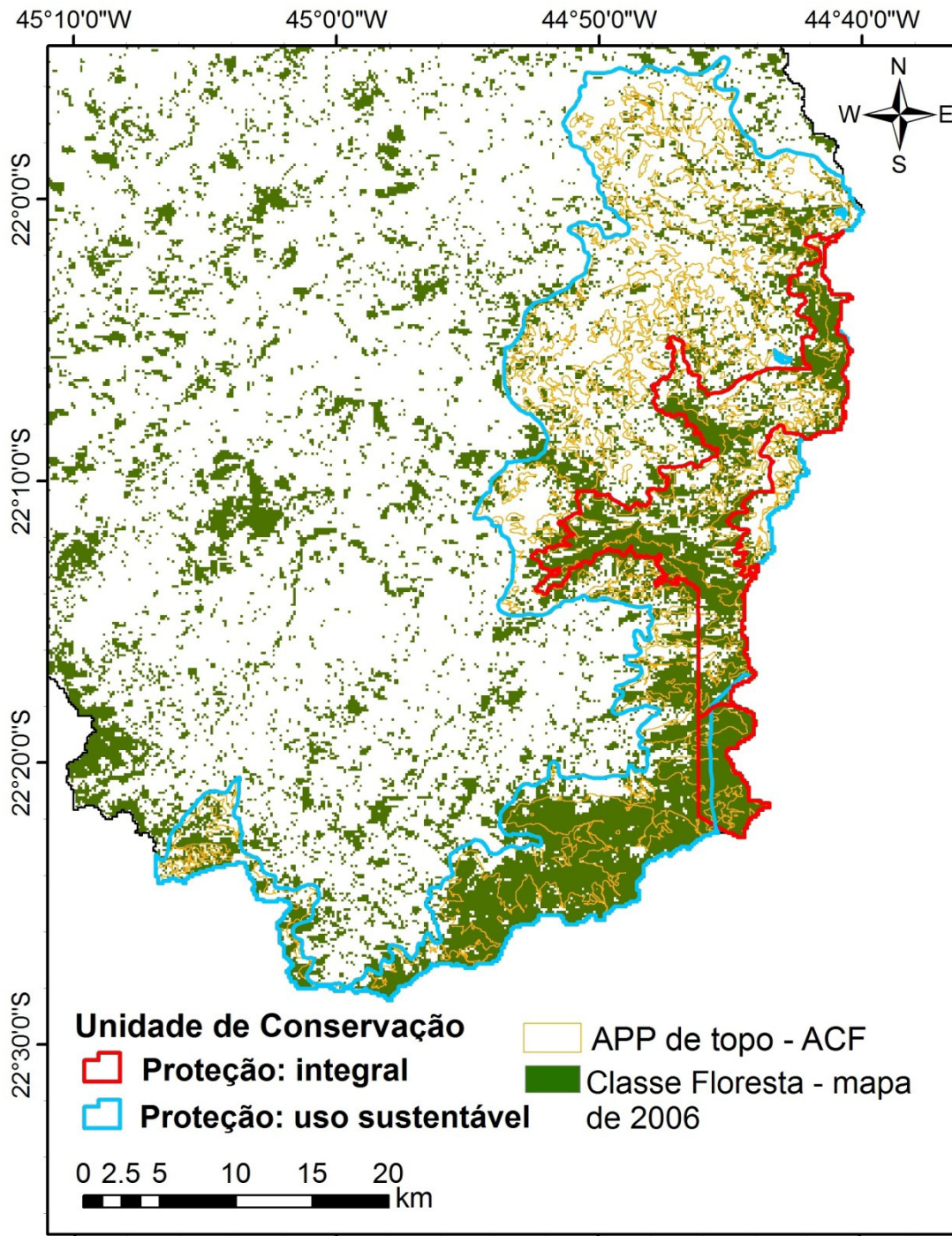


Figura 5.1 – Localização e tipo de proteção das principais Unidades de Conservação (UCs) encontradas na Bacia do Rio Verde, mostrando em detalhes as APPs de topo delimitadas para o ACF contidas dentro destas UCs, bem como a classe Floresta contida no mapa de 2006.

5.4. Vazão observada e simulada pelo experimento Controle

Quanto à calibração e validação do modelo, conseguiu-se alcançar: (a) $R^2 \geq 0,90$; (b) $NSE > 0,80$; (c) $RMSE <$ metade do valor do desvio padrão dos dados observados; (d) Índice de concordância $> 0,75$; e (e) $PBIAS < 3\%$ de sobrestimativa em relação à vazão média mensal. Considerando que o modelo foi calibrado e validado para um período total de 12 anos e que o DHSVM é um modelo complexo que exige muitos parâmetros de entrada, todos os índices estatísticos foram considerados satisfatórios.

A distribuição média mensal dos picos de chuva ocorreu em concordância com a precipitação acumulada mensal, o que pode ser particularmente notado durante o ano de 2006 (Figura 4.7), ano que não houve um pico maior nem de precipitação nem de vazão, mas dois picos menores em janeiro e em março. Isto mostra que o DHSVM simulou a vazão mensal de forma coerente em resposta à precipitação.

A análise da sazonalidade (Figura 4.8) permitiu verificar que os meses mais secos e mais úmidos coincidiram entre vazão observada e simulada com uma boa correlação para o período de análise, e ainda possibilitou separar a análise estatística (teste de *Kruskal-Wallis*) das médias mensais realizadas entre os cenários de cobertura da terra e o experimento Controle.

A análise na escala de tempo diária (Figura 4.9) também mostrou correlação relativamente boa entre vazão observada e simulada considerando o período todo de análise. A análise diária permitiu estimar o tempo de resposta *a priori* da vazão na estação Porto dos Buenos em decorrência da chuva precipitada na área de drenagem da Bacia do Rio Verde em aproximadamente 11 dias. Porém, é importante ressaltar que em uma bacia do tamanho da Bacia do Rio Verde, variabilidades como a localização e o deslocamento da chuva deveriam ser consideradas para melhor definição do tempo de resposta.

As vazões maiores em resposta aos eventos de chuva mais frequentes do que em resposta a um único evento de chuva mais intenso, quando comparados aos dados observados (Figura 4.10), indica que a umidade do solo simulada pode não estar totalmente de acordo com a realidade encontrada na Bacia do Rio Verde, o que possivelmente ocorreu em resposta à parametrização do solo. No entanto, é esperado encontrar pequenas discordâncias ao analisar em detalhes uma simulação diária quando a calibração foi realizada para o período mensal.

5.5. Respostas hidrológicas aos cenários de cobertura

5.5.1. Vazão

A análise comparativa das vazões para os cenários de cobertura em relação ao experimento Controle ocorreu na escala de tempo mensal para o período completo (Figura 4.11), e na escala diária para os períodos de cheia de 2006/2007 (1º de dezembro de 2006 a 28 de fevereiro de 2007) e de 2010/2011 (1º de dezembro de 2010 a 28 de fevereiro de 2011) (Figura 4.12). A curva de permanência das vazões foi apresentada na Figura 4.13. Por meio da observação dos gráficos, pode ser notado que:

- a) A linha do experimento Controle foi sobreposta pela linha do cenário NCF, em decorrência da cobertura da terra dos respectivos mapas ser muito similar (Figura 4.4), conservando inclusive o mesmo percentual de classes de cobertura (Tabela 4.4);
- b) O cenário NCF-FUT-AGRI apresentou os picos de vazão mais altos e, dentre os cenários relacionados com o Código Florestal, o cenário ACF apresentou os menores picos de vazão;
- c) O cenário vegetação Pristina, composto quase que inteiramente pela classe de cobertura Floresta (98%) e uma pequena parte pela classe

Capoeira, apresentou picos de vazão muito baixos, bem como fluxo de base;

- d) Os cenários de cobertura mais degradados tiveram um aumento de vazão um pouco mais rápida em decorrência de precipitação do que os cenários mais preservados, e a diminuição da vazão foi mais demorada em resposta à diminuição das chuvas, o que pode ser observado nas Figuras 4.12 e 4.13. Esta diferença no tempo de resposta poderia ser atribuída às menores taxas de infiltração dos cenários de cobertura mais degradados se as classes de solos tivessem sido subdivididas entre os tipos de cobertura com diferentes taxas de infiltração, mas no caso desta simulação, na qual todas as classes de solos foram parametrizadas com a mesma taxa de infiltração, tal diferença se deve à maior umidade do solo dos cenários mais degradados decorrentes das menores taxas de interceptação e evapotranspiração.

É importante discutir a observação contida no item c, ainda mais em meio à crise hídrica pela qual a região sudeste vem passando atualmente. É de amplo conhecimento que, ao substituir uma área degradada por floresta, a vegetação consome mais água armazenada no solo (SADEGHI et al., 2015; ZHANG; HISCOCK, 2010), em decorrência do aumento do LAI (maior interceptação e evapotranspiração) (VANSHAAR et al., 2002), da taxa fotossintética e da profundidade das raízes, diminuindo abruptamente a vazão nos canais de drenagem da bacia, o que tende a se estabilizar ao passo que a vegetação se desenvolve, o que pode levar 40 anos ou mais (DONOHUE et al., 2007).

A simulação das respostas hidrológicas da Bacia do Rio Verde com sua vegetação nativa (cenário Pristina), representaria a substituição de uma cobertura degradada (mapa de 2006 do experimento Controle), pelo reflorestamento total da bacia com vegetação plenamente desenvolvida. Ainda que a vegetação aqui representada seja adulta, valem as observações anteriores, quanto ao maior consumo de água do solo por florestas. Apesar da

infiltração geralmente ser maior sob cobertura florestada, não foi realizada uma diferenciação de cada tipo de solo por classe de vegetação, o que poderia melhorar a simulação.

O aumento da área de floresta do experimento Controle para o cenário Pristina foi de 79,94% (Tabela 4.4), o que diminuiu a vazão em média 71,72%, considerando o período todo de análise (Tabela 4.7), apresentando relativa proporção inversa. Aqui, a umidade do solo se apresentou muito baixa sob o cenário Pristina em relação ao Controle e quando comparada com estudos observacionais em diversos tipos de cobertura da terra, resultando na vazão extremamente baixa. Ryu et al. (2008), por exemplo, utilizando radiômetro de microondas, observaram maior umidade do solo sob coberturas florestadas e sob cascalho em relação a solo exposto, vegetação arbustiva e agricultura.

É importante ressaltar que o DHSVM, como muitos modelos, foi construído a partir de teorias baseadas em pequena escala, bem como a parametrização dos dados de entrada realizada neste trabalho. Extrapolar as interações entre os processos hidrológicos para escalas maiores resulta em comportamentos altamente complexos e não lineares (SIVAPALAN, 2005).

Desta forma, apesar de na literatura ser bem aceito que o reflorestamento diminui os picos de vazão (HOYT; LANGBEIN, 1955, citado por ALLEN; CHAPMAN, 2001; RAMÍREZ et al., 2008, p. 296-297), mas pode manter ou mesmo aumentar o fluxo de base das bacias hidrográficas (GUO et al., 2008; WANGPIMOOL et al., 2013), no presente trabalho a manutenção do fluxo de base não foi observada para o cenário Pristina.

A revisão de Bruijnzeel (2004) discute estudos com resultados controversos quanto ao fluxo de base dependendo da escala de análise, do clima no local do estudo, da espécie vegetal, da densidade populacional, dentre outros aspectos. Ele ressalta que, apesar das florestas amenizarem os picos de vazão e com isso os processos erosivos, se a cobertura que substituir a floresta após desmatamento ainda permitir boa infiltração da água da chuva, os fluxos de

base podem aumentar, devido às menores taxas de evapotranspiração de vegetações menos desenvolvidas. Zhang e Schilling (2006), por exemplo, observaram aumento no fluxo de base na Bacia do Rio Mississippi (EUA) ao longo de 40 anos de expansão do cultivo de soja nessa área de captação de grande porte.

Especificamente quanto aos cenários relacionados ao Código Florestal, o ACF apresentou diferença significativa na vazão simulada em relação ao Controle pelo teste de *Mann-Whitney* ($p < 0,05$), ou seja, se a legislação para proteção de topos de morros e montanhas fosse obedecida à época do mapa (2006), a vazão estaria mais baixa do que a encontrada, ocasionando menos cheias extremas e erosão. Os outros cenários não apresentaram diferença estatística em relação ao Controle devido à pouca área de transição de cobertura destes cenários (NCF-RIO, NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI) em relação ao Controle, mas ainda assim, o DHSVM apresentou sensibilidade à transição de cobertura, que pode ser verificada pelos gráficos de vazão, com exceção do cenário NCF. Os possíveis cenários futuros decorrentes da mudança no Código Florestal quanto à proteção dos topos de elevações, NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI, apesar de não apresentarem diferença estatística pelo teste de *Mann-Whitney*, apresentaram picos de vazão visivelmente mais altos que o Controle, devido às menores taxas de evapotranspiração e maior escoamento superficial.

Sendo assim, a ordem decrescente dos cenários com maiores picos de vazão simuladas foi: NCF-FUT-AGRI > NCF-FUT-PAS > Controle > NCF > NCF-RIO > ACF > Pristina.

O cenário NCF-FU-AGRI apresentou maior vazão simulada que o NCF-FUT-PAS devido ao aumento do fluxo de base ser maior no primeiro do que no segundo, provavelmente em razão da cobertura Pasto ocupar toda a célula de grade, enquanto a fração de cobertura de cada célula de grade da classe Agricultura ter sido parametrizada em 0,8. Este aumento no fluxo de base foi

refletido nos maiores picos de vazão e também numa maior vazão em geral, em concordância com os resultados de Zhang e Schilling (2006).

Quanto ao teste de *Kruskal-Wallis*, foram formados apenas dois grupos estatísticos no nível de 5% de significância, tanto pela comparação do período completo, quanto pela comparação do fluxo de base (períodos de seca, com vazões médias $< 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e períodos de cheia (vazões médias $> 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), onde o cenário Pristina formou um grupo sozinho, e o restante dos cenários foi agrupado em um mesmo conjunto estatístico.

5.5.2. Evapotranspiração

Pela análise da Figura 4.14, foi notado que a evapotranspiração na Bacia do Rio Verde foi maior para todos os cenários de cobertura em dias sem chuva, como no caso dos mapas das datas 2 de fevereiro de 2007 e 17 de janeiro de 2011. A razão disso é que em dias sem chuva há maior radiação solar, o que aumenta a evapotranspiração. Apesar da evaporação aumentar conforme o aumento na temperatura, pode ser percebido por meio da observação de outras datas durante o verão (mês de janeiro) na região de estudo, que a temperatura não influenciou tanto na evapotranspiração quanto o aumento da radiação solar de onda curta incidente nos dias secos. Inclusive, a radiação solar direta parece ter influenciado mais do que a cobertura da terra sobre as taxas de evapotranspiração, por meio da observação desta figura.

Ainda sobre a Figura 4.14, pode ser notado que no mapa do dia 15 de outubro de 2011 o cenário Pristina evapotranspirou menos que os demais cenários e Controle. Isto ocorreu devido à falta de disponibilidade de água no solo até os 2,0 m de profundidade (zona de raízes) para este cenário especificamente neste período seco, como pode ser conferido pelos mapas de umidade do solo (Figuras 4.20 a 4.22) e pelos mapas de profundidade do lençol freático (Figura 4.24).

Por meio da observação da Tabela 4.10, que considera o percentual evapotranspirado para todo o período de análise, verifica-se que a cobertura também influenciou bastante este processo, e não somente a radiação solar direta. Por meio desta tabela, pode ser notado que o cenário Pristina evapotranspirou mais de 90% da água que entrou no sistema. A evapotranspiração de 62,6% do Controle para o período total de análise está na faixa da observada por Ruhoff (2011) de 60% para a Bacia do Rio Grande, da qual a Bacia do Rio Verde faz parte.

Pela observação da Tabela e 4.11 e das Figuras 4.14 e 4.15, também pode ser notada a influência relativamente alta da cobertura sobre as taxas de evapotranspiração, conforme a diferença entre um e outro cenário. Na Figura 4.14 pode ser notado ainda que a sazonalidade da evapotranspiração é diferente da vazão, apresentando as maiores taxas durante o mês de abril e as menores durante o mês de dezembro, para o período analisado. Esta sazonalidade está relacionada à cobertura de nuvens, umidade do ar e disponibilidade de água armazenada no solo. A cobertura de nuvens e a umidade do ar são inversamente relacionadas com as taxas de evapotranspiração, ao passo que a água armazenada no solo é diretamente relacionada a estas taxas.

Comparando estes dados com os apresentados por Ruhoff et al. (2013), para o modelo MGB na Bacia do Rio Grande durante o ano de 2001, o DHSVM sobrestimou em até 42% a evapotranspiração para o mês de abril e subestimou em até 50% este processo para o mês de dezembro deste ano (Figura 5.2). Provavelmente, isto se deve ao maior LAI na classe Floresta escolhido a partir da literatura, visando a diminuição dos picos de vazão e também devido à diferença na escala do estudo. De qualquer forma, o padrão apresentado pelos dois estudos foi relativamente semelhante, ao observar o gráfico.

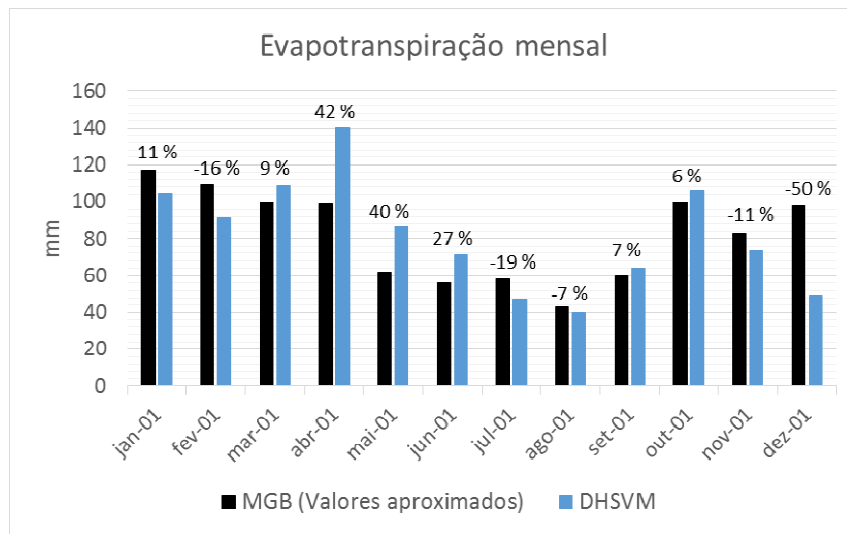


Figura 5.2 – Comparação da evapotranspiração mensal simulada pelo DHSVM (Controle) para a Bacia do Rio Verde e pelo MBG (Ruhoff et al., 2013), para a Bacia do Rio Grande. Sobre as barras, encontram-se as diferenças percentuais do DHSVM em relação ao MGB.

Quanto às análises estatísticas (Tabela 4.11), o cenário Pristina foi o único que se diferenciou do Controle pelo teste de *Mann-Whitney* com 5% de probabilidade de erro, e o cenário ACF, mostrou diferença em relação ao Controle com 10% de probabilidade de erro. O teste de *Kruskal-Wallis* separou os cenários de cobertura e o experimento Controle em somente dois grupos estatísticos, sendo que o cenário Pristina formou um grupo sozinho, e o restante dos tratamentos pertenceram ao mesmo grupo.

5.5.3. Interceptação

A interceptação pela vegetação no experimento Controle de 5,6% para a Bacia do Rio Verde (Tabela 4.10) considerando o período todo de análise, está em cerca de metade a um terço do que é encontrado na literatura para florestas tropicais. De acordo com Fujieda et al. (1997), os valores de interceptação pelos dosséis medidos em florestas tropicais vão desde 7,2 a 22,0% do total de água precipitado, sendo que em suas medições de campo para o período de 10 anos em Cunha (SP), localizada na Serra do Mar, eles encontraram o valor médio de 15%. Arcova et al. (2003), também estudando interceptação no município de Cunha, encontraram 18,6%.

Apesar de baixo em comparação com florestas tropicais, o valor encontrado no presente estudo parece adequado para a Bacia do Rio Verde, uma vez que somente 30,68% de sua cobertura possui dossel superior, e o restante é predominado basicamente por pastagens.

Para o cenário Pristina, cuja classe Floresta ocupa 98,8% da bacia, o valor de 11% simulado neste trabalho é próximo ao encontrado por Ubarana (1996), de 11,6% na Reserva do Jarú, em Rondônia, por Castro et al. (1983) citado por Fujieda et al. (1997), que encontraram 12,4% em Viçosa (MG), e por Moura et al. (2009), que encontraram 12,7%, em região de Mata Atlântica localizada em Recife (PE).

Apesar de na maior parte dos processos simulados pelo DHSVM o cenário NCF-FUT-AGRI se comportar como o cenário de cobertura com maior nível de degradação, como mostrado, por exemplo, por meio das maiores vazões simuladas, no processo de interceptação quem ocupou o papel de cenário com maior nível de degradação foi o NCF-FUT-PAS, apresentando as menores médias mensais (Figura 4.16), uma vez que a cobertura Pasto não possui dossel superior. Neste trabalho, a classe Agricultura possui dossel superior por representar cafezais, que se constituem de plantações de árvores de pequeno porte e, portanto, foram consideradas como um dossel superior.

Quanto aos grupos estatísticos das médias mensais (Tabela 4.11), o Controle ficou no mesmo que os cenários NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI, e o NCF ficou no mesmo grupo estatístico que o cenário NCF-RIO, que é um grupo intermediário entre os grupos do Controle e do ACF. Este fato foi de certa forma surpreendente, porém ao analisar a soma dos postos ficou claro que a análise possui sentido, mas se apresenta limítrofe para o mesmo grupo do Controle. O resultado desta análise pode ser encontrado no Apêndice B (Figura B.1) deste trabalho, para conferência.

5.5.4. Escoamento superficial

O escoamento superficial drenado para os canais foi proporcional ao nível de degradação do cenário de cobertura (Figura 4.17), sendo maior no cenário NCF-FUT-AGRI do que no cenário NCF-FUT-PAS. Apesar dos solos sob pastagens em geral se apresentarem mais compactados do que solos sob cultivos agrícolas e, portanto, geralmente maior escoamento superficial (WANG et al., 2013), aqui o maior escoamento superficial foi observado no cenário NCF-FUT-AGRI, o que provavelmente ocorreu em decorrência de excesso de saturação. Tal excesso de saturação provavelmente também resulta da maior fração de cobertura da classe Pasto (toda a célula) em relação à classe Agricultura (0,8 da célula). Yuan et al. (2015), ao simularem escoamento superficial em diversos cenários de cobertura da terra também obtiveram valores maiores para o cenário predominado por agricultura em relação ao cenário predominado por pastagens, e menores valores de escoamento quanto maior a área ocupada por florestas.

Quanto às análises estatísticas (Tabela 4.12), o teste de *Mann-Whitney* com probabilidade de erro de 5% detectou diferenças para os cenários Pristina e ACF, em relação ao Controle. O teste de *Kruskal-Wallis* dividiu os tratamentos entre dois grupos estatísticos, sendo o cenário Pristina o único que se diferenciou dos demais.

5.5.5. Processos subsuperficiais

Os processos subsuperficiais percolação e umidade do solo foram aqui simulados em três camadas de solo. É importante explicar a razão das camadas de solo só irem a uma profundidade de 2 m apesar do arquivo de profundidade do solo alcançar até mais de 8 m. Pela estrutura do DHSVM, as profundidades das camadas de solo são determinadas por meio da profundidade da zona de raízes da vegetação, razão pela qual estas zonas foram mantidas para todas as classes de cobertura. A soma de cada zona de raiz determinada para cada cobertura não pode ultrapassar a profundidade

mínima do arquivo de profundidade do solo, porque este apresenta sempre menor profundidade quanto maior a altitude do MDE e, no caso da Bacia do Rio Verde, as florestas estão localizadas, em geral, nas maiores altitudes.

Os processos de percolação (Figura 4.18) e umidade do solo (Figura 4.19), simulados para cada camada de solo, por estarem fortemente relacionados entre si, se mostraram bem semelhantes. Ambos mostram valores maiores conforme o aumento na profundidade do solo devido à evaporação e captura de água pelas raízes das plantas nas primeiras camadas, além da força gravitacional. O cenário Pristina apresentou tendência em diminuir a percolação e umidade nas três camadas de solo. Este fator gerou uma maior amplitude nos valores percentuais de umidade simulada na camada mais profunda do solo para o cenário Pristina em relação às outras simulações (Tabela 4.14 e Figura 4.18). De acordo com Zhang e Hiscock (2010), o reflorestamento pode reduzir de 15% a 90% a recarga de água no solo ao substituir pastagens. Aqui a diferença na simulação dos cenários mais degradados para o Pristina apresentou redução entre 20% a 25% para umidade no solo e entre 62% a 69% para percolação, sendo a camada intermediária (30 cm a 100 cm de profundidade) a que apresentou as maiores diferenças.

Wang et al. (2013) mediram a umidade do solo relativa a diferentes coberturas da terra por meio de sondas inseridas a diferentes profundidades, e encontraram maior conteúdo médio de umidade no solo localizado abaixo das lavouras do que no solo abaixo de gramíneas. Aqui, a diferença no percentual de umidade entre os cenários NCF-FUT-PAS e NCF-FUT-AGRI foi pequena, apesar da percolação ter apresentado maior diferença entre estes dois cenários, sendo maior no último.

Devido à menor umidade do solo e percolação apresentada pelos cenários mais preservados (maior evapotranspiração), a profundidade média do lençol freático na Bacia do Rio Verde se apresentou mais profunda conforme a maior

preservação do cenário de cobertura (Figura 4.23). Pela observação da Figura 4.24 pode ser percebido que as maiores profundidades são localizadas nas regiões mais altas da bacia hidrográfica. Estatisticamente, os cenários Pristina e ACF se diferenciaram do Controle tanto pelo teste de *Mann-Whitney* quanto pelo teste de *Kruskal-Wallis* (Tabela 4.15).

6. CONCLUSÕES

Quanto à primeira questão principal que este trabalho visou responder:

- a) Qual o significado da alteração do Código Florestal realizada em 2012 em termos de proteção da vegetação nativa nos topos das elevações?

As áreas delimitadas pelo terço superior em topos de elevações, por meio dos parâmetros do NCF, para a Bacia do Rio Verde, apresentaram um grande decréscimo quando comparadas com os parâmetros do ACF, o que significa diminuição drástica da proteção da vegetação remanescente em áreas de recarga de nascentes, além do não cumprimento do próprio Código Florestal vigente, por não preservar o fluxo gênico de fauna e flora e a estabilidade geológica nestas áreas.

Os resultados do cruzamento entre as APPs e a cobertura da terra mostraram que mais da metade das APPs de elevações, delimitadas pelos parâmetros da Resolução CONAMA 303/2002 (ACF), continha tipos de coberturas consideradas inadequadas. Isto sugere enfraquecimento na legislação florestal, o qual surgiu como apoio aos proprietários de terras interessados em sair da situação de insegurança jurídica. Tal enfraquecimento na legislação quanto à proteção de APPs em topos de elevações ainda pode acarretar em maior fragmentação dos remanescentes florestais da Mata Atlântica.

Quanto à modelagem hidrológica, o DHSVM simulou bem as vazões observadas numa bacia de mesoescala em região subtropical numa resolução espacial de 150 m e no passo de tempo diário.

Quanto à segunda questão principal que este trabalho visou responder:

- b) O modelo DHSVM é capaz de detectar os impactos relativos à modificação na legislação florestal aqui estudada em uma bacia de mesoescala?

Sim, uma vez que foi possível verificar diferença entre o estado em que estava a cobertura da terra em 2006 (Controle), e como ela deveria estar caso os critérios para delimitação de APPs em topo de morro e montanha pelo Código Florestal da época fossem respeitados (cenário ACF). Isto mostra a importância da existência de vegetação nativa nestas APPs para reduzir eventos hidrológicos extremos.

Quanto à terceira questão principal que este trabalho visou responder:

- c) As possíveis consequências futuras desta modificação no Código Florestal, prevendo ainda menor área de floresta na região, são detectáveis pelo modelo DHSVM?

O modelo simulou diferenças nas respostas hidrológicas em relação ao Controle em decorrência da expansão de pastagens ou de cultivos agrícolas. Tais diferenças, porém, não foram estatisticamente significativas, uma vez que o mapeamento realizado a partir da imagem de 2006 já apresenta nível de degradação avançado e não se desejou aqui avançar com a mudança de cobertura da terra nas áreas de Unidades de Conservação.

6.1. Outras considerações

É recomendável que mais estudos em APPs em topos de elevações em diversas escalas sejam realizados nas regiões de relevo ondulado no Brasil, fortalecendo o embasamento científico e para que possibilite nova revisão da legislação florestal recentemente aprovada quanto aos novos parâmetros para delimitação destas APPs.

Apesar do mapa de solos desenvolvido pelo modelo HAND ter facilitado o processo de calibração, subdividir os tipos de solos pelas classes de cobertura poderia melhorar a simulação dos processos de infiltração e condutividade hidráulica diferenciadas sob cada vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. N. O domínio dos “mares de morros” no Brasil. **Geomorfologia**, v. 2, p. 1-9, 1966.
- AB'SÁBER, A. N. O relevo brasileiro e seus problemas. In: AZEVEDO, A. de. et al. (Ed.) **Brasil, a terra e o homem**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1964. Vol. 1, p. 135-250.
- AB'SÁBER, A. N. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul: primeira aproximação. **Geomorfologia**, v. 53, p.1-23, 1977.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). PORTAL HIDROWEB. **Séries históricas de vazão**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 15 out. 2010.
- ALLEN, A.; CHAPMAN, D. Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. **Hydrogeology Journal**, v. 9, p. 390-400, 2001.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements** – FAO Irrigation and drainage. Rome: FAO, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.HTM#Contents>>. Acesso em: 4 set. 2013.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 159-170, 2003.
- ALVARENGA, L. A. **Impactos hidrológicos decorrentes de diferentes cenários de cobertura do solo e mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica de cabeceira, utilizando o modelo DHSVM**. 161 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- ANDERSON, J. M. Invertebrate-mediated transport processes in soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 24, n. 1-3, p. 5-19, 1988.
- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. 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, 2003.
- ARMSTRONG, R. N.; MARTZ, L. W. Effects of reduced land cover detail on hydrological model response. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2395-2409, 2008.

- AZEVEDO-SANTOS, V. M.; COSTA-NETO, E. M.; LIMA-STRIPARI, N. Concepção dos pescadores artesanais que utilizam o reservatório de Furnas, Estado de Minas Gerais, acerca dos recursos pesqueiros: um estudo etnoictológico. **Biotemas**, v. 23, n. 4, p. 135-145, 2010.
- BARBOSA, J. P. R. A. D. et al. Estimativa do IAF de cafeeiro a partir do volume de folhas e arquitetura da planta. **Coffee Science**, v. 7, n. 3, p. 267-274, 2012.
- BENITES, V. M. et al. Caracterização da matéria orgânica e micromorfologia de solos sob Campos de Altitude no Parque Estadual da Serra do Brigadeiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 661-674, 2001.
- BENITES, V. M. et al. Solos e vegetação nos Complexos Rupestres de Altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. **Floresta e Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 76-85, 2003.
- BOGGS, J. L.; MCNULTY, S. G. Changes in canopy cover after surface air and forest floor temperature in a high-elevation Red Spruce (*Picearubens* Sarg.) forest. In: RENTCH, J. S.; SCHULER, T. M. (Ed.) **Proceedings from the Conference on the Ecology and Management of High-Elevation Forests in the Central and Southern Appalachian Mountains**. Delaware: U.S. Forest Service, 2010. p. 13-21.
- BOWLING, L.C.; STORCK, P.; LETTENMAIER, D.P. Hydrologic effects of logging in western Washington, United States. **Water Resources Research**, v. 36, n. 11, p. 3223-3240, 2000.
- BRAS, R.L. Evaporation from free water surfaces. In: _____. **Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. p. 183-246.
- BRASIL. Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. Approva o código florestal que com este baixa. Poder executivo. **Sítio eletrônico da internet**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D23793impressao.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.
- BRASIL. Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. Poder Executivo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 24 nov. 2008, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6660.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Poder Legislativo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 26 dez. 2006, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Poder Legislativo, Brasília - DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 28 mai. 2012. p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 15 jun. 2012.

BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Poder Legislativo, Capital Federal, Brasil: **Diário Oficial da União**, 16 set. 1965. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771impressao.htm>. Acesso em: 12 set. 2011.

BRASIL. Lei nº 7.511, de 7 de julho de 1986. Altera dispositivos da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o novo Código Florestal. Poder Legislativo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 8 jul. 1986, p. 10049. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L7511impressao.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BRASIL. Lei nº 7.803, de 18 de julho de 1989. Altera a redação da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e revoga as Leis nºs 6.535, de 15 de junho de 1978, e 7.511, de 7 de julho de 1986. Poder Legislativo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 20 jul. 1989, p. 12025. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7803.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 1 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Poder Legislativo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, 13 fev. 1998, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BRASIL. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 1º, 4º, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. Poder Executivo, Brasília – DF. **Diário Oficial da União**, seção 1, Eletrônico - Edição Extra, 25 ago. 2001, p. 1. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/mpv/2166-67impressao.htm>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BREUER, L. et al. Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modeling (LUCHEM). I: Model intercomparison with current land use. **Advances in Water Resources**, v. 32, p. 129-146, 2009.

BRUIJNZEEL, L. A. (De)Forestation and dry season flow in the Tropics: a closer look. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 1, n. 3, p. 229-243, 1989.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, p. 185-228, 2004.

CÂMARA, G. et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CANTINHO, R. Z. **Avaliação de propriedades biofísicas de dosséis de *Eucalyptus spp.* mediante aplicação de técnicas de sensoriamento remoto**. 2012. 129 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.11.20.08-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C4E3UE>>. Acesso em: 29 jul. 2015.

CARNAVAL, A. C. et al. Stability Predicts Genetic Diversity in the Brazilian Atlantic Forest Hotspot. **Science**, v. 323, n. 6, p. 785-789, 2009.

CARNEIRO, R. L. C. et al. Consumo de água em plantios de eucalipto: parte 2 – Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em tratamentos irrigados e não-irrigados. **Revista Árvore**, v. 32, n. 1, p. 11-18, 2008.

CARVALHO FILHO, A. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1. P. 229-237, 2007.

CASTRO, L. G. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 50, p. 339-352, 2006.

CENTRO DE EXPERIMENTOS FLORESTAIS SOS MATA ATLÂNTICA (CEF-SOSMA). **Relatório da Oficina do Programa de Regularização Ambiental (PRA)**. São Paulo set. 2014.

CHAVEZ JR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, p. 459-479, 1988.

CHU, H.-J.; LIN, Y.-P.; HUANG, C.-H.; HSU, C.-Y.; CHEN, H.-Y. Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. **Hydrological Processes**, 24, p. 2538-2554, 2010.

CNES/ASTRIUM Pléiades Satellite Imagery: **Astrium Geoinformation System**. 12 mai. 2014. Disponível pelo *software Google Earth Web*. Acesso em: 02 fev. 2015.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 maio 2002. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30302.html>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

CORGOSINHO, P.H.C.; PINTO-COELHO, R.M. Zooplakton biomass, abundance and allometric patterns along an eutrophic gradient at Furnas Reservoir (Minas Gerais, Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 182, p. 213-224, 2006.

CUARTAS, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia central**. 2008. 236 p. (INPE-15317-TDI/1361). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGPBW/32HCQ62>>. Acesso em: 29 jul. 2015.

CUARTAS, L. A. 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, p. 15-27, 2012.

CUO, L. et al. The roles of roads and agricultural land use in altering hydrological processes in Nam Mae Rim watershed, northern Thailand. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 4339-4354, 2008.

CUO, L. et al. Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 907-933, 2009.

DANTAS, F. R. C. et al. Determinação do albedo da superfície a partir de dados AVHRR/NOAA e TM/LANDSAT-5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 24-31, 2010.

DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. Reimpressão: 2011. 484 p.

DONOHUE, R.J.; RODERICK, M.L.; MCVICAR, T.R. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p. 983-995, 2007.

DORMAN, J. L.; SELLERS, P. J. Global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the simple biosphere model (SiB). **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, n. 9, p. 833-855, 1989.

DOTEN, C. O. et al. A spatially distributed model for the dynamic prediction of sediment erosion and transport in mountainous forested watersheds. **Water Resources Research**, v. 42, n. 4, W04417, 2006.

DOTEN, C. O.; LETTENMAIER, D. P. **Prediction of sediment erosion and transport with the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model**. Washington: Water Resources Series, 2004. 70 p. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <www.ce.washington.edu/pub/WRS/WRS178.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999, CD-ROM, escala 1:5.000.000.

ESHLEMAN, K. N. Hydrological consequences of land use change: A review of the state-of-the-science. In: DEFRIES, R. S.; ASNER, G.; HOUGHTON, R.A. (Ed.) **Ecosystems and land use change**. Geophysical Monograph 153, Washington D.C.: American Geophysical Union. p 13-29. 2004. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <google.books.com.br> Acesso em: 16 abr. 2012.

EWEN, J. et al. SHETRAN: Physically-based distributed river basin modeling system. In: SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. (Ed.) **Mathematical models of small watershed hydrology and applications**. Water Resources Publications, LLC, 2002. p. 43-68.

FERREIRA, R. **O que é o Código Florestal**. 18 ago. 2014. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28574-o-que-e-o-codigo-florestal>> Acesso em 10 mai. 2015.

FUJIEDA, M. et al. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 196, p. 26-46, 1997.

FUNDAÇÃO S.O.S. MATA ATLÂNTICA (FSOSMA) / INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**: Período 2012-2013. São Paulo, 2014, 61 p.

GOMES, E. N. **Medida e modelos da radiação fotossinteticamente ativa global, direta na incidência e horizontal**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

GUO, H.; HU, Q.; JIANG, T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 335, p. 106-122, 2008.

HOTT, M. C. et al. **Método para determinação automática de Áreas de Preservação Permanente em topo de morros para o Estado de São Paulo, com base em geoprocessamento**. Campinas, Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 34, nov. 2004. 32 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados Agregados**. 2015. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 09 mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa da Área de Aplicação da Lei nº 11.428 de 2006**. IBGE, Diretoria de Geociências, 2012. Escala 1:5.000.000. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica/mapa-da-area-de-aplicacao>>. Acesso em: 22 jan. 2013.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (ICMBIO). **Mapa de Unidades de Conservação**. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <www.icmbio.gov.br>. Acesso em: 07 jul. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA ENSINO E PESQUISA (BDMEP). **Séries históricas**. Estações meteorológicas convencionais. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa>>. Acesso em: 02 fev. 2013.

JUNQUEIRA JR., J.A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande – MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006, 96 p.

KRUK, N.S. et al. Análise de sensibilidade do modelo DHSVM aos parâmetros de solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais Eletrônicos...** São Paulo: ABRH 2007. 14 p. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.abrh.or.br/sgcv3/index.php?PUB=3&ID=19&PAG=10>>. Acesso em: 3 mai. 2015.

KRUK, N. S. **Sistema hidrometeorológico proposto para previsão de eventos extremos numa microbacia de topografia complexa**. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2008, 189 p.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I.; BECKER, A. Development and test of spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, v. 106, p. 261-289, 1998.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. Agreement for categorical data. **International Biometric Society**, v. 33, n.1, p. 159-174, 1977. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2529310>>. Acesso em: 9 jun. 2015.

LEE, D. W. The spectral distribution of radiation in two neotropical rainforests. **Biotropica**, v. 19, n. 2, p. 161-166, 1987.

LEONARDI, S. S. **Uma ferramenta computacional para delimitação automática de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros e montanhas**. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada). São José dos Campos: INPE, 2010. 70 p.

LINDENLAUB, J. C.; DAVIS, S. M. Applying the quantitative approach. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. (Ed.) **Remote Sensing: The quantitative approach**. West Lafayette, Ind., U.S.A.: McGraw-Hill International Book Company, 1978. Cap. 6, p.290-335.

LINHARES, C. A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na Bacia do Rio Ji-Paraná / RO**. 2006. 217 p. (INPE-13778-TDI/1052). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.06.13.50>>. Acesso em: 30 jul. 2015.

LONDERO, E. K. **Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba, RS.** 2011. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

LOPES, P. M. O. et al. Simulação do saldo de radiação na Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 780-789, 2013.

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

MANTELLI, L. R.; BARBOSA, J.M.; BITENCOURT, M.D. Assessing ecological risk through automated drainage extraction. **Ecological Informatics**, v. 6, p. 325-331, 2011.

MARQUES NETO, R.; PEREZ FILHO, A. Compartimentação morfoestrutural da Bacia do Rio Verde, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n. 1, p. 119-135, 2014.

MARRICHI, A. H. C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de *Eucalyptus* e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor.** 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

MARUR, C. J. et al. Assimilação de CO₂ em diferentes espaçamentos do cafeeiro IAPAR 59. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2, 2001, Vitória, ES. **Anais...**, Embrapa Café, 2001. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.sapc.embrapa.br/antigo/index.php/view-details/ii-simposio-de-pesquisa-dos-cafes-do-brasil/223-assimilacao-de-co2-em-diferentes-espacamentos-do-cafeeiro-iapar-59>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

MEIRELES, L. D. **Florística das fisionomias vegetacionais e estrutura da Floresta Alto-Montana de Monte Verde, Serra da Mantiqueira, MG.** 100 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal). UNICAMP, Campinas, 2003.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, MPSP. **Demonstrativos de perdas ambientais. Retrocesso na Proteção Ambiental: Dispositivos Lei nº 12.651/2012.** Transparência, 2012. 49 transparências. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/projeto_florestar/Programa_diagnosticos/material-apoio/Ap_Lei_12651-Dec_7830-Versao-22-02-2012-Divulgacao-Externa.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2014.

- MORAES, M. C. P.; MELLO, K.; TOPPA, R. H. Análise da paisagem de uma zona de amortecimento como subsídio para o planejamento e gestão de Unidades de Conservação. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 1-8, 2015.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MOURA, A. E. S. S. et al. Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da Mata Atlântica na bacia do Prata, Recife, PE. **Revista Árvore**, v.33, n.3, p. 461-469, 2009.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.
- NOBRE, A. D. et al. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, p. 13-29, 2011.
- NOCE, C. M. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do Orógeno Aracuaí. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 17-23, 2007
- NORTCLIFF, S.; THORNES, J.B. Seasonal variations in the hydrology of a small forested catchment near Manaus, Amazonas, and its implications for management. In: LAL, R.; RUSSEL, E.W. (Ed). **Tropical Agricultural Hydrology**. Chichester and New York, John Wiley, 1981. p. 482.
- O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 28, p. 323-344, 1984.
- OLIVEIRA, G. C.; FERNANDES FILHO, E. I. Metodologia para delimitação de APPs em topos de morros segundo o Novo Código Florestal brasileiro utilizando sistemas de informação geográfica. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu, **Anais...São José dos Campos: INPE**, 2013, p. 4443-4450.
- OLIVEIRA, V. A. et al. Soil erosion vulnerability in the Verde River Basin, southern Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 3, p. 262-269, 2014.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; MACHADO, J. N. M. Composição florística de uma Floresta Semidecídua Montana, na Serra de São José, Tiradentes, Minas Gerais. **Acta Botanica Brasilica**, v. 7, n. 2, p. 71-88, 1993.
- PEREIRA, A. A. et al. Descrição do crescimento vegetativo do cafeeiro cultivar Rubi MG 1192, utilizando modelos de regressão. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 266-274, 2014.

PERES, G. G.; ALKMIM, F. F.; JORDT-EVANGELISTA, H. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 76, n. 4, p. 771-790, 2004.

PEZZOPANE, J. R. M.; GALLO, P. B.; PEDRO JR., M. J. Radiação solar global, saldo de radiação e fluxo de calor no solo em cultivo café/coqueiro-anão verde. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória, ES. **Anais...** Embrapa Café, 2001. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://www.sapc.embrapa.br/antigo/index.php/start-download/ii-simposio-de-pesquisa-dos-cafes-do-brasil/248-radiacao-solar-global-saldo-de-radiacao-e-fluxo-de-calor-no-solo-em-cultivo-consorciado-cafe/coqueiro-anao-verde>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

PINTO, L. V.A.; BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**, v. 65, p. 197-206, 2004.

RAMÍREZ, A.; PRINGLE, C.M.; WANTZEN, K.M. Tropical stream conservation. In: Dudgeon, D. (Ed.) **Tropical Stream Ecology: A volume in Aquatic Ecology**. Elsevier, 2008. p. 285-304.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. Delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morro e em linhas de cumeada: metodologia e estudo de caso. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 5., 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 2002.

RIBEIRO, C.A.A.S. et al. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**, v. 29, n.2, p. 203-212, 2005.

RIBEIRO, G. V. B. A origem histórica do conceito de Área de Preservação Permanente no Brasil. **Revista Thema**, v. 8, n. 1, 2011.

ROBERTS, J. M. et al. An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. In: GASH, J. H. C. et al. (Ed.) **Amazonian deforestation and climate**. Chichester, John Wiley & Sons, 1996. p. 287-306.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, a ser publicado, 2015.

RÖßLER, O.; LÖFFLER, J. Potentials and limitations of modelling spatio-temporal patterns of soil moisture in a high mountain catchment using WaSiM-ETH. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2182-2196, 2010.

RUHOFF, A.L. et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658-1676.

RUHOFF, A.L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2011, 180 p.

RYU, D. et al. Soil moisture retrieval using an L-Band synthetic aperture radiometer during the Soil Moisture Experiments 2003 (SMEX03) and 2004 (SMEX04). In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, IGARSS, 2008, Boston, MA: IEEE International, v. 2, p. 233-236.

SÁ JR., A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2009. 113 p.

SADEGHI, S. M. M. et al. Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 76-85, 2015.

SAMANIEGO, L.; BÁRDOSSY, A. Simulation of the impacts of land use/cover and climatic changes on the runoff characteristics at the mesoscale. **Ecological Modelling**, v. 196, p. 45-61, 2006.

SCHIRPKE, U. et al. SPA-LUCC: Developing land-use/cover scenarios in mountain landscapes. **Ecological informatics**, v. 12, p. 68-76, 2012.

SCHULLA, J.; JASPER, K. 2007. **Model Description WaSiM-ETH: Water Balance Simulation Model ETH**. 2007, 181 p. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2007_en.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2015.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16-20, 1991.

SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande – MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2009, 146 p.

SINGH, J.; KNAPP, H.V.; DEMISSIE, M. **Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT**. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill: Illinois State Water Survey. Sítio eletrônico da internet. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/90101/singh.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2014.

SIVAPALAN, M. Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale. In: ANDERSON, M. G. (Ed.). **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. John Wiley & Sons, 2005. p 194-219.

SLEETER, B.M. et al. Scenarios of land use and cover change in the conterminous United States: Utilizing the special report on emission scenarios at ecoregional scales. **Global Environmental Change**, v. 22, p. 896-914, 2012.

SOULSBY, C. et al. Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape characteristics in a mesoscale catchment: An initial evaluation. **Journal of Hydrology**, v. 325, p. 197-221, 2006.

STORCK, P. et al. Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest. **Hydrological Processes**, v. 12, p. 889-904, 1998.

STORCK, P.; KERN, T.; BOLTON, S. Measurement of differences in snow accumulation, melt, and micrometeorology due to forest harvesting. **Northwest Science**, v. 73, Special Issues, p. 87-101, 1999.

SWAIN, P. H. Fundamentals of pattern recognition in remote sensing. In: SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. (Ed.) **Remote Sensing: the quantitative approach**. West Lafayette, Ind., U.S.A.: McGraw-Hill International Book Company, 1978. Cap. 3, p. 136-187.

SWANK, W. T.; SWIFT JR, L. W.; DOUGLAS, J. E. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. In: SWANK, W. T.; CROSSLEY, D. A. (Eds.). **Forest Hydrology at Coweeta**. Springer Ecological Studies, 1988. Vol. 66, p. 297-312.

SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 89, n. 381, p. 330-348, 1963.

THANAPAKPAWIN, P. et al. Effects of land use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. **Journal of Hydrology**, v. 334, p. 215-230, 2006

TORRES, H.; MANNHEIMER, S.; CARVALHO, A. C. M. G. Alteração do código florestal e o impacto sobre as Áreas de Preservação Permanente em topos de morro no município de Nova Friburgo, RJ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECOLOGIA DE PAISAGENS. **Apresentação de pôster**. Salvador, 2012.

Disponível em: <http://p-web01.mp.rj.gov.br/Arquivos/POSTER_Topo_de_Morro_IALE_2012.pdf>.

Acesso em: 10 jul. 2015.

TUCCI, C.E.M; BELTRAME, L.F.S. Evaporação e evapotranspiração. In: Tucci, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 4 ed. Editora UFRGS, 2009. p. 253-287.

UBARANA, V.N. Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia. In: GASH, J. H. C. et al. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester, John Willey, p. 151-162, 1996.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (USGS. EROS) . **Imagem de satélite**. 2006. 2 Imagens de satélite. Landsat 5 / Sensor Thematic Mapper. 06 ago. 2006. Órbita 218. Pontos 75 e 76.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (USGS. EROS) . **Imagem de satélite**. 2011. 2 Imagens de satélite. Landsat 5 / Sensor Thematic Mapper. 21 set. 2011. Órbita 218. Pontos 75 e 76.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. College Park, Maryland: Global Land Cover Facility/University of Maryland, 2006, dados de altimetria, escala 1:250.000. Sítio eletrônico. Disponível em: <<http://glcf.umd.edu/data/srtm>>. Acesso em: 21 jan. 2011.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 44 p. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata>>. Acesso em: 30 jul. 2010.

VANSHAAR, J.; LETTENMAIER, D.P. **Effects of land cover change on the hydrologic response of Pacific Northwest forested catchments**. Seattle: Universidade de Washington, 2001.. Water Resources Series, Relatório técnico, n. 165.

VANSHAAR, J.R.; HADDELAND, I.; LETTENMAIER, D.P. Effects of land-cover changes on the hydrological response of interior Columbia River basin forested catchments. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2499-2520, 2002.

VARJABEDIAN, R.; MECCHI, A. As APPs de topo de morro e a Lei 12.651/12. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA AMBIENTAL, 14, 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** CD-ROM. ISBN: 978-85-7270-065-8.

VICTORIA, D. et al. Delimitação de áreas de preservação permanente em topos de morros para o território brasileiro. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2 n. 2, 2008.

WANG, S. et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 101, p. 122-128, 2013.

WANGPIMOOL, W. et al. The effect of reforestation on stream flow in Upper Nan river basin using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. **International Soil an Water Conservation Research**, v. 1, n. 2, p. 53-63, 2013.

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

WIGMOSTA, M.S.; NIJSSEN, B.; STORCK, P. The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model. In: SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. (Ed.) **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Application**. Littleton: Water Resources Publications, 2002. p. 7-42.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.

YOOL, S. R. et al. Performance analysis of image processing algorithms for classification of natural vegetation in the mountains of Southern California. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 683-702, 1986.

YUAN, Z.; CHU, Y.; SHEN, Y. Simulation of surface runoff and sediment yield under different land-use in a Taihang Mountains watershed, North China. **Soil & Tillage Research**, v. 153, p. 7-19, 2015.

YUE, T.X.; FAN, Z.M.; LIU, J.Y. Scenarios of land cover in China. **Global and Planetary Change**, v. 55, p. 317-342, 2007.

ZHANG, H.; HISCOCK, K.M. Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. **Journal of Hydrology**, v. 392, p. 136-149, 2010.

ZHANG, X. et al. Modeling and assessing hydrologic processes for historical and potential land-cover change in the Duoyingping watershed, southwest China. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 53-54, p. 19-29, 2012.

ZHANG, Y.-K.; SCHILLING, K.E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: Effect of land use change. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 412-422, 2006.

APÊNDICE A – PARÂMETROS DE VEGETAÇÃO

Tabela A.1 – Parâmetros de vegetação utilizados na calibração e validação do DHSVM para cada classe de cobertura presente na Bacia do Rio Verde.

1 - Pasto		
Estrato Inferior		
Altura (m)	0,6	<i>Groundcover</i> de Dorman e Sellers (1989)
Máx. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	5000	<i>Grassland</i> de Wigmosta et al. (1994)
Mín. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	120	<i>Grassland</i> de Wigmosta et al. (1994)
Limiar de umidade	0,15	65% da média da CC
Déficit de pressão de vapor (Pa)	4202	<i>Groundcover</i> de Dorman e Sellers (1989)
Fração de PAR	0,43	Gomes (2002)
Número de zonas de raízes	3	A mesma para todas
Profundidade de cada zona de raízes (m)	0,3 0,7 1,0	A mesma para todas
Fração de raízes em cada zona	0,6 0,4 0,0	Kruk (2008)
LAI mensal	2,85 2,35 2,55 1,70 1,50 1,35 1,55 1,45 2,10 2,25 2,05 2,85	Maidment (1992)
Albedo mensal	0,15 0,15 0,15 0,15 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,15 0,15 0,15 0,15	Lopes et al. (2013)

Tabela A.1 – Continuação.

	2 - Agricultura			
	Estrato superior	Estrato inferior	Estrato superior	Estrato inferior
Fração de cobertura	0,8	-	Depende do espaçamento do cultivo. Considerado aqui < floresta	-
Fração do tronco até a copa	0,2	-	Visualização de pé de café	-
Coef. De atenuação aerodinâmica	2,0	-	Wigmosta et al. (1994) recomenda entre 2 e 3. Considerado aqui < floresta	-
Coef. De atenuação da radiação	0,4	-	Pezzopane et al. (2001)	-
Altura (m)	1,8	0,2	Pereira et al. (2014) para Café Rubi	Considerado aqui < pasto
Máx. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	2500	5000	Marur et al. (2001)	Considerado aqui = pasto
Mín. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	100	120	Marur et al. (2001)	Considerado aqui = pasto
Limiar de umidade	0,2	0,15	Maidment (1992)	Considerado aqui = pasto
Déficit de pressão de vapor (Pa)	4500	4202	Ruhoff (2011) para agricultura	Considerado aqui = pasto
Fração de PAR	0,5	0,2	Ruhoff (2011) para agricultura	< pasto em função de sombreamento
Número de zonas de raízes	3		A mesma para todas	
Profundidade de cada zona de raízes (m)	0,3 0,7 1,0		A mesma para todas	
Fração de raízes em cada zona	0,6 0,3 0,1	0,6 0,4 0,0	Ajustado	Considerado aqui = pasto
LAI mensal	5,5 5,17 4,84 4,51 4,18 3,85 3,5 3,83 4,16 4,49 4,82 5,15	2,85 2,35 2,55 1,70 1,50 1,35 1,55 1,45 2,10 2,25 2,05 2,85	Barbosa et al. (2012)	Considerado aqui = pasto
Albedo mensal	0,15 0,15 0,15 0,16 0,17 0,19 0,19 0,19 0,19 0,17 0,16 0,16	0,15 0,15 0,15 0,15 0,16 0,16 0,16 0,16 0,15 0,15 0,15	A partir do máx. e mín de Dantas et al. (2010)	Considerado aqui = pasto

Tabela A.1 – Continuação.

	3 - Floresta			
	Estrato superior	Estrato inferior	Estrato superior	Estrato inferior
Fração de cobertura	0,96	-	Cuartas (2008)	-
Fração do tronco até a copa	0,6	-	Cuartas (2008)	-
Coef. De atenuação aerodinâmica	2,5	-	Valores típicos no intervalo 2 - 3 (Wigmosta et al., 1994)	-
Coef. De atenuação da radiação	0,6	-	Cuartas (2008)	-
Altura (m)	20	2,0	Kruk (2008)	Cuartas (2008)
Máx. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	3600	2787,5	Cuartas (2008)	Cuartas (2008)
Mín. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	185,7	185,7	Cuartas (2008)	Cuartas (2008)
Limiar de umidade	0,10	0,10	Cuartas (2008)	Cuartas (2008)
Déficit de pressão de vapor (Pa)	4000	4000	Cuartas (2008)	Cuartas (2008)
Fração de PAR	0,43	0,17	Gomes (2002)	Lee (1987)
Número de zonas de raízes	3		A mesma para todas	
Profundidade de cada zona de raízes (m)	0,3 0,7 1,0		A mesma para todas	
Fração de raízes em cada zona	0,4 0,4 0,2	0,6 0,4 0,0	Ajustado	Ajustado
LAI mensal	7,1 7,5 7,17 6,84 6,51 6,18 5,85 5,52 5,5 5,9 6,3 6,7	2,41 2,55 2,44 2,32 2,21 2,1 1,99 1,88 1,87 2,0 2,14 2,28	Almeida e Soares (2003)	34% do dossel superior (Roberts et al., 1996)
Albedo mensal	0,12 0,12 0,12 0,12 0,13 0,13 0,13 0,13 0,13 0,12 0,12 0,12	0,12 0,12 0,12 0,12 0,13 0,13 0,13 0,13 0,13 0,12 0,12 0,12	Lopes et al. (2013)	Lopes et al. (2013)

Tabela A.1 – Continuação.

	4 – Capoeira			
	Estrato superior	Estrato inferior	Estrato superior	Estrato inferior
Fração de cobertura	0,85	-	<floresta	-
Fração do tronco até a copa	0,6	-	Considerado = floresta	-
Coef. De atenuação aerodinâmica	2,0	-	Considerado < floresta	-
Coef. De atenuação da radiação	0,5	-	Considerado < floresta	-
Altura (m)	10	1,5	Batalha (1997) para Cerrado	Considerado < floresta
Máx. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	3600	2787,5	Considerado = floresta	Considerado = floresta
Mín. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	185,7	185,7	Considerado = floresta	Considerado = floresta
Limiar de umidade	0,10	0,10	Considerado = floresta	Considerado = floresta
Déficit de pressão de vapor (Pa)	4000	4000	Considerado = floresta	Considerado = floresta
Fração de PAR	0,43	0,17	Considerado = floresta	Considerado = floresta
Número de zonas de raízes	3		A mesma para todas	
Profundidade de cada zona de raízes (m)	0,3 0,7 1,0		A mesma para todas	
Fração de raízes em cada zona	0,7 0,2 0,1	0,6 0,4 0,0	Ajustado	Ajustado
LAI mensal	6,96 7,35 7,03 6,71 6,38 6,06 5,74 5,41 5,39 5,78 6,18 6,57	2,37 2,5 2,39 2,28 2,17 2,06 1,95 1,84 1,83 1,97 2,1 2,23	Considerado aqui 1,8% < floresta	34% do dossel superior (Roberts et al, 1996)
Albedo mensal	0,13 0,13 0,13 0,13 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,13 0,13 0,13	0,13 0,13 0,13 0,13 0,14 0,14 0,14 0,14 0,14 0,13 0,13 0,13	Considerado > floresta	Considerado > floresta

Tabela A.1 – Continuação.

5 - Urbana		
Estrato inferior		
Altura (m)	0,5	Considerada < pasto
Fração impermeável	0,85	Ajuste
Fração de detenção	0,0	Simulou-se que não há
Decaimento de detenção	0,0	Simulou-se que não há
Máx. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	5000	Considerada = pasto
Mín. resistência estomatal ($s\ m^{-1}$)	120	Considerada = pasto
Limiar de umidade	0,15	Considerada = pasto
Déficit de pressão de vapor (Pa)	4202	Considerada = pasto
Fração de PAR	0,2	<pasto em função de sombreamento das construções
Número de zonas de raízes	3	A mesma para todas
Profundidade de cada zona de raízes (m)	0,3 0,7 1,0	A mesma para todas
Fração de raízes em cada zona	0,6 0,4 0,0	Considerada = pasto
LAI mensal	2,85 2,35 2,55 1,70 1,50 1,35 1,55 1,45 2,10 2,25 2,05 2,85	Considerada = pasto
Albedo mensal	0,15 0,15 0,15 0,15 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,15 0,15 0,15 0,15	Considerada = pasto

Tabela A.1 – Continuação.

	6 - Eucalipto			
	Estrato superior	Estrato inferior	Estrato superior	Estrato inferior
Fração de cobertura	0,92	-	Considerado < floresta	-
Fração do tronco até a copa	0,7	-	Visualização	-
Coef. De atenuação aerodinâmica	2,2	-	Considerado < floresta e > capoeira	-
Coef. De atenuação da radiação	0,45	-	Londero (2011)	-
Altura	25	0,5	Depende da idade. Crescem rápido	Considerada < pasto
Fração impermeável	-	-	-	-
Fração de detenção	-	-	-	-
Decaimento de detenção	-	-	-	-
Máx. resistência estomatal	2946,3	5000	Londero (2011)	Considerada = pasto
Mín. resistência estomatal	210,45	120	Londero (2011)	Considerada = pasto
Limiar de umidade	0,10	0,15	Considerada = floresta	Considerada = pasto
Déficit de pressão de vapor	4000	4202	Marrichi (2009)	Considerada = pasto
Fração de PAR	0,85	0,2	Cantinho (2012)	Considerada > floresta
Número de zonas de raízes	3		A mesma para todas	
Profundidade de cada zona de raízes	0,3 0,7 1,0		A mesma para todas	
Fração de raízes em cada zona	0,4 0,4 0,2	0,6 0,4 0,0	Ajuste	Considerada = pasto
LAI mensal	5,3 5,6 5,41 5,23 5,04 4,85 4,66 4,48 4,1 4,4 4,7 5,0	2,85 2,35 2,55 1,70 1,50 1,35 1,55 1,45 2,10 2,25 2,05 2,85	A partir do máx. e mín. de Londero (2011)	Considerado = pasto
Albedo mensal	0,333 0,35 0,333 0,317 0,3 0,283 0,267 0,25 0,267 0,283 0,3 0,317	0,15 0,15 0,15 0,15 0,16 0,16 0,16 0,16 0,16 0,15 0,15 0,15 0,15	A partir de máx. e mín. de Carneiro et al (2008)	Considerado = pasto

APÊNDICE B – RESULTADO DE TESTE ESTATÍSTICO

```

kruskal_interceptacao.txt
=====
ASSISTAT - TESTE DE KRUSKAL-WALLIS
http://www.assistat.com
=====
Data: 17/06/2015 Hora: 12:36:24 AM

Hipótese nula (H0):
Os tratamentos provêm de uma mesma população

Ao nível de 5% de probabilidade
H = 122.6871 H-crit = 12.5916
p-valor < 0.05 H0 foi rejeitada

Ao nível de 1% de probabilidade
H = 122.6871 H-crit = 16.8119
p-valor < 0.01 H0 foi rejeitada

```

Tratamento	Repetições	SomaDosPostos	Média	alfa-5%
1	144	64610.0000	448.6806	a
2	144	105581.0000	733.2014	c
3	144	79764.0000	553.9167	b
4	144	69043.0000	479.4653	ab
5	144	64986.0000	451.2917	ab
6	144	59964.0000	416.4167	a
7	144	64588.0000	448.5278	a

Comparações múltiplas				
Comparação	Diferença	DiferençaCrit	alfa	Diferentes
1 - 2	284.5208	104.2368	0.05	Sim
1 - 3	105.2361	104.2368	0.05	Sim
1 - 4	30.7847	104.2368	0.05	Não
1 - 5	2.6111	104.2368	0.05	Não
1 - 6	32.2639	104.2368	0.05	Não
1 - 7	0.1528	104.2368	0.05	Não
2 - 3	179.2847	104.2368	0.05	Sim
2 - 4	253.7361	104.2368	0.05	Sim
2 - 5	281.9097	104.2368	0.05	Sim
2 - 6	316.7847	104.2368	0.05	Sim
2 - 7	284.6736	104.2368	0.05	Sim
3 - 4	74.4514	104.2368	0.05	Não
3 - 5	102.625	104.2368	0.05	Não
3 - 6	137.5	104.2368	0.05	Sim
3 - 7	105.3889	104.2368	0.05	Sim
4 - 5	28.1736	104.2368	0.05	Não
4 - 6	63.0486	104.2368	0.05	Não
4 - 7	30.9375	104.2368	0.05	Não
5 - 6	34.875	104.2368	0.05	Não
5 - 7	2.7639	104.2368	0.05	Não
6 - 7	32.1111	104.2368	0.05	Não

Figura B.1 – Resultado do teste de *Kruskal-Wallis* para as médias mensais de interceptação.

Legenda tratamentos: 1-Controle; 2-Pristina; 3-ACF; 4-NCF-RIO; 5-NCF; 6-NCF-FUT-PAS; 7-NCF-FUT-AGRI.

