



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**KENNY DELMONTE OLIVEIRA**

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU UTILIZANDO O  
MODELO DHSVM**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2014

KENNY DELMONTE OLIVEIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU UTILIZANDO O  
MODELO DHSVM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Sidney Sára Zanetti

Coorientador: Roberto Avelino Cecílio

Coorientador: Jeffrey Edward Richey

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

Oliveira, Kenny Delmonte, 1987-  
O48m Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu utilizando o modelo  
DHSVM / Kenny Delmonte Oliveira. – 2014.  
177 f.: il.

Orientador: Sidney Sára Zanetti.

Coorientador: Roberto Avelino Cecílio; Jeffrey Edward Richey.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Hidrologia. 2. Geotecnologias. 3. Modelos hidrológicos. 4.  
Calibração. 5. Gestão territorial. I. Zanetti, Sidney Sára. II. Cecílio,  
Roberto Avelino. III. Richey, Jeffrey Edward. IV. Universidade Federal  
do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

CDU: 630

---

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO JUCU UTILIZANDO O  
MODELO DHSVM**

**Kenny Delmonte Oliveira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 21 de julho de 2014.



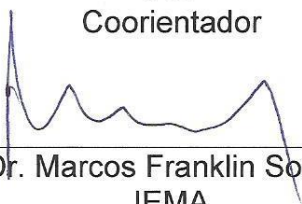
---

Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti  
UFES  
Orientador



---

Prof. Dr. Jeffrey Edward Richey  
USP  
Coorientador



---

Dr. Marcos Franklin Sossai  
IEMA  
Examinador Externo

DEDICO...

...essa singela obra da minha vida à minha mãe Solange, que não só me ajudou a chegar até aqui, mas continua me amparando para ir cada vez mais além.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todos os feitos visíveis ou não que influenciaram sobre que sou.

Agradeço a minha noiva Allys Larissa por ter me apoiado ao longo de todo esse tempo de mestrado, se abdicando a meu favor, me ajudado a caminhar, lutado por nós dois, e por termos escolhido em perpetuar nossa relação.

Agradeço a minha irmã Shanne, não só pela influência sobre meu mestrado, mas também ao longo de uma vida e pelo apoio incondicional sobre muitas decisões.

Ao meu padrasto Antônio e ao meu irmão Ray Charles, que são membros integrais da minha família e vida e por todos os bons momentos que passamos e que virão.

À minha sogra Adriane, por ter me recebido de braços abertos todo esse tempo, e por eu saber que posso sempre contar com ela, e acima de tudo por ter feito uma filha tão linda.

À Teodora, Auxiliadora, Jorge e Damião por todo apoio direto ou não ao longo desses anos.

Aos meus amigos-irmãos Demilson, Joel, Nilo e Weliton, pelos inestimáveis conselhos e por terem contribuído para eu me tornar quem sou hoje.

Aos colegas de laboratório Daniela, Marcelo, Carlos, Elder, Antônio e Kaio pelos bons momentos e amparo nas horas difíceis.

Ao professor Alexandre Rosa, pelas inestimáveis orientações.

Ao professor Elder e a Amanda, que no momento decisivo se dispuseram a me ajudar a enfrentar o DHSVM.

Ao professor Sidney por ter persistido com a orientação até o fim, e pelas valiosas contribuições durante a correção da dissertação.

Aos professores Jeffrey, Roberto e ao Sossay pela proposta de trabalho, apoio e significativas correções da dissertação.

E ainda a CAPES, pelo auxílio financeiro durante o período do mestrado.

*Tente uma, duas, três vezes e se possível tente  
a quarta, a quinta, e quantas vezes forem necessárias.  
Só não desista nas primeiras tentativas,  
a persistência é amiga da conquista.  
Se você quer chegar aonde a maioria  
não chega, faça o que a maioria não faz.*

*Bill Gates*

## RESUMO

OLIVEIRA, Kenny Delmonte. **Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu utilizando o modelo DHSVM**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti. Coorientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Coorientador: Prof. Dr. Jeffrey Edward Richey.

O objetivo do presente estudo foi realizar a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Jucu com uso do modelo dinâmico, físico e distribuído DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*), que representa explicitamente os processos integrados dos fenômenos hidrológicos. A primeira etapa do trabalho consistiu na criteriosa obtenção dos dados de entrada do modelo, tanto por meio de revisão bibliográfica como pelo uso de geotecnologias. A segunda etapa consistiu na modelagem hidrológica. Foram utilizadas variáveis climáticas, vegetacionais e edáficas pelas quais o modelo foi calibrado e validado para simular a vazão, em um passo de tempo diário, da estação Fazenda Jucuruaba, principal posto fluviométrico do rio Jucu, seguindo-se com o mesmo procedimento para a validação da vazão da estação mais a montante dessa, ou seja, a estação Córrego do Galo, no intuito de compreender o efeito da calibração em uma seção da bacia sobre os demais cursos d'água a montante de tal seção. Essa análise permitiu obter simulações que satisfizeram um elevado rigor de previsão, com moderado dispêndio na demanda de tempo e esforços técnicos para calibração, obtendo-se um coeficiente de Nash e Sutcliffe de 0,86, coeficiente de Nash e Sutcliffe ajustado de 0,60, percentual de tendência de -1,55, e erro padrão médio normalizado de 0,39. O DHSVM apresentou desempenho satisfatório, demonstrando potencial para ser usado em regiões diferentes daquelas para as quais foi desenvolvido e testado.

**Palavras-chave:** hidrologia, geotecnologias, modelos hidrológicos, calibração, gestão territorial.



## ABSTRACT

OLIVEIRA, Kenny Delmonte. **Hydrologic modeling of Jucu river basin using the DHSVM model**. 2014. Dissertation (Master's degree in Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Adviser: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti. Co-adviser: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio. Co-adviser: Prof. Dr. Jeffrey Edward Richey.

The aim of this study was to hydrological modeling of river basin Jucu using the dynamic physical model and distributed DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model), which explicitly represents the integrated processes of hydrological phenomena. The first stage of the work consisted in the carefully collect data model input, both through literature review and by using geotechnology. The second step consisted in hydrological modeling. Climate, vegetation and soil variables were used for model calibration, validation and to simulate the flow on a daily time step at Fazenda Jucuruaba station, main river gaging station Jucu. Following the same procedure it was validate the flow in the upstream station Córrego do Galo, in order to understand the effect of calibration on watercourses located on upstream section. This analysis yielded simulations that met a high accuracy prediction, with moderate demand expenditure of time and technical efforts for calibration, obtaining Nash and Sutcliffe coefficient of 0.86, adjusted Nash and Sutcliffe coefficient of 0.60 , percent bias of -1.55 and the standard deviation of measured data of 0.39. The DHSVM showed satisfactory performance, showing potential to be applied in different regions than those for which it was developed and tested.

**Keywords:** hydrology, geotechnologies, hydrological models, calibration, territorial management.

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 –  | Estações presentes na bacia do rio Jucu e áreas circunvizinhas.....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 44  |
| Tabela 2 –  | Estações fluviométricas presentes na bacia do rio Jucu.....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 44  |
| Tabela 3 –  | Densidade mínima recomendada de estações pluviométricas em função da precipitação.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 46  |
| Tabela 4 –  | Variáveis pedológicas exigidas pelo modelo DHSVM.....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 47  |
| Tabela 5 –  | Fontes bibliográficas e, total de perfis de solo obtido em cada uma.....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 48  |
| Tabela 6 –  | Recursos para georreferenciamento dos perfis pedológicos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 49  |
| Tabela 7 –  | Modelos de estimação da densidade do solo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 53  |
| Tabela 8 –  | Regiões com propriedades hidráulicas médias semelhantes.....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 54  |
| Tabela 9 –  | Variáveis vegetacionais exigidas pelo modelo DHSVM.....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 57  |
| Tabela 10 – | Imagens captadas pelo TM – Landsat 5 e 7, utilizadas na determinação do albedo para as classes de uso e cobertura do solo.....                                                                                                                                                                                                                    | 61  |
| Tabela 11 – | Descrição dos canais do TM - Landsat 5 e 7, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima - a e máxima - b), irradiâncias espectrais no topo da atmosfera ( $ESUN_{\lambda}$ ) e coeficientes de regressão linear de cada banda para o cômputo do albedo no topo da atmosfera (TOA)..... | 62  |
| Tabela 12 – | Variáveis de solo e vegetação às quais o modelo DHSVM apresenta maior sensibilidade.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 81  |
| Tabela 13 – | Valores de referência para os coeficientes NSE e NSE'.....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 84  |
| Tabela 14 – | Relação das estações meteorológicas com registros completados por similaridade.....                                                                                                                                                                                                                                                               | 87  |
| Tabela 15 – | Parâmetros do modelo geoestatístico (KBE) utilizado para interpolação da precipitação na BHRJ.....                                                                                                                                                                                                                                                | 92  |
| Tabela 16 – | Métodos de análise de agrupamento e seus respectivos Coeficientes de Correlação Cofonética.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 96  |
| Tabela 17 – | Ordem de remoção dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos.....                                                                                                                                                                                                                                                | 99  |
| Tabela 18 – | Parâmetros pré-calibração e respectivos valores das classes de pedopaisagem para o DHSVM.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 103 |
| Tabela 19 – | Equações de ajuste para a profundidade de enraizamento de diferentes espécies vegetais.....                                                                                                                                                                                                                                                       | 108 |
| Tabela 20 – | Parâmetros pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo para o DHSVM.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 111 |
| Tabela 21 – | Variáveis pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo subdivididas nas classes de pedopaisagens.....                                                                                                                                                                                                                                    | 112 |
| Tabela 22 – | Índices estatísticos do desempenho do modelo DHSVM (não calibrado) para os dados de vazão da estação Fazenda Jucuruaba.....                                                                                                                                                                                                                       | 116 |
| Tabela 23 – | Índices estatísticos do desempenho do modelo DHSVM calibrado para os dados de vazão da estação Fazenda Jucuruaba.....                                                                                                                                                                                                                             | 120 |
| Tabela 24 – | Parâmetros e respectivos valores das classes de pedopaisagem                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 124 |

|             |                                                                                                                   |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | pós-calibração.....                                                                                               |     |
| Tabela 25 – | Parâmetros e respectivos valores das classes de uso e cobertura do solo pós-calibração.....                       | 124 |
| Tabela 26 – | Índices estatísticos do desempenho do modelo para os dados de vazão da estação Córrego do galo.....               | 128 |
| Tabela 27 – | Índices estatísticos do desempenho do modelo pós-calibrado para os dados de vazão da estação Córrego do Galo..... | 130 |

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 –  | Estrutura geral do modelo DHSVM.....                                                                                                                                                                | 35  |
| Figura 2 –  | Simulação do balanço de água na vegetação e na zona de raízes para uma célula de grade. A água que deixa a camada inferior da zona radicular ( $P_4$ ) destina-se à recarga do lençol freático..... | 37  |
| Figura 3 –  | Localização da unidade de estudo.....                                                                                                                                                               | 39  |
| Figura 4 –  | Rede de estações hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio Jucu e áreas circunvizinhas.....                                                                                                   | 45  |
| Figura 5 –  | Perfil esquemático da Floresta Ombrófila Densa.....                                                                                                                                                 | 56  |
| Figura 6 –  | Superfície matricial de profundidade do solo.....                                                                                                                                                   | 77  |
| Figura 7 –  | Rede hidrográfica adotada para modelagem.....                                                                                                                                                       | 77  |
| Figura 8 –  | Particionamento da série de dados para os três processos intrínsecos da modelagem.....                                                                                                              | 79  |
| Figura 9 –  | Mapa de geodiversidade (A) e zonas de influência das estações (B).....                                                                                                                              | 86  |
| Figura 10 – | Densidade mínima da rede de diferentes tipos de estações por área de abrangência em diferentes zonas fisiográficas, na BHRJ.....                                                                    | 89  |
| Figura 11 – | Precipitação média anual para o estado do Espírito Santo.....                                                                                                                                       | 92  |
| Figura 12 – | Temperatura média anual histórica medida e simulada para o estado do ES.....                                                                                                                        | 94  |
| Figura 13 – | Gráfico de distância entre as ligações da matriz de dissimilaridade.....                                                                                                                            | 97  |
| Figura 14 – | Dendrograma da análise de agrupamento dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos... ..                                                                            | 98  |
| Figura 15 – | Mapa de classes de solo do Sul do ES (A) e de pedopaisagem (B).....                                                                                                                                 | 101 |
| Figura 16 – | Mapa temático de vegetação original com 25 classes de uso e cobertura do solo.....                                                                                                                  | 104 |
| Figura 17 – | Mapa temático de vegetação com 11 classes de uso e cobertura do solo.....                                                                                                                           | 105 |
| Figura 18 – | Mapa temático de vegetação com 14 classes de uso e cobertura do solo.....                                                                                                                           | 105 |
| Figura 19 – | Mapa temático de vegetação com 76 classes de uso e cobertura do solo.....                                                                                                                           | 106 |
| Figura 20 – | Proporção da densidade da cobertura vegetal obtida pelo processamento do produto MOD44B.....                                                                                                        | 107 |
| Figura 21 – | Índice de área foliar médio mensal da série de 2009 a 2012.....                                                                                                                                     | 109 |
| Figura 22 – | Fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação média da série de 2009 a 2012.....                                                                                            | 110 |
| Figura 23 – | Precipitações e vazões diárias observadas na estação Fazenda Jucuruaba, ocorridas na bacia do rio Jucu, e vazões simuladas pelo modelo DHSVM.....                                                   | 115 |
| Figura 24 – | Vazão observada e estimada pelo modelo não calibrado para a                                                                                                                                         | 117 |

|             |                                                                                                                                                                        |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | estação Fazenda Jucuruaba.....                                                                                                                                         |     |
| Figura 25 – | Precipitações e vazões diárias observadas na estação Córrego do Galo, ocorridas na bacia do rio Jucu, e vazões simuladas pelo modelo DHSVM.....                        | 119 |
| Figura 26 – | Comparação entre vazões observadas e estimadas pelo modelo DHSVM calibrado para a estação Fazenda Jucuruaba.....                                                       | 121 |
| Figura 27 – | Série de dados de precipitação e vazão medida e simulada na resolução temporal diária, da estação Córrego do Galo.....                                                 | 127 |
| Figura 28 – | Série de dados de vazão medida e simulada validadas, monitoradas na estação Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo..                                                      | 129 |
| Figura 29 – | Comparações entre vazões observadas e estimadas pelo modelo, no período de validação, para a estação Fazenda Jucuruaba (à esquerda) e Córrego do Galo (à direita)..... | 131 |

## SUMÁRIO

|           |                                                                      |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1         | Introdução .....                                                     | 16 |
| 2         | OBJETIVOS .....                                                      | 19 |
| 2.1       | OBJETIVO GERAL.....                                                  | 19 |
| 2.2       | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                          | 19 |
| 3         | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                          | 20 |
| 3.1       | O CICLO HIDROLÓGICO E A BACIA HIDROGRÁFICA .....                     | 20 |
| 3.1.1     | Precipitação.....                                                    | 21 |
| 3.1.2     | Interceptação pela cobertura vegetal .....                           | 22 |
| 3.1.3     | Evapotranspiração.....                                               | 23 |
| 3.1.4     | Infiltração da água no solo .....                                    | 25 |
| 3.1.5     | Escoamento superficial .....                                         | 26 |
| 3.2       | MODELAGEM HIDROLÓGICA .....                                          | 27 |
| 3.2.1     | Escolha do modelo hidrológico.....                                   | 31 |
| 3.2.2     | Distributed Hydrology Soil Vegetation Model – DHSVM.....             | 33 |
| 4         | MATERIAL E MÉTODOS .....                                             | 38 |
| 4.1       | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO.....                                | 38 |
| 4.2       | PARÂMETROS de entrada do modelo DHSVM.....                           | 41 |
| 4.2.1     | Dados hidroclimatológicos.....                                       | 42 |
| 4.2.1.1   | Densidade de estações meteorológicas.....                            | 42 |
| 4.2.2     | Obtenção dos parâmetros de solo.....                                 | 47 |
| 4.2.3     | Obtenção dos parâmetros de vegetação.....                            | 55 |
| 4.2.3.1   | Fração de cobertura do dossel superior .....                         | 58 |
| 4.2.3.2   | Fração de raízes.....                                                | 58 |
| 4.2.3.3   | Índice de área foliar .....                                          | 60 |
| 4.2.1.4   | Albedo .....                                                         | 61 |
| 4.3       | MAPA DE CLASSES PEDOLÓGICAS.....                                     | 62 |
| 4.3.1     | Dados necessários para a elaboração do mapa de classes pedológicas . | 63 |
| 4.3.1.1   | Modelo digital de elevação (MDE).....                                | 63 |
| 4.3.1.2   | Atributos topográficos.....                                          | 64 |
| 4.3.1.3   | Variáveis climáticas pedogenéticas.....                              | 65 |
| 4.3.2     | Parâmetros topográficos e climáticos pedogenéticos .....             | 66 |
| 4.3.2.1   | Cálculo dos atributos topográficos .....                             | 66 |
| 4.3.2.2   | Cálculo dos atributos climáticos pedogenéticos .....                 | 67 |
| 4.3.2.2.1 | Temperatura.....                                                     | 67 |
| 4.3.2.2.2 | Precipitação.....                                                    | 68 |

|       |                                                                                          |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.3 | Análise de componentes principais.....                                                   | 71  |
| 4.3.4 | Classificação das classes de pedopaisagem por isodata e máxima verossimilhança.....      | 73  |
| 4.4   | ESTIMAÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS FALTANTES.....                                             | 74  |
| 4.5   | DADOS DE ENTRADA GERADOS PELO PRÓPRIO MODELO .....                                       | 75  |
| 4.6   | COMPONENTES DA MODELAGEM HIDROLÓGICA: AQUECIMENTO (SPIN UP), CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO..... | 77  |
| 4.6.1 | Seleção de métodos quantitativos diagnósticos .....                                      | 81  |
| 5     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                                             | 85  |
| 5.1   | DENSIDADE DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS .....                                       | 85  |
| 5.2   | MAPA TEMÁTICO DE PEDOPAISAGENS.....                                                      | 90  |
| 5.2.1 | Mapa de precipitação .....                                                               | 91  |
| 5.2.2 | Mapa de temperatura .....                                                                | 93  |
| 5.2.3 | Análise de componentes principais.....                                                   | 95  |
| 5.3   | PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO.....                                                             | 103 |
| 5.4   | MODELAGEM HIDROLÓGICA cOM O MODELO DHSVM .....                                           | 113 |
| 5.4.1 | Simulação sem calibração do modelo DHSVM.....                                            | 113 |
| 5.4.2 | Simulação com calibração do modelo DHSVM.....                                            | 117 |
| 5.4.3 | Validação do modelo DHSVM.....                                                           | 128 |
| 6     | CONCLUSÃO .....                                                                          | 133 |
| 7     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                         | 136 |
|       | APÊNDICES.....                                                                           | 154 |

## 1 INTRODUÇÃO

A ação não planejada do homem levou a uma redução considerável da cobertura florestal da Mata Atlântica, com graves consequências sobre o bioma e à própria qualidade de vida dos residentes em seu território. Muitos processos biofísicos neste ecossistema ainda precisam ser melhores compreendidos, porém sua destruição acelerada foi um grande obstáculo no passado, e um dos fatores mais limitantes e desafiadores aos pesquisadores, tendo restado apenas alguns remanescentes florestais representativos de uma paisagem que outrora ocupava todo o espaço territorial do estado do Espírito Santo.

Lima (2008) é contundente ao expressar a forte inter-relação existente entre o uso do solo e as consequências hidrológicas. É lamentável que os termos das leis e o atual método de fiscalização ambiental sejam ineficazes, no que se refere a dar condições para que a dinâmica de uso e ocupação do solo seja compatível à capacidade de suporte dos ecossistemas, pois de outra forma as interferências para a restauração de quadros críticos da paisagem não seriam necessárias.

A *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT, 2012) revela ter ocorrido, mundialmente, no período de 1974 a 2003, quase 50% dos desastres naturais, em função apenas do excesso e/ou escassez de água. Vestena (2008) afirma, ainda, que o conhecimento dos fatores condicionantes geradores desses acontecimentos permitem que a sociedade se ampare contra os mesmos e, nesse aspecto, os componentes do ciclo hidrológico de maior interesse são a precipitação e o escoamento superficial, sendo este último ditado majoritariamente pelo uso e ocupação do solo (LENCASTRE; FRANCO, 1984).

Os recursos hídricos podem ser considerados como indicadores das condições dos ecossistemas, pois estes são resultado de uma complexa interação dos diversos processos hidrológicos, com reflexos nas bacias hidrográficas, refletindo as condições naturais, uso e ocupação do solo, e interações de desequilíbrios que possam estar presentes (REYS; RIZZI; ARAKI, 2011; SPERLING, 2007).

Bacias hidrográficas são áreas com grande potencial para o estudo das mais diversas finalidades, das quais se destacam a recuperação de nascentes, qualidade da água, conservação dos recursos hídricos, reflorestamento conservacionista,



caracterização ambiental, manejo integrado, diagnóstico físico conservacionista, planejamento e gestão.

O bioma Mata Atlântica, no qual o Espírito Santo está inserido, é considerado um dos cinco *Hotspots* de maior prioridade de conservação do mundo, por sua excepcional biodiversidade e atual vulnerabilidade, devido à presença de tão numerosas espécies animais e vegetais ameaçadas de extinção. O governo desse estado, no intuito de tomar medidas mitigatórias dos impactos ambientais, está desenvolvendo o Projeto de Conservação e Recuperação da Biodiversidade e dos Recursos Hídricos nas Bacias Hidrográficas dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória – Projeto Florestas para Vida – FPV.

As bacias dos rios Jucu e Santa Maria da Vitória correspondem a 4.010 km<sup>2</sup>, ou 9% do território do Espírito Santo. Dentre os principais motivos que levaram a seleção de tais bacias, citam-se: comportam cerca de 50% da população do estado; provêm aproximadamente 95% do suprimento de água para a Região Metropolitana da Grande Vitória; geram parte da energia hidroelétrica utilizada por essa região; apresentam elevada importância para a economia do estado, com valor médio de 62% do PIB; tem enfrentado graves problemas de caráter hídrico como a redução da qualidade, quantidade e regularidade no suprimento de água; e tendem a seguir padrões de uso da terra que resultam em erosões, incrementando substancialmente as cargas de sedimentos nos cursos d'água (ESPÍRITO SANTO, 2013a; HABTEC, 1997b). Através da modelagem dos sistemas hidrológicos nas bacias dos rios Jucu e Santa Maria objetiva-se, pelo projeto FPV, compreender as complexas interações climáticas, edáficas e vegetacionais ali existentes, visando responder questões referentes a reflorestamento, saneamento, impactos das mudanças no uso do solo e efeito de mudanças climáticas.

O uso de modelos hidrológicos distribuídos de base física está se tornando cada vez mais comum à medida que aumenta a demanda para solução de problemas que envolvem previsões de futuras condições hidrológicas resultantes da alteração no uso do solo. O modelo DHSVM fornece uma representação dinâmica dos processos de bacias hidrográficas na escala espacial descrita pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) e contabiliza explicitamente a distribuição espacial da superfície dos processos terrestre, podendo ser aplicado sobre uma gama de escalas espaciais em um passo de tempo sub-diário a diário. O nível de detalhe do modelo é suficiente para representar processos importantes dentro do sistema

hidrologia-vegetação de uma forma fisicamente realista, de acordo com os tipos de dados que possam estar disponíveis (WIGMOSTA; NIJSSEN; STORCK, 2002; WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994).

Beckers, Smerdon e Wilson (2009) classificam, dentre os principais modelos hidrológicos da atualidade, o DHSVM como o modelo de maior funcionalidade de gerenciamento florestal, sendo uma poderosa ferramenta para uma ampla gama de aplicações em bacias hidrográficas, e o mais adequado para atender a gestão de bacias hidrográficas em questões associadas com o potencial de fluxos de cheias e perda de massa.

As perguntas indagadas através do projeto FPV deverão ser respondidas com auxílio de modelagens dinâmicas e espacialmente distribuídas, com aplicação dos modelos hidrológicos *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* – DHSVM (micro e meso-escala) e *Variable Infiltration Capacity* – VIC (macro escala). Para tanto, é fundamental a criação e manutenção de uma “Ferramenta de Informações Dinâmicas” (DIF) dando suporte à modelagem, com principais interesses de (ESPÍRITO SANTO, 2013ab):

- Fornecer linhas de base quantitativas e geoespaciais para cobertura do solo (vegetação, estruturas, diversidade vegetal e tipos funcionais), uso da terra, qualidade da terra (tipo de solo e topografia), e hidrologia (rede hidrográfica) para as áreas do projeto. Devendo-se prestar atenção nas condições históricas e em que cenários futuros de usos do solo serão de interesse.

- Ligar as camadas de dados do DIF via um modelo de distribuição hidrológica funcional para prever os impactos de mudanças no clima, cobertura do solo e uso do solo na biodiversidade, solo e água.

- Fornecer suporte local para modelar, calibrar, e usar os modelos para atingir os objetivos do projeto e para adaptá-los à escala nacional.

A realização do presente estudo visou dar suporte ao projeto PFV no que tange a construção da DIF e seus principais interesses com enfoque ao modelo DHSVM.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se, pela realização do presente trabalho, avaliar a capacidade preditiva do modelo DHSVM no aspecto hídrico quantitativo para a bacia hidrográfica do rio Jucu, localizada no estado do Espírito Santo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um Modelo Numérico do Terreno – MNT visando, em primeira instância, a substituição do produto de baixa resolução referente ao mapa temático de classes de solo, convencionalmente adotado nos estudos hidrológicos. Este MNT deverá: apresentar uma resolução espacial compatível com aquela definida para a modelagem com o DHSVM, possuir escala refinada, e ser dotado de propriedades hidráulicas e termodinâmicas intrínsecas com correspondências aos parâmetros exigidos pelo modelo;
- Obter tanto os parâmetros de entrada que o modelo DHSVM apresenta alta sensibilidade quanto àqueles que o mesmo é pouco sensível, visando minimizar o menor erro nas simulações, e compor um acervo local de variáveis para aplicação em outros estudos hidrológicos;
- Identificar os parâmetros de entrada de maior relevância para o processo de calibração do modelo, com vista ao direcionamento de custos e esforços em posteriores estudos;
- Calibrar e validar o modelo DHSVM para a bacia hidrográfica do rio Jucu, possibilitando sua aplicação em estudos da análise de cenários, previsões e demais projetos de cunho ambiental para o ES e outras localidades;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O CICLO HIDROLÓGICO E A BACIA HIDROGRÁFICA

O ciclo hidrológico é conceituado como um fenômeno global, onde a água, impulsionada pela energia solar, associada à gravidade e à rotação da Terra, é submetida à circulação fechada entre a atmosfera, os continentes e os oceanos (TUCCI, 2009).

A fase terrestre do ciclo hidrológico ocorre nas bacias hidrográficas. De acordo com Silveira (2009), a bacia hidrográfica é um sistema físico de entrada de água proveniente da precipitação, e com saída em forma de vazão pelos cursos d'água, com o papel hidrológico de transformar essa entrada de água, concentrada no tempo, em uma saída de forma mais distribuída temporalmente. Por ser esta uma área natural de captação da precipitação, o ciclo hidrológico é normalmente estudado com mais interesse na fase terrestre e, em especial, nesta unidade hidrogeográfica.

Em 1945, a análise de bacias hidrográficas começou a ter caráter objetivo, com a iniciativa do engenheiro hidráulico Robert E. Horton, precursor das abordagens hídricas quantitativas dentro desse espaço geográfico (CRISTOFOLETTI, 1980). Porém, no Brasil, somente em 1997 a bacia hidrográfica foi amparada legalmente, como fruto da compreensão e reconhecimento de sua importância na gestão dos recursos hídricos, pela Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Tal lei tem o objetivo de assegurar o uso adequado dos recursos naturais para que tanto a atual quanto as futuras gerações disponham desses recursos de forma racional e integrada, além do desenvolvimento sustentável, prevenção, defesa contra eventos hidrológicos críticos e uso da água em padrões adequados de quantidade e qualidade (BRASIL, 1997).

Araújo Júnior, et al. (2002) afirmaram que os planejamentos e gestões que têm como unidade básica a bacia hidrográfica, são os mais adequados para compatibilização o uso do solo com a preservação ambiental, já que possuem características biogeofísicas e sociais integradas.

A bacia hidrográfica é um regulador temporal dos componentes terrestres do

ciclo hidrológico. A ocorrência da água em seus diversos compartimentos influencia significativamente a disponibilidade hídrica, a ocorrência de inundações, e a dinâmica de elementos, poluentes e nutrientes (MORAES et al., 2003). Essa inter-relação é responsável pelo crescente interesse no estudo dos processos hidrológicos, e a compreensão de cada componente desse processo é indispensável em estudos ambientais, gestão de recursos hídricos e projetos de obras hidráulicas. Porém, a manutenção da água, que é um recurso qualitativa e geograficamente finito, objetivando atender seus múltiplos usos, em quantidade e qualidade, ainda representa grande desafio à sociedade (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

### 3.1.1 Precipitação

Toda água provinda da atmosfera, por efeito da gravidade, é considerada precipitação, o que a diferencia são suas distintas formas naquele instante. Suas principais grandezas são: o total precipitado; a duração; a distribuição temporal e a distribuição espacial. Por ser um processo aleatório que não permite previsão determinística, usa-se a estatística no tratamento dos dados na maioria dos problemas hidrológicos (BERTONI; TUCCI, 2009).

Dentre os principais fatores que influenciam a formação da precipitação, destacam-se a temperatura, a umidade relativa do ar, a radiação solar, o relevo e a dinâmica atmosférica. O conhecimento da heterogeneidade da precipitação é imprescindível nos planejamentos ambientais, por fornecer informações que subsidiam o uso correto e racional dos recursos naturais, em especial a água (LANGE FILHO; VESTENA, 2008).

A quantidade e a distribuição das chuvas são os principais fatores determinantes do tipo de vegetação e exploração agrícola (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). O fenômeno precipitação é ainda, considerado como a principal forma de retorno da água da atmosfera para a superfície terrestre, suprimento hídrico nas várias atividades humanas e econômicas, imprescindível na tomada de decisões quanto ao manejo da irrigação na agricultura, previsão do risco de incêndios, previsão de geadas, zoneamento agroclimáticos, manejo de pragas e doenças, e classificação climática. É o componente do ciclo hidrológico que

apresenta maior variabilidade tanto espacial quanto temporal, o que incide na necessidade da caracterização de seu padrão local e suas variações espaciais (ALMEIDA et al., 2011).

### 3.1.2 Interceptação pela cobertura vegetal

Em superfícies vegetadas, o primeiro obstáculo encontrado pela chuva é exatamente a Interceptação pela Cobertura Vegetal (ICV), definida como a retenção temporária de parte da precipitação acima da superfície do solo (BLAKE, 1975). Logo após a saturação da copa, a água é redistribuída pelo goteja ao solo, escoamento pelo tronco, e retorno para atmosfera por meio de evaporação, provocando uma diminuição do total da precipitação que atingiria a superfície do solo e suas coberturas. O volume de água redito internamente pelas plantas e ingestão pelos animais são desconsiderados em estudos hidrológicos, devido à pequena quantidade e dificuldade de mensuração dessas frações (LIMA, 1986). A água interceptada, que fica temporariamente retida acima da superfície do solo, acaba voltando à atmosfera por evaporação.

As proporções da ICV variam diferentemente para cada tipo de uso e cobertura do solo. Em culturas anuais, a principal relação se dá pela espécie e estágio de desenvolvimento (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Em florestas homogêneas, a espécie, idade e espaçamento são os principais fatores determinantes dessa proporção (LEOPOLDO; SOUSA; TUACEK FILHO, 1981). Já para o caso de florestas naturais, a variação é bem diversificada, estando em função das características da precipitação, condições climáticas, espécie predominante, formação, idade e densidade da vegetação, índice de área foliar e época do ano. Com base no regime hidrológico, a ICV pode apresentar ampla taxa de variação, indo de 7% a mais de 50% do total de água precipitado, como encontrado no Chile por Huber e Oyarzún (1992). De acordo com Bruijnzeel (1990), pode-se dizer que para florestas tropicais, do total precipitado, 4,5% a 24% são correspondentes a ICV e 1% a 2% água que escoam pelo tronco.

A interceptação tem grande importância no balanço hídrico, especialmente em áreas com florestas de grande porte. Há relevância até mesmo no controle de

enchentes e transtornos no trânsito em áreas urbanas (SANDERS, 1986; SILVA et al., 2008). Ainda assim, esta fração é comumente desprezada em muitos estudos hidrológicos, afirmam Oliveira et al. (2008).

Singh e Szeicz (1979) esclarecem que a evaporação da água retida na copa das árvores ocorre em uma taxa significativamente maior do que a taxa normal da transpiração, portanto, refutando a teoria anteriormente apresentada por Thornthwaite e Mather (1955), e Nicolson, Thorud e Sucoff (1968) que diziam não haver transpiração durante a ocorrência de evaporação.

### 3.1.3 Evapotranspiração

O termo evapotranspiração, conceituado por Thornthwaite e Wilm (1944), representa o processo conjunto de dois fenômenos, a evaporação e a transpiração, que foram agrupados devido à dificuldade em dimensioná-los separadamente. A evaporação é o conjunto de fenômenos de natureza física, tida como o processo de remoção da água por vaporização. A evaporação ocorre de uma variedade de superfícies como mares, lagos, rios, pavimentos, terra e água interceptada pela vegetação. Já a transpiração é a vaporização da água dos tecidos vegetais, devido a sua ação fisiológica, predominantemente controlada pelos estômatos (ALLEN et al., 2006) e em menores proporções pelas lenticelas em plantas lenhosas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Os principais fatores intervenientes do processo de evapotranspiração podem ser categorizados em fatores climáticos, da planta, de manejo do solo e inter-relação demanda atmosférica/suprimento de água pelo solo. Quanto aos fatores climáticos, atuam a radiação líquida, a temperatura, o vento e a umidade relativa do ar. Dentre os fatores da planta, citam-se: o albedo; a altura da planta; a profundidade do sistema radicular e o estágio de desenvolvimento. Quanto ao manejo do solo, cita-se: o adensamento e orientação das plantas; a capacidade de armazenamento de água e os impedimentos físicos e químicos (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Pinto et al. (1976) citaram, ainda, outros fatores, como a salinidade da água, a natureza do solo, a posição do nível do lençol freático e, em menor proporção, a pressão barométrica.

Informações quantitativas das perdas por evapotranspiração são utilizadas na resolução de numerosos problemas relacionados ao manejo hídrico, com enfoque em projetos de manejo de irrigação, previsão de cheias, construção e gerenciamento de reservatórios e barragens, planejamento de uso e concessão de outorga de recursos hídricos (BORGES; MENDIONDO, 2007; CARVALHO et al., 2011; DROOGERS; ALLEN, 2002; LEMOS FILHO et al., 2007; TUCCI; BELTRAME, 2009). Conforme Medeiros (2002), a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) é a variável de maior importância para projetos de irrigação, por indicar a quantidade de água que deve ser reposta para a vegetação cultivada, estando esta em função da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>).

Thornthwaite (1948) propôs um dos primeiros modelos para estimar a evapotranspiração, baseado na temperatura média do ar e no fotoperíodo. Posteriormente, decorreram os métodos de Camargo (1962), Priestley e Taylor (1972), Hargreaves e Samani (1985), Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006) e Tanque Classe A (ALLEN et al., 2006).

Allen et al. (2006) afirma que o método de Penman-Monteith foi definido como o método padrão para estimar a evapotranspiração de referência, mediante a análise de numerosas pesquisas que avaliaram seu desempenho em diversos países. Sedyama (1996, citado por CARVALHO et al., 2011), explica que Thornthwaite, na elaboração de seu método, preocupou-se com as variações sazonais do balanço de água no solo, e visava definir as diferenças regionais do clima; porém, Penman cuidou em desenvolver um modelo de base física que, a partir de elementos meteorológicos, pudesse estimar a taxa de evaporação da água em contato livre com a atmosfera, da umidade da superfície do solo e também da vegetação.

A evapotranspiração é a principal perda de água em sistemas hidrológicos, consumindo enorme quantidade desse recurso (ALLEN et al., 2011; LIANG; LI; LIU, 2009). Apesar da sua importância quanto aos múltiplos usos e impacto no balanço hídrico, é comum encontrar relatos de diversos autores queixando-se da carência, confiabilidade, ou mesmo ausência de dados hidrológicos para a sua estimação (ASSAD; MASUTOMO; ASSAD, 1992; BACK, 2009; FERREIRA; DANIEL; TOMAZELA, 2005; MELLO et al., 2003; WADT, 2003).

O método de Penman-Monteith exige medições de várias variáveis climáticas, e devido à carência de dados, métodos mais simples têm sido adotados.



Desse modo, a escolha do melhor método depende de uma série de fatores, dentre eles cita-se a disponibilidade de dados meteorológicos, já que métodos complexos somente terão aplicabilidade quando houver disponibilidade de todos os dados necessários. Deve-se atentar, também, à escala temporal requerida, ao conhecimento das condições climáticas onde serão empregados (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), ao nível de precisão exigida, a finalidade, bem como ao custo de aquisição de equipamentos (TAGLIAFERRE et al., 2010).

#### 3.1.4 Infiltração da água no solo

Definida como a passagem da água da superfície para o interior do solo, a infiltração é um dos mais significativos componentes do ciclo hidrológico, uma vez que é decisiva na disponibilidade e balanço de água na zona radicular das culturas, recarga de aquíferos, ocorrência e magnitude do escoamento superficial, manejo e conservação do solo e da água (CECÍLIO et al., 2003), e projetos de dimensionamento de sistemas de irrigação e drenagem (PAIXÃO et al., 2009; REICHARDT, 1987).

Pinto et al. (1976) particionaram o processo de infiltração de água no solo em três fases interdependentes, sendo estas as fases de intercâmbio, descida e circulação. A primeira ocorre na superfície do terreno, onde a água pode retornar à atmosfera por evapotranspiração; a segunda caracteriza-se como a fase promovida pelo movimento vertical da água para o interior do solo, pela superação das forças de adesão e capilaridade, promovendo armazenamento na camada impermeável, originando a última fase, cujo movimento obedece às leis de escoamento subterrâneo.

Os fatores intervenientes da infiltração podem ser naturais e/ou antrópicos, e dentre os mais comuns destacam-se a natureza e propriedades do solo, a disponibilidade de água, o estado da camada superficial e a quantidade de água e ar inicialmente presentes no solo (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2009), o tipo de cobertura superficial, o preparo e manejo do solo, a ação da precipitação, o congelamento da água no solo, as propriedades da água (BRANDÃO et al., 2006), macroestruturas do terreno, temperatura (PINTO et al., 1976), mudança de estação

e umidade (CECÍLIO, 2002), presença de horizontes estratificados e distância entre as fontes de suprimento de água e a frente de umedecimento (PAIXÃO et al., 2009). Devido a essa gama de fatores, a caracterização de todas as variáveis que influenciam a infiltração se torna um processo complexo e, por isso, diversos modelos têm sido propostos com vista a simplificá-lo (CECÍLIO, 2003). Entretanto, as equações matemáticas descrevem estes fatores somente de forma aproximada, devido a grande variação espacial e temporal (CHOW et al., 1994), anisotropia e heterogeneidade do solo (CHOWDARY; RAO; JAISWAL, 2006).

Os modelos utilizados para descrever a infiltração da água no solo podem ser classificados em empíricos ou teóricos. Os modelos empíricos possuem a vantagem de relacionar direta, ou indiretamente os parâmetros às características do solo, em contrapartida, possuem a desvantagem da impossibilidade de utilização em áreas diferentes da qual foram determinados. Já os modelos conceituais ou teóricos, são baseados nos processos físicos do escoamento em meios porosos, que são descritos pela equação de Darcy, não apresentando, portanto, as limitações típicas dos modelos empíricos (BRANDÃO et al., 2006).

### 3.1.5 Escoamento superficial

Do total da precipitação efetiva, parte é infiltrada e parte se empoeira nas depressões do solo. A partir do momento em que a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração da água no solo e de acumulação nas suas depressões superficiais, ocorre o escoamento superficial, que é definido como o seguimento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo, até encontrar uma calha definitiva nas cotas mais baixas do terreno (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2004). Esse processo pode desencadear prejuízos diretos ao solo pelo arraste de suas partículas em suspensão, transporte de nutrientes químicos, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas (PRUSKI, 2009).

Além da poluição dos cursos d'água, o transporte e deposição de sedimentos pelo escoamento superficial reduz a capacidade de armazenamento dos reservatórios, diminui o potencial de geração de energia elétrica, eleva os custos de

tratamento da água, desequilibra o balanço de oxigênio dissolvido na água e aumenta os custos de dragagem (BARROSO e SILVA, 1992).

Pruski, Brandão e Silva (2004) acrescentaram que, além de todos os fatores que influenciam a taxa de infiltração de água no solo, o escoamento superficial ainda é influenciado por fatores de natureza agroclimática como: a intensidade, duração, e área abrangida pela precipitação; uso e cobertura do solo; e evapotranspiração. Citam, também, fatores de natureza fisiográfica, como: área, declividade e formato da bacia; topografia; rede de drenagem; obras hidráulicas; além das propriedades intrínsecas dos tipos de solo.

A redução na perda de água por escoamento superficial em uma bacia ocorre naturalmente em áreas com maior rugosidade superficial do terreno, aumento da infiltração e de áreas da bacia ocupada por cobertura vegetal (com consequente aumento no incremento da evapotranspiração) (PRUSKI, BRANDÃO E SILVA, 2004).

Diversos modelos hidrológicos matemáticos, apesar de sua versatilidade e velocidade de resposta, trazem consigo a desvantagem de discretizar processos contínuos, não levando em consideração a variabilidade espacial das variáveis que descrevem quantitativamente os fenômenos que compõem a bacia hidrográfica como um sistema (TUCCI, 2005). Assim sendo, é necessária a integração desses modelos aos sistemas computacionais para seu funcionamento dinâmico, de forma a determinar, não apenas a sequência lógica do sistema, mas também a sua distribuição no espaço.

### 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelo pode ser entendido como a uma ferramenta para percepção do funcionamento de um sistema, sendo uma hipótese do funcionamento do mundo real em termos quantitativos (SAVENIJE, 2009). Em outras palavras, o modelo é uma abstração ou uma representação mais simplificada da realidade, conduzindo a variabilidade e complexidade do mundo real a um nível de compreensão e representação (LEE, 1973 citado por SPERLING, 2007).

Os modelos são classificados sob diferentes abordagens (BECKERS;

SMERDON; WILSON, 2009; KAMPF; BURGESS, 2007; MAIDMENT, 1993; TUCCI, 2005):

1. Quando existir uma relação com a distribuição espacial do fenômeno, o modelo poderá ser:

✓ Distribuído: um modelo que, explicitamente, representa a variabilidade espacial das variáveis de entrada, tipicamente modelando os fenômenos da bacia hidrográfica em uma grade de células de igual tamanho, em um formato matricial, com grid de espaçamento definido pelo usuário, com base nos objetivos de estudo e na escala de modelagem. De maneira geral, mesmo para dados temáticos, o detalhamento do espaço é realizado de forma que cada célula possa ser tratada como um ponto representativo de sua área de abrangência;

✓ Semidistribuído: um modelo que divide a bacia em áreas com propriedades hidrológicas comuns, como classes de elevação, declividade, solo, vegetação, sub-bacias, dentre outras, com posterior sobreposição desses produtos, definindo assim, as Unidades de Resposta Agrupadas (GRUs) ou Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs);

✓ Concentrado, agregado ou pontual: um modelo que não leva em conta a distribuição espacial de variáveis ou parâmetros de entrada para representar a heterogeneidade das características das bacias hidrográficas. Todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda a área de estudo.

2. Existindo uma relação temporal o modelo poderá ser:

✓ Estático: quando os fenômenos modelados são contínuos no tempo, ou seja, as soluções da modelagem são dadas em um único passo de tempo;

✓ Dinâmico: quando os resultados da medição dos processos associados se dão em determinado intervalo de tempo. Assim, os resultados de uma interação são utilizados como entrada para a próxima interação. Os passos de tempo mais comuns encontrados neste tipo de modelo são em dias ou horas.

3. Com base nas equações implementadas ao modelo, este será:

✓ Físico: Um modelo derivado de equações que descrevem a conservação de massa, impulso, e/ou energia, ou seja, baseado em processos físicos;

✓ Analítico, conceitual ou semiempírico: um modelo que utiliza hipóteses simplificadoras para derivar soluções que governam a conservação de

massa e/ou energia e equações de transporte. Ajustam os dados calculados aos observados através de funções empíricas (equação de Darcy, Horton etc.), mas que estão relacionadas com a física do sistema;

✓ Empírico: um modelo baseado em derivações experimentais simplificadas; portanto, pouco robusto, uma vez que é específico para a localidade e condições às quais as relações foram estimadas, ou seja, não possibilita fazer simulações de mudanças em condições que o modelo não foi parametrizado, como valores extremos (não adotados nos dados da elaboração do modelo), mudanças climáticas ou do uso do solo;

4. Com base na representação espacial dos dados simulados, estes poderão ser:

✓ Discreto: os dados de entrada são não distribuídos espacialmente, portanto, assumindo um valor não matricial e não espacializado resultante da modelagem, como por exemplo, a vazão de um rio e a umidade média do solo na bacia;

✓ Contínuo ou espacializado: variam progressivamente através de uma superfície a partir de uma fonte, com valores das células adjacentes apresentando variações espaciais referentes ao comportamento do fenômeno considerado, ou seja, com presença de correlação espacial.

5. Em função da presença ou ausência do conceito de probabilidade.

✓ Estocástico ou probabilístico: um modelo é dito estocástico quando ao menos uma das variáveis apresenta comportamento aleatório, de forma que, pelo menos uma das características operacionais é dada por uma função de probabilidade;

✓ Determinístico: quando o conceito de probabilidade não é considerado durante a elaboração do modelo. Não contém nenhuma variável aleatória, ou seja, para um conjunto conhecido de dados de entrada haverá um único conjunto de resultados de saída.

6. Quanto à aplicação ao gerenciamento dos recursos hídricos, os modelos podem ser divididos, com base na sua estrutura, em:

✓ Comportamental: são modelos aplicados na descrição comportamental do sistema, através de prognósticos e mediante as diferentes entradas de dados;

✓ Otimização: Destinam-se a obter as melhores soluções para projetos;

✓ Planejamento: visam obter soluções no âmbito hidráulico, hidrológico, econômico, socioeconômico e ambiental, por meio de simulações em macrocondições.

A modelagem é considerada como a principal ferramenta presente na prática da engenharia (PAIVA; COLLISCHONN; BRAVO, 2011), sendo valorizada por sua capacidade de análise de cenários e previsão de recursos e fenômenos, permitindo que gestores na indústria, governos e outros setores, realizem previsões em bacias submetidas a diferentes práticas de gestão.

Os modelos são usados para explicar os efeitos da variabilidade de mudanças climáticas e de planejamentos em longo prazo (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009), oferecendo vantagens por sua rápida aplicação e baixo custo quando comparados à demanda de tempo e custos operacionais das pesquisas de campo, aumentando seu nível de importância à medida que o problema em estudo tende a aumentar tanto em proporção quanto em complexidade. Neste contexto, os modelos hidrológicos computacionais proporcionam elevado potencial de suporte para elaboração de políticas no manejo de bacias hidrográficas (MACHADO, 2002).

Apesar das diversas vantagens relacionadas à modelagem, é necessário conhecer as limitações no uso dessa ferramenta. Na modelagem, algumas etapas precisam ser atendidas, dentre elas, a seleção do tipo de modelo, que deve ser realizada de forma categórica, devido aos diferentes níveis de complexidade de cada modelo e objetivos distintos dos projetos aos quais serão aplicados (SPERLING, 2007). Esse processo muitas vezes é demorado e demanda amplo conhecimento do problema, assim sendo, a desconsideração desse processo, ou mesmo a seleção inadequada do modelo, culminará em sério comprometimento dos resultados modelados (MACHADO, 2002).

Tucci (2005) afirmou que certos elementos devem ser compreendidos na escolha do melhor modelo hidrológico, destacando como principais: os objetivos do estudo; as características da bacia; as características do rio; a disponibilidade de dados; e a familiaridade do usuário com o modelo. Beckers, Smerdon e Wilson (2009) acrescentaram, ainda, que nessa escolha deve-se considerar, também, a disponibilidade de tempo e restrições de recursos. Os fatores apresentados por estes autores deverão estar em equilíbrio com as expectativas do estudo, pois havendo disparidade será improvável a determinação de um modelo adequado. Porém, se não houver balanceamento entre a disponibilidade de tempo e restrições

de recursos, alternativamente os autores aconselham que o nível de expectativas deva ser reduzido.

Modelos distribuídos devem ser preferidos, por sua capacidade de detalhamento da bacia e seus componentes (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009). A rasterização de uma bacia hidrográfica tem como principais propósitos explicar a sua variabilidade espacial no que se referem à cobertura e propriedades do solo, efeitos de sombra, inclinação, aspecto e vias de circulação de água, tanto na resposta hidrológica e descrição geológica (KAMPF; BURGESS, 2007).

Os modelos distribuídos permitem maior flexibilidade na análise do ambiente, por levar em conta a variabilidade espacial da área considerada. Suas variáveis dependem do espaço e/ou do tempo, e a sua capacidade de representação está ligada diretamente às informações disponíveis e à precisão desejada, determinando, assim, seu grau de detalhamento (TUCCI, 2005). No entanto, mesmo com a escolha do modelo hidrológico mais adequado, e aplicação nas condições ideais, existirá incerteza nos resultados se houver imprecisões nos registros de entrada e na calibração de seus parâmetros (CANEDO, 1989).

A tomada de decisões ambientais com o uso de modelos tem se tornado cada vez mais comum e crescente. Embora a grande maioria das análises seja realizada com modelos conceituais, os modelos distribuídos de base física são os mais adequados para tais análises (WIGMOSTA; NIJSSEN; STORCK, 2002).

### 3.2.1 Escolha do modelo hidrológico

Inúmeros modelos têm sido adotados na gestão florestal, para a previsão dos impactos das mudanças no uso e cobertura do solo e seus efeitos associados, nos mais variados ambientes. Dentre os principais modelos citam-se:

1. *Agricultural Catchments Research Unit (ACRU)*;
2. *BROOK90*;
3. *Cold Regions Hydrologic Model (CRHM)*;
4. *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model (DHSVM)*;
5. *Forest Hydrology Model (ForHyM)*;
6. *Forest Water Dynamics (ForWaDy)*;

7. *Hydrologiska Bryåns Vattenbalansavdelning-Environment Canada (HBV-EC);*
8. *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System (HEC-HMS);*
9. *Hydraulic Evaluation of Landfill Performance (HELP);*
10. *Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF);*
11. *HydroGeoSphere;*
12. *Integrated Hydrology Model (InHM);*
13. *MIKE-SHE;*
14. *MODHMS;*
15. *Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope model (PREVAH);*
16. *Precipitation Runoff Modelling System/Modular modelling system (PRMS/MMS);*
17. *Regional Hydro-Ecologic Simulation System (RHESys);*
18. *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR);*
19. *Soil and Water Assessment Tool (SWAT);*
20. *UBC-UF Peak Flow Model;*
21. *University of British Columbia Watershed Model (UBCWm);*
22. *Wasserhaushalts-Simulations-Model (WaSiM-ETH);*
23. *Water Balance Model for BC (based on QUALHYMO model);*
24. *Variable Infiltration Capacity (VIC) model;*
25. *WATFLOOD;*
26. *Water Erosion Protection Project (WEPP);*
27. *Water Resources Evaluation of Non-Point Silvicultural Source (WRENSS);*
28. *Equivalent Cut Area-Alberta (ECA-AB);*
29. *Water Resources Management Model (WRMM); e*
30. *Water Use Analysis Model (WUAM).*

O grande número de modelos prontamente disponíveis, cada qual com suas particularidades, torna complexa a seleção daquele ideal para determinado estudo. Assim, uma possível alternativa é a delimitação de um grupo de modelos de finalidade compatível com os objetivos do estudo, por meio de consultas exploratórias em relatórios comparativos, baseados em revisão ou em experimentação, seguido de uma análise mais criteriosa em manuais e guias de utilização.

Beckers, Smerdon e Wilson (2009) apresentaram as capacidades e limitações dos principais modelos hidrológicos da atualidade para a gestão operacional de florestas, e definiram, dentre os 30 modelos comparados (listados anteriormente), o



*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) e o *Regional Hydro-Ecologic Simulation System* (RHESys) como sendo os modelos de alta complexidade que apresentam maior potencial e funcionalidade no tema gestão florestal, porém, o DHSVM apresenta ainda, outras vantagens, como:

- ✓ É considerado o modelo mais adequado para a gestão de bacias hidrográficas em questões relacionadas a enchentes e perdas de massa, além de uma ampla gama de aplicações hidrológicas, podendo ser facilmente combinado à grade de saída de modelos climáticos;

- ✓ É o preferido para aplicações em terrenos montanhosos, o que é um fato relevante no que se refere à área de estudo;

- ✓ Consiste no modelo hidrológico adotado pelo Banco Mundial para a gestão de recursos hídricos e florestais (informação verbal)<sup>1</sup>.

### 3.2.2 Distributed Hydrology Soil Vegetation Model – DHSVM

O desenvolvimento do DHSVM se deu originalmente por Mark Wigmosta, na Universidade de Washington, durante a década de 1990. Esse é um modelo hidrológico distribuído, baseado em processos físicos, projetado para fornecer uma representação integrada e dinâmica do solo, hidrologia e vegetação, de uma ou um grupo de bacias hidrográficas, na escala espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE).

Para o DHSVM, comumente adota-se o MDE com grid de espaçamento variando em uma amplitude de 10 a 30 m para bacias de até 100 km<sup>2</sup> e 100 m ou superior para bacias da ordem de 100 a 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>.

Por incluir o sistema de interceptação da chuva pelo dossel, evaporação, gotejamento, escoamento pelo tronco, transpiração da vegetação e evaporação do solo, passa a ser classificado, também, como um modelo para simulação de processos SVAT – *Soil-vegetation-atmosphere transfer* (BECKERS; ALILA 2004,

---

<sup>1</sup> Informação fornecida por Erick Fernandes – *Asesor, Cambio Climático y Recursos Naturales, Departamento de Desarrollo Sostenible, Región de América Latina y el Caribe*, T: +1.202.473.1292, F: +1.202.522.3308, E-mail: efernandes@worldbank.org – durante reunião no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Centro de Ciências Agrárias, Jerônimo Monteiro (ES), em 20 de setembro de 2011.

BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009, SUN et al., 2013, WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994, WIGMOSTA; NIJSSEN; STORCK, 2002).

Esse modelo tem sido empregado, de forma geral, em pesquisas de interações clima/hidrologia, impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, pesquisa sobre as atividades de manejo florestal em bacias hidrográficas, incluindo ainda, mas não limitado, aos seguintes estudos, nas respectivas localidades:

- ✓ Efeitos de estradas em processos hidrológicos – Pang Khum norte da Tailândia (CUO et al., 2006);

- ✓ Efeitos da mudança da cobertura do solo no regime hidrológico de bacia hidrográfica – Washington, NW Thailand (CUO et al., 2010; THANAPAKPAWIN et al., 2006);

- ✓ Predição da dinâmica de sedimentos em montanhas florestadas – norte central de Washington – oeste da província de Oregon (DOTEN et al., 2006; LAMARCHE; LETTENMAIER 2001);

- ✓ Simulação do balanço hidrológico e efeitos do tratamento de florestas – oeste do Oregon (WAICHLER; WIGMOSTA; WEMPLE, 2002);

- ✓ Predição dos efeitos da colheita florestal em vazão de pico - noroeste do Pacífico (STORCK et al., 1998);

- ✓ Simulação da meteorologia horária a partir de dados diários e seu significado na hidrologia – oeste do Oregon (WAICHLER; WIGMOSTA, 2003);

- ✓ Contribuição do escoamento preferencial em encostas inclinadas para a geração de pico de fluxo em uma bacia – floresta tropical (BECKERS; ALILA, 2004);

- ✓ Previsão e avaliação a curto, médio e longo prazo de fluxo hídrico para energia hidroelétrica (WESTRICK; STORCK; MASS, 2002);

- ✓ Análise de sensibilidade aos parâmetros de vegetação - Serra do Mar no Estado de São Paulo (KRUK, 2009);

- ✓ Modelagem hidrológica em microbacia florestada não perturbada – noroeste de Manaus na Amazônia Central (PINEDA, 2008);

- ✓ Avaliação de impactos do uso da terra na temperatura da água na rede de drenagem, em pequenas bacias hidrográficas urbanas (Sun et al. 2013);

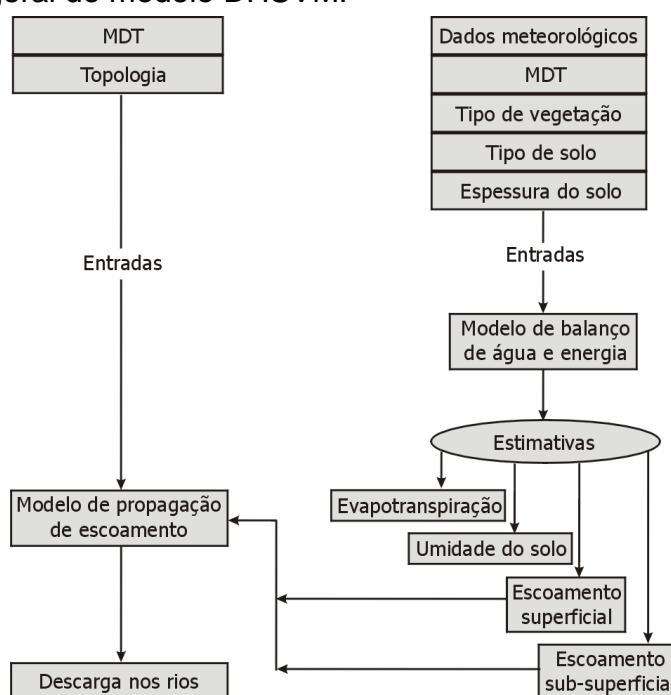
- ✓ Impactos de mudanças climáticas potenciais em bacias hidrográficas – noroeste do Pacífico (LEUNG; WIGMOSTA, 1999).

É notável a flexibilidade desse modelo quanto à diversidade dos ambientes e

tipos de aplicações. No entanto, é importante destacar que, como limitação, Beckers e Alila (2004) afirmam que o modelo pode ser incapaz de representar o escoamento preferencial em encostas na simulação dos picos de vazão, sendo incerta, também, a sua precisão quanto ao papel das estradas florestais na hidrologia de bacias hidrográficas (SURFLEET, 2008). Quanto à praticidade de seu uso, poucos esforços têm sido feitos para desenvolver uma interface amigável com o usuário (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009), até o atual momento.

A estrutura do DHSVM foi projetada com inclusão dos seguintes modelos internos: a) um componente de dossel estratificado em duas camadas para a evapotranspiração, b) um componente de balanço energético, c) um componente de solo multicamadas referentes às zonas de enraizamento para cálculos da hidráulica do solo, d) um componente de fluxo saturado subsuperficial, e) um componente de escoamento em canais, e ainda f) um componente de sedimentos com quatro subcomponentes principais: perda de massa (estocástica), erosão de encostas, erosão das estradas florestais e um algoritmo de roteamento de canal, que por sua vez, permitem o cálculo da mudança na elevação do MDE em função da erosão (BECKERS, SMERDON; WILSON, 2009, SUN et al. 2013, WIGMOSTA; NIJSSEN; STORCK, 2002, WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994) (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura geral do modelo DHSVM.



Fonte: PINEDA, (2008).

O DHSVM realiza a modelagem dos seguintes processos: dinâmica da distribuição espacial da evapotranspiração total e potencial; evaporação interceptada e total; armazenamento da interceptação pela vegetação; interceptação pela rede de drenagem e viária; umidade do solo para cada uma das multicamadas; percolação; profundidade do lençol freático; temperatura da superfície do solo; troca de radiação líquida na superfície; troca de calor sensível e latente; troca de calor com o solo; armazenamento de calor no solo; escoamento superficial; retorno de fluxo em cotas mais baixas do terreno por saturação do solo; fluxo total de sedimentos; hidrograma completo; rendimento anual; pico de fluxo; baixo fluxo; balanço hídrico; vazão dos rios; escoamento superficial de encostas; águas subterrâneas; escoamento de água na rede viária; e transferência de energia térmica nos rios através da interface ar-água.

Por ser um modelo contínuo e dinâmico, realiza o cálculo do balanço hídrico para cada célula da grade matricial a qual a bacia é representada, em cada passo de tempo, pelos seguintes componentes (Equação 1 e Figura 2):

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

em que:

$\Delta S_{Sj}$ : variação do armazenamento da água no solo nas “ns” camadas do solo;

$\Delta S_{io}$  e  $\Delta S_{iu}$ : variações na interceptação armazenada no dossel superior (*overstory*) e inferior (*understory*), respectivamente;

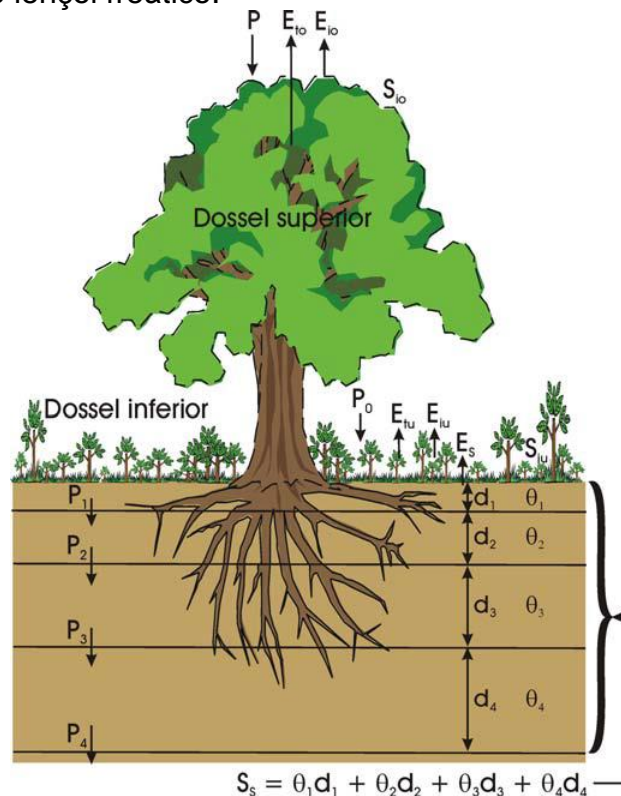
P: precipitação;

$P_{ns}$ : percolação (drenagem vertical da água) das zonas de raízes e abaixo dessas;

$E_s$ : evaporação da superfície do solo;

$E_{io}$ ,  $E_{iu}$ ,  $E_{to}$  e  $E_{tu}$ : evaporação e transpiração dos dosséis superior e inferior respectivamente.

Figura 2 – Simulação do balanço de água na vegetação e na zona de raízes para uma célula de grade. A água que deixa a camada inferior da zona radicular ( $P_4$ ) destina-se à recarga do lençol freático.



Fonte: Pineda, (2008, adaptada de WIGMOSTA et al., 1994).

Nesse modelo, os componentes do balanço hídrico podem, ainda, ser divididos em:

1. Escoamento superficial;
2. Água no dossel;
3. Água no solo;
4. Fluxo subsuperficial saturado;
5. Água interceptada por canais;
6. Água interceptada por estradas;
7. Total de água que volta à superfície por consequência da saturação do solo;
8. Evapotranspiração;
9. Precipitação;
10. A quantidade total de água durante o passo de tempo anterior;
11. Fluxo de bueiros para o canal;
12. Fluxo da superfície para o canal;
13. Erro total de balanço de massa para o passo de tempo atual.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Estudos que envolvem um grande número de variáveis em processos integrados são vulneráveis de atribuição de encargo total ou parcial dos erros a qualidade dos dados de entrada, a fatores pouco ou não relacionados com o resultado sob avaliação, ou ainda de forma mais crítica, a incerteza sobre a origem dos erros, ocasionados devido à complexidade das inter-relações dos parâmetros de entrada sobre o resultado final de previsão. Objetivando não incorrer, em tais erros, buscou-se, neste trabalho, sempre que possível, usar produtos, ainda que de livre acesso, com a melhor qualidade disponível no que tange a escala, resolução espacial, resolução temporal, ausência de erros de medição e atualidade, e quando não se dispôs de produtos sob tais critérios, adotaram-se as mais refinadas técnicas, sob alcance e domínio, para elaboração dos dados de entrada.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

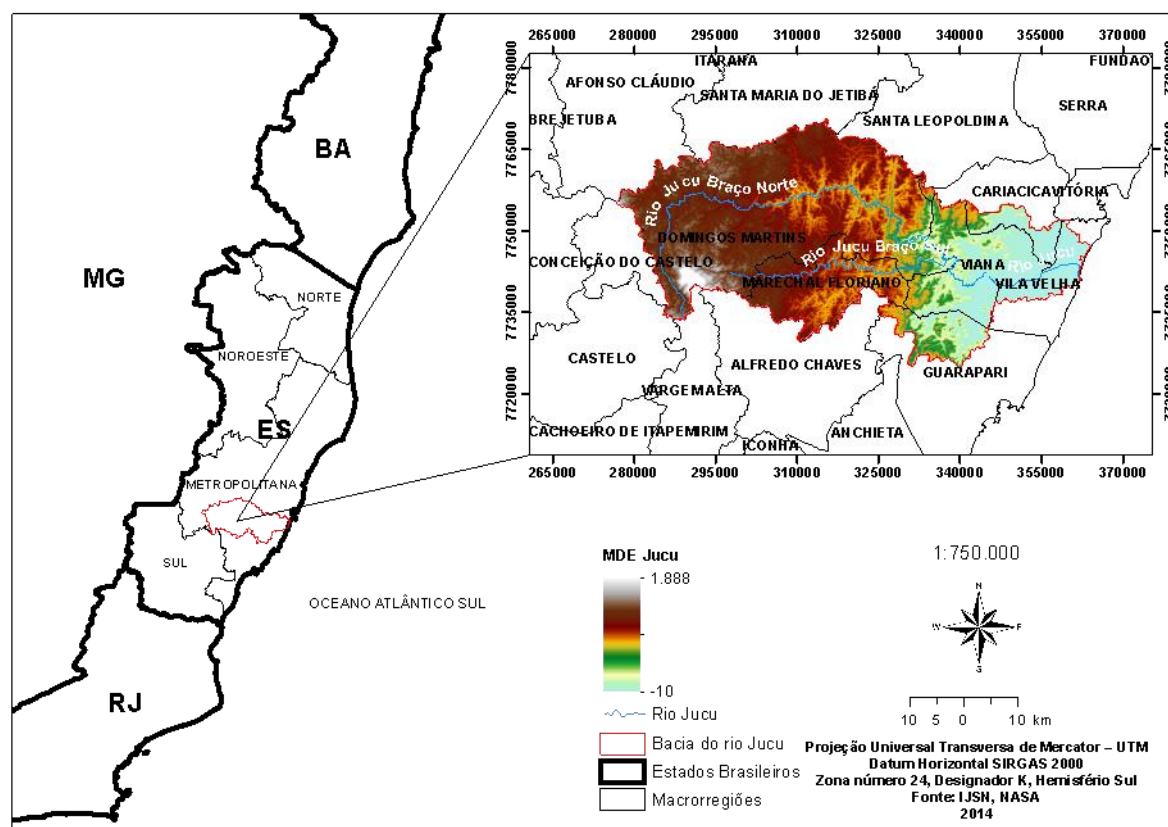
Tomando como ponto de partida a hierarquização descendente da divisão político-administrativa do Brasil, a área de estudo, definida pela bacia hidrográfica do rio Jucu (BHRJ) (Figura 3), encontra-se inserida na região Sudeste do país, no estado do Espírito Santo e Macrorregião de Planejamento Metropolitana. Esta última agrupa-se em cinco microrregiões, das quais duas, compostas por 14 municípios, são parcialmente ocupadas pela unidade de estudo; seis desses municípios são abrangidos pela bacia, sendo estes: Domingos Martins e Marechal Floriano na Microrregião Sudoeste Serrana e Viana, Vila Velha, Cariacica e Guarapari na Microrregião Metropolitana. Os municípios de Domingos Martins, Marechal Floriano e Viana encontram-se completamente inseridos nessa bacia (IJSN, 2011).

Componente da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste, o rio Jucu drena a Bacia de nível 4 e código 7.714, classificada pelo sistema de Otto Pfafstetter, composta de nove sub-bacias de nível 5, a saber: rio Barcelos; ribeirão Tijucu Preto; rio Galo; rio Jucu Braço Sul; ribeirão Peixe Verde, rio Jacarandá; rio Camboapina; rio Marinho; e Foz do Rio Jucu. Estes por sua vez recebem 65 tributários de nível 6

segundo esse mesmo sistema de classificação (IJSN, 2014).

O curso d'água principal da BHRJ, conhecido como Jucu Braço Norte, tem extensão de 169 km, com nascente situada a sudoeste do Parque Estadual de Pedra Azul, em Domingos Martins, e a noroeste do distrito de Castelinho (Vargem Alta), apresentando altitude de 1.221 m. Trata-se de uma bacia exorréica, com foz desaguando no Oceano Atlântico na praia Barra do Jucu, em Vila Velha. Do total de 169 km de extensão do curso d'água principal, 126 km situam-se no trecho intitulado Braço Norte, sendo o restante corresponde à extensão da confluência dos Braços Norte e Sul até a sua foz. Na década de 50, o já extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento – DNOS realizou o desvio do rio Formate, outrora um dos principais afluentes do rio Jucu, o qual passou a constituir uma bacia independente. Assim, com base no que era originalmente, o rio Jucu apresenta seu curso atual bastante modificado (IJSN, 2014).

Figura 3 – Localização da unidade de estudo.



Fonte: o autor

Em referência geoespacial, a BHRJ localiza-se entre as coordenadas UTM mín. E: 276.759 e máx. E: 364.059 m, e mín. N: 7.770.580 e máx. N: 7.724.730 m,

compreendendo uma área de drenagem, projetada em plano horizontal, de 2.125 km<sup>2</sup>, área real (com base no declive) de 2.239 km<sup>2</sup>, perímetro de 447 km, altitude máxima de 1.888 m e mínima de -10 m.

Quanto à fitofisionomias do Bioma Mata Atlântica, na qual a BHRJ está inserida, é predominante a cobertura por Floresta Ombrófila Densa (Floresta Tropical Pluvial), estendendo-se quase que pela totalidade da área, sendo descontinuada na região central da bacia por uma faixa transversal de Floresta Ombrófila Aberta (Faciações da Floresta Ombrófila Densa) (BRASIL, 2012).

Devido à forte variação do relevo, diversidade orográfica (altitude, forma, orientação das encostas, etc), continentalidade e maritimidade, essa bacia é dotada de alta heterogeneidade climática, segundo a classificação de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Dois tipos de clima são coincidentes à região, o clima quente e úmido e o tropical de altitude (mesotérmico), os quais se enquadram nas categorias Tropical Úmido com Estação Chuvosa no Verão e Seca no Inverno (Aw), Tropical Úmido sem Estação Seca Pronunciada (Am), e subtipos Brando Úmido (Cfa) e Brando de Inverno Seco (Cwa) (HABTEC, 1997a; PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007).

Os registros climáticos mostram grande variação na amplitude de temperatura ao longo do perfil altitudinal da bacia. Devido às chuvas orográficas, os índices pluviométricos da região serrana são mais elevados quando comparados ao litoral. No domínio serrano, a pluviosidade média anual pode variar de 1.200 a 2.000 mm, enquanto no litoral oscila entre 1.100 a 1.300 mm. As maiores vazões ocorrem com maior frequência no mês de dezembro, e a época de estiagem corresponde aos meses de julho a setembro (ANA, 2012).

O tipo de solo predominante na área é o Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupando quase que a totalidade da bacia. Ocorrem ainda solos do tipo Cambissolo Háplico na região norte e sudoeste da bacia, Neossolo Flúvico nas regiões mais baixas do relevo, e manchas de Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho Amarelo respectivamente em áreas compreendidas pelos municípios de Guarapari e Cariacica.

O uso do solo na bacia é majoritariamente agropecuário. As várias pequenas indústrias estão localizadas principalmente em Viana, Cariacica e Vila Velha, sendo a maioria considerada como potencialmente poluidoras. O rio Jucu possui potencial hidráulico para a geração de energia, tendo recebido em 1909 a primeira hidrelétrica



do Estado, a Pequena Central Hidrelétrica – PCH denominada Jucu, situada no tributário Jucu Braço Sul no município de Domingo Martins (ESCELSA, 2014), com área de drenagem de 387 km<sup>2</sup>, e mais recentemente, recebe a implantação da PCH Pedreira, com área de drenagem de 93 km<sup>2</sup> instalada no rio Jucu Braço Norte, no Distrito de Paraju, município de Domingos Martins (HABTEC, 1997a; ESPÍRITO SANTO, 2012).

Os principais usos das águas dessa bacia são: abastecimento urbano, industrial, doméstico e rural; geração de energia; dessedentação de animais; diluição de efluentes; irrigação; recreação; pesca; e manutenção de biodiversidade fluvial (ANA, 2012). Dentre os principais fatores de degradação dos recursos hídricos cita-se: cargas elevadas de esgotos domésticos; escoamento superficial de áreas urbanas e rurais; efluentes industriais; chorume; despejo de lixo; efluentes e resíduos de atividades agropecuárias; processos erosivos generalizados; retificação; canalização e dragagem de cursos de água; ocupação de margens de rios e lagoas; retiradas de matas marginais e extração de areia. Já quanto aos principais impactos observados destacam-se: barramento; poluição orgânica das águas e sedimentação; adição de substâncias tóxicas; metais pesados e óleo nas águas; represamento de rios; modificação de traçados e seções de canais fluviais; elevação da turbidez e assoreamento da calha; destruição de várzeas sazonalmente inundadas; lagos e alagadiços marginais; diminuição/eliminação de matas marginais dos cursos d'água; presença de lixo flutuante; e enchentes. Por fim, os principais problemas quanto ao uso do solo são: assoreamento; desmatamento; queimadas; uso de agrotóxicos e ocupação desordenada de suas margens (ANA, 2012).

## 4.2 PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO DHSVM

No intuito de avaliar quantitativamente a vazão do rio Jucu, adotou-se o modelo hidrológico DHSVM versão 3.1.2, ao qual são necessários parâmetros hidroclimatológicos, parâmetros dos solos, e parâmetros de vegetação, os quais serão descritos nos itens subsequentes.

As variáveis exigidas pelo DHSVM são informações físico-hídricas, vegetacionais e hidroclimatológicas de elevada complexidade de obtenção e custo

de medição, pois devem ser obtidas de densa amostragem visando uma representatividade média adequada das respectivas classes dos dados de entrada. Este problema é agravado ainda mais pela escassez dessas informações em fontes bibliográficas, quanto mais, de forma padronizada e com amostragem espacial sistematizada. Isso tem implicado em alguns autores, que trabalharam com modelagem hidrológica, optarem pela adoção de informações de regiões fora da abrangência de sua área de estudo, dos quais citam-se: Baldissera, (2005), Campanharo, (2013), Fukunaga (2012), Oliveira (2014). Visando minimizar as implicações decorrentes desse procedimento, buscou-se, sempre que possível, o uso de técnicas para obtenção dos dados na área de estudo, ainda que por estimações, e a análise qualitativa dos mesmos.

#### 4.2.1 Dados hidroclimatológicos

As principais variáveis hidroclimatológicas necessárias à modelagem são: precipitação (m); temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ); velocidade do vento (m/s); umidade relativa do ar (%); radiação de onda curta incidente ( $\text{W m}^{-2}$ ); e radiação de onda longa incidente ( $\text{W m}^{-2}$ ), e para calibração e validação do modelo adotou-se a variável vazão ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ). Esses dados foram obtidos de estações meteorológicas, convencionais e automáticas, e estações fluviométricas. As séries históricas foram dispostas de forma a obter dados sincronizados entre as estações. Embora algumas dessas apresentassem séries mais longas, o período de dados utilizado se limitou ao tamanho das séries de intervalo de medição compatível com as séries de dados das demais estações.

A relação de estações hidrometeorológicas, selecionadas para o estudo, foi obtida do Inventário de Estações Pluviométricas (ANA, 2009a) e do Inventário de Estações Fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2009b). As possíveis atualizações foram conferidas nos respectivos repositórios eletrônicos.

Devido à dependência espacial dos dados climáticos, e em consideração a mais adequada representatividade dos dados espaciais, optou-se pela escolha de estações tanto na região interna da área de estudo quanto nas circunvizinhas. Em relação ao conceito de amostragem, valorizou-se o item quantidade em detrimento

da distribuição espacial, altitudinal e agrupamento, idealizando apenas minimizar áreas não amostradas.

Do conjunto de estações meteorológicas da rede do sistema de informação meteorológica automática de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram selecionadas 5 de interesse, por proximidade da área de estudo, sendo 4 automáticas pertencentes à rede de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) e uma convencional do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

Visando um maior adensamento da distribuição dos dados meteorológicos, optou-se pela adição de um novo conjunto de estações, sendo 19 pluviométricas obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da ANA e 3 meteorológicas convencionais do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER). Das 27 estações selecionadas (Tabela 1), 8 localizam-se na BHRJ e o restante circundando-a (Figura 4), contemplando altitudes de 3 a 1.075 m. A seleção das estações não automáticas localizadas nas áreas circunvizinhas da BHRJ foi realizada estabelecendo a localização das EMAs como o limiar de distância dos divisores topográficos da bacia e ocorrência de áreas não contempladas, o que justificou-se pelo critério adotado para o preenchimento das variáveis faltantes das estações não automáticas.

Tabela 1 – Estações presentes na bacia do rio Jucu e áreas circunvizinhas.

| <b>Código</b> | <b>Estação</b>        | <b>Tipo</b>   | <b>Altitude</b> | <b>Responsável</b> | <b>Variáveis necessárias à modelagem*</b> |
|---------------|-----------------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------------------------------------|
| 2040001       | Fazenda Jucuruaba     | Pluviométrica | 80              | ANA                | 1                                         |
| 2040003       | Fazenda Fonte Limpa   | Pluviométrica | 70              | ANA                | 1                                         |
| 2040004       | Guarapari             | Pluviométrica | 6               | ANA                | 1                                         |
| 2040007       | Santa Maria de Jetibá | Pluviométrica | 710             | ANA                | 1                                         |
| 2040008       | Garrafão              | Pluviométrica | 940             | ANA                | 1                                         |
| 2040010       | Santa Leopoldina      | Pluviométrica | 160             | ANA                | 1                                         |
| 2040011       | Matilde               | Pluviométrica | 515             | ANA                | 1                                         |
| 2040012       | Marechal Floriano     | Pluviométrica | 544             | ANA                | 1                                         |
| 2040014       | Duas Bocas            | Pluviométrica | 200             | ANA                | 1                                         |
| 2040015       | Perobinha             | Pluviométrica | 640             | ANA                | 1                                         |
| 2040018       | Cachoeira Suíça       | Pluviométrica | 409             | ANA                | 1                                         |
| 2040020       | Vila Nova Maravilha   | Pluviométrica | 980             | ANA                | 1                                         |
| 2040022       | Ponta da Fruta        | Pluviométrica | 3               | ANA                | 1                                         |
| 2040023       | São Rafael            | Pluviométrica | 818             | ANA                | 1                                         |
| 2040045       | Córrego do Galo       | Pluviométrica | 451             | ANA                | 1                                         |
| 2041002       | Castelo               | Pluviométrica | 107             | ANA                | 1                                         |
| 2041011       | Conceição do Castelo  | Pluviométrica | 670             | ANA                | 1                                         |
| 2041020       | Aracê                 | Pluviométrica | 1075            | ANA                | 1                                         |
| 2041023       | Afonso Claudio        | Pluviométrica | 300             | ANA                | 1                                         |
| 83648         | Vitória               | Convencional  | 36              | INMET              | 1, 2, 3, 4                                |
| A612          | Vitória               | Automática    | 9               | INMET              | 1, 2, 3, 4, 5                             |
| A613          | Santa Tereza          | Automática    | 998             | INMET              | 1, 2, 3, 4, 5                             |
| A615          | Alfredo Chaves        | Automática    | 35              | INMET              | 1, 2, 3, 4, 5                             |
| A657          | Afonso Cláudio        | Automática    | 520             | INMET              | 1, 2, 3, 4, 5                             |
| -             | Centro Serrano        | Convencional  | 950             | INCAPER            | 1, 2, 3                                   |
| -             | Viana                 | Convencional  | 20              | INCAPER            | 1, 2, 3                                   |
| -             | Itarana               | Convencional  | 245             | INCAPER            | 1, 2                                      |

\*1: Precipitação, 2: Temperatura do ar, 3: Umidade relativa do ar, 4: Velocidade do vento, 5: Radiação de onda curta incidente.

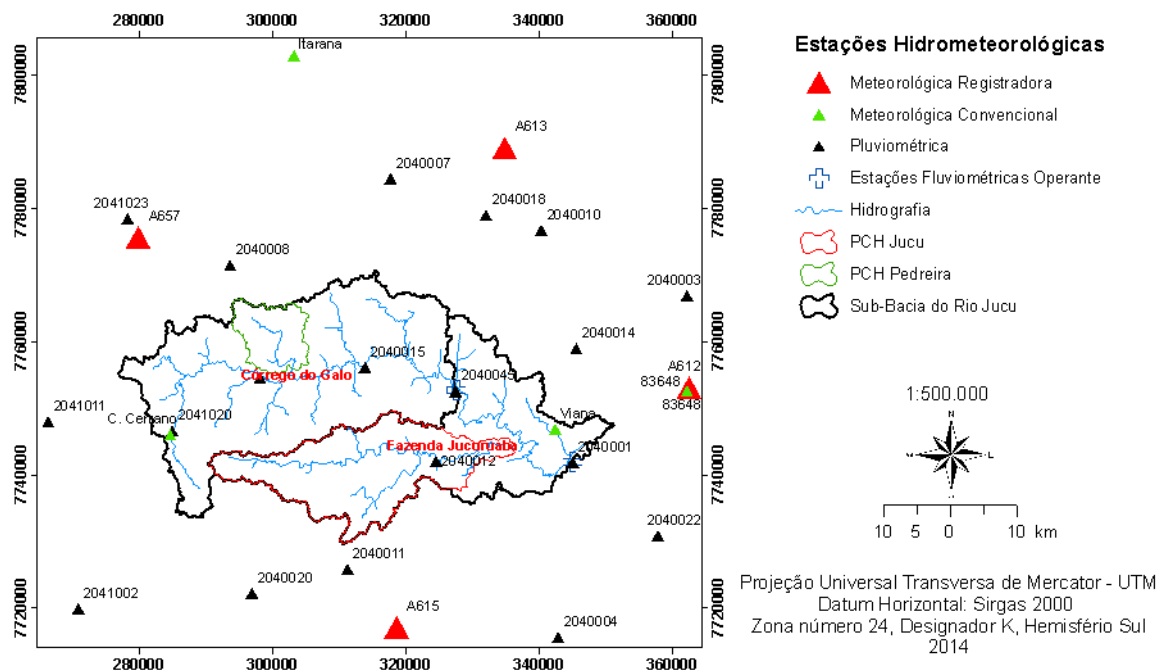
Procedimento semelhante foi adotado para a seleção das estações pluviométricas, das quais se dispôs de apenas duas (Tabela 2). A estação Córrego do Galo (inserida na bacia drenada pela estação Fazenda Jucuruaba) encontra-se em uma altitude de 580 m e a estação Fazenda Jucuruaba a 80 m, drenando respectivamente áreas de 979 km<sup>2</sup> e 1.689 km<sup>2</sup>.

Tabela 2 – Estações pluviométricas presentes na bacia do rio Jucu.

| <b>Código</b> | <b>Estação</b>    | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Rio</b>             | <b>Responsável</b> |
|---------------|-------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|
| 57170000      | Córrego do Galo   | 979                          | Rio Jucu – Braço Norte | ANA                |
| 57230000      | Fazenda Jucuruaba | 1.689                        | Rio Jucu               | ANA                |

Na Figura 4 pode ser observada a dimensão da área de drenagem das duas estações pluviométricas e duas sub-bacias submetida a barramento referente à Pequena Central Hidrelétrica Pedreira (ESPÍRITO SANTO, 2012) e Jucu, com área de 93 km<sup>2</sup> e 387 km<sup>2</sup>, o corresponde a 28,40 % da área drenada pela estação mais a jusante (Estação Faz. Jucuruaba).

Figura 4 – Rede de estações hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio Jucu e áreas circunvizinhas.



Fonte: o autor.

#### 4.2.1.1 Densidade de estações meteorológicas

Em virtude da incompatibilidade de variáveis climáticas medidas pelas diferentes fontes, foi necessário realizar um rearranjo para suprir o conjunto mínimo das variáveis exigidas pelo modelo. As variáveis ausentes das estações pluviométricas ou convencionais foram preenchidas inalteradamente com os valores da estação vizinha mais próxima, por ser imprescindível ao modelo a presença de todas as variáveis climáticas mínimas, em cada estação.

A WMO faz recomendações sobre a densidade mínima de redes de diferentes tipos de estações meteorológicas para diferentes zonas climáticas e geográficas. Adotou-se o critério mais simples e preciso para tal zoneamento, o que considera como fator de maior relevância as variações espaciais e sazonais das precipitações, ponderando ainda sobre fatores demográficos, tipos climáticos e relevo (WMO, 1994).

O zoneamento da densidade de estações para uma rede mínima pode ser resumido em seis tipos de regiões fisiográficas: zonas costeiras; zonas montanhosas; planícies interiores; zonas escarpadas/onduladas; pequenas ilhas; e

zonas polares e áridas. Em cada região fisiográfica, a densidade da rede varia em função do tipo de dado coletado em estações climatológicas e hidrométricas e, ainda, em função dessas apresentarem capacidade de registro automático dos dados (Tabela 3) (WMO, 1994).

Tabela 3 – Densidade mínima recomendada de estações pluviométricas em função da precipitação.

| Unidade fisiográfica       | Densidade mínima de estações<br>(superfície em km <sup>2</sup> /estação) |              |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
|                            | Não registradora                                                         | Registradora |
| Zonas costeiras            | 900                                                                      | 9.000        |
| Zonas montanhosas          | 250                                                                      | 2.500        |
| Planícies interiores       | 575                                                                      | 5.750        |
| Zonas escarpadas/ondulares | 575                                                                      | 5.750        |
| Pequenas ilhas             | 25                                                                       | 250          |
| Zonas urbanas              | -                                                                        | 10 a 20      |
| Zonas polares e áridas     | 10.000                                                                   | 100.000      |

Fonte: (WMO, 1994).

Em síntese do tema “densidade de redes”, discorrido pela WMO, conclui-se que a disposição, distribuição e densidade na rede de estações devem objetivar a obtenção de amostras representativas, de tal forma que seja possível inferir por métodos geoestatísticos a caracterização da variabilidade espacial da variável de interesse com incertezas associadas sob um erro admissível. Estas estações devem ser suficientes para permitir a gestão e maximização dos recursos hídricos em escala das necessidades ambientais e do desenvolvimento econômico regional.

No intuito de vislumbrar as possíveis respostas de espacialização das variáveis climáticas, em função das características quantitativas da rede de estações, optou-se por avaliar a influência de sua densidade nas condições atuais da área de estudo, adotando-se a variável precipitação para isso, por essa ser a de maior variabilidade espacial e temporal e também a de maior disponibilidade na área de estudo, a essa, considerou-se a distância mínima entre estações onde ainda há correlação espacial, utilizando-se o “alcance” do semivariograma do método de Krigagem Ordinária para isso.

Os procedimentos para obtenção da densidade das estações pluviométricas encontram-se descritos no Apêndice A.

Todos os dados geográficos utilizados foram configurados em conformidade com o sistema de referência geocêntrico padrão, ou seja, o SIRGAS 2000. Todas as feições de arco-nó-polígono e *raster* foram convertido para os formatos *File*

*GeoDatabase Feature Class* e *File GeoDatabase Raster Dataset*, respectivamente. Ressalta-se que todos os procedimentos geotecnológicos foram feitos com uso do programa ArcGIS®, versão 10.2.19.

#### 4.2.2 Obtenção dos parâmetros de solo

O mapa de solo exigido pelo modelo deve apresentar uma configuração temática específica, com composição de classes características de suas propriedades edáficas, em formato matricial, na resolução espacial do MDE. Mesmo que não haja conformação contínua, e a transição de uma classe para outra seja abrupta, é exigido para cada uma das células de grade desse mapa os parâmetros edáficos mínimos de entrada para execução do modelo hidrológico (Tabela 4).

Tabela 4 – Variáveis pedológicas exigidas pelo modelo DHSVM.

| <b>Símbolo</b> | <b>Variáveis</b>                                                                        | <b>Unidade</b>  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $K_s$          | Condutividade hidráulica saturada lateral na superfície                                 | $m\ s^{-1}$     |
| $f$            | Coefficiente para a variação da condutividade lateral com a profundidade do solo        | m               |
| $I_M$          | Taxa máxima de infiltração                                                              | $m\ s^{-1}$     |
| $\alpha_s$     | Albedo da superfície do solo                                                            | $m\ s^{-1}$     |
| $K$            | Número de camadas do solo                                                               | camadas         |
| $\phi$         | Porosidade do solo (valores no intervalo 0 - 1)                                         | $cm^3\ cm^{-3}$ |
| $m$            | Índice de distribuição de tamanho de poros (K valores)                                  | -               |
| $\Psi_b$       | Pressão à qual o ar entra no solo ("bubbling pressure") (K valores)                     | -               |
| $\theta_r$     | Umidade residual do solo (K valores no intervalo 0 - $\phi$ )                           | %               |
| $\theta_c$     | Capacidade de campo no potencial mátrico de 10 kPa (K valores no intervalo 0 - $\phi$ ) | $cm^3\ cm^{-3}$ |
| $\theta_{wp}$  | Ponto de murcha no potencial mátrico de 1500 kPa (K valores no intervalo 0 - $\phi$ )   | $cm^3\ cm^{-3}$ |
| $D_a$          | Densidade aparente do solo (K valores)                                                  | $kg\ m^{-3}$    |
| $K_v$          | Condutividade hidráulica saturada na vertical (K valores)                               | $m\ s^{-1}$     |

No Brasil, estudos detalhados de hidrologia dos solos, têm sido realizados somente em escalas muito limitadas, devido às dificuldades e elevado custo de obtenção dos dados necessários para uma simulação realística dos processos que integrem a interface solo-atmosfera. No entanto, o país possui um levantamento exploratório em uma base pedológica com propriedades físicas, químicas e hidráulicas em basicamente dois repositórios: Brasil (1983, 1987) e EMBRAPA (1978), respectivamente referentes ao projeto RADAMBRASIL e ao levantamento de

reconhecimento dos solos do estado do ES. Portanto, o meio mais simples e prático, e menos oneroso, atualmente disponível para estimar parâmetros hidráulicos do solo, exigidos por modelos hidrológicos em meso e macro escala, é sem dúvida o uso de funções de pedotransferência (FPT) (TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000).

A análise e seleção dos dados de solo, para a área de estudo e circunvizinhas, foi realizada mediante exaustiva revisão bibliográfica. Porém, à incompatibilidade na disponibilidade dos parâmetros do solo dentre as referências bibliográficas, e ausência de georreferenciamento de muitos perfis, muitas das fonte e perfis pouco úteis. As principais bases de dados adotadas no estudo foram obtidas de levantamentos exploratórios de projetos nacionais, com complementação a partir de estudos locais (Tabela 5). Em comparação a essa substancial carência de estudos para um levantamento em nível detalhado de atributos do solo, o número de perfis obtidos foi considerado satisfatório.

Tabela 5 – Fontes bibliográficas e, total de perfis de solo obtido em cada uma.

| <b>Pré-Seleção</b> | <b>Perfis remanescentes</b> | <b>Fonte bibliográfica</b> |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 4                  | 1                           | Embrapa (2000)             |
| 6                  | 2                           | Brasil (1970)              |
| 63                 | 24                          | Embrapa (1978)             |
| 1                  | 0                           | Faria et al. (2009)        |
| 1                  | 1                           | Krohling et al. (2010)     |
| 1                  | 0                           | Magnato et al. (2010)      |
| 12                 | 8                           | Brasil (1983)              |
| 32                 | 2                           | Brasil (1987)              |
| 5                  | 5                           | WSP (2013)                 |

Aqueles perfis em que se dispunha apenas da descrição de localização por referências de lugares, tiveram suas coordenadas geográficas obtidas mediante minuciosa busca remota. Para tanto, adotou-se uma base de dados com feições topológicas de arco-nó-polígono, fotografias aéreas ortorretificadas e parâmetros topográficos (Tabela 6), além de software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e ferramentas com serviços de pesquisa e visualização de mapas e localidades na web (*Google Earth* e *Google Maps*).



Tabela 6 – Recursos para georreferenciamento dos perfis pedológicos.

| Shape                         | Feição   |
|-------------------------------|----------|
| Áreas urbanizadas             | Polígono |
| Classes de solo               | Polígono |
| Corpos de água                | Polígono |
| Limites de bairros            | Polígono |
| Limites de comunidades        | Polígono |
| Municípios                    | Polígono |
| Uso do solo                   | Polígono |
| Arruamentos                   | Arco     |
| Cursos de água                | Arco     |
| Curvas de nível               | Arco     |
| Trechos rodoviários           | Arco     |
| Vias interurbanas             | Arco     |
| Pontes                        | Arco     |
| Localidades                   | Nó       |
| Declividade                   | Raster   |
| Elevação                      | Raster   |
| Fotos aéreas ortorretificadas | Raster   |

Tomasella, Hodnett e Rossato, (2000), em possível consideração a essa carência de informações pedológicas, desenvolveram uma FPT para os solos brasileiros, que estima os parâmetros da equação de van Genuchten (Equação 2), para o cálculo da curva de retenção de água no solo.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|\Psi|)^n\right]^\sigma} \quad (2)$$

em que:

$\theta$ : conteúdo volumétrico de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$ : conteúdo de água saturado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$ : conteúdo de água residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$|\Psi|$ : valor absoluto do potencial matricial (kPa);

$\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $n$  e  $\sigma$ : parâmetros empíricos da equação.

Van Genuchten (1980, citado por TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000), considera que  $n$  e  $\sigma$  são parâmetros de forma, assumindo que  $\sigma = 1 - 1/n$ . Segundo Maidment (1993), os parâmetros empíricos da Equação 2 apresentam correspondência com parâmetros físicos do solo, onde:

$$n = m + 1;$$

$$\alpha = \Psi_b \text{ (pressão de entrada do ar no solo ("bubbling pressure"))}; e$$

$$\sigma = 1/(m + 1) \text{ (corresponde ao índice de distribuição de tamanho de poros).}$$

Tomasella, Hodnett e Rossato, (2000) utilizaram diversas técnicas de regressão linear para adequar os parâmetros da equação de Van Genuchten com atributos do solo de fácil aquisição e mais fortemente difundidos na literatura, e após a análise dos pressupostos fundamentais e correção das inadequações, chegaram ao seguinte resultado (Equação 3):

$$X_i = a_{i,1} + a_{i,2}A_g + a_{i,3}A_f + a_{i,4}S + a_{i,5}A + a_{i,6}C_o + a_{i,7}U_e + \dots \quad (3)$$

$$\dots + a_{i,8}D_g + a_{i,9}A_gA_f + a_{i,j}SA + a_{i,j}A_g + \dots + a_{i,n}S^2$$

em que:

$X_i$  = parâmetro estimado da equação de van Genuchten;

$i = 1, 2, 3$  e  $4$  correspondem a  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_s$  e  $\theta_r$ , respectivamente, ou ao seu logaritmo natural (apenas para  $\alpha$  e  $n$ );

$A_g$  = areia grossa (2-0,2 mm) (%);

$A_f$  = areia fina (0,2-0,05 mm) (%);

$S$  = silte (0,05-0,002 mm) (%);

$A$  = argila (<0,002 mm) (%);

$C_o$  = C orgânico (%);

$U_e$  = umidade equivalente ( $g\ g^{-1}$ );

$D_g$  = densidade global (aparente) ( $g\ cm^{-3}$ );

$a_{i,j}$  ( $j = 1, \dots, n$ ) coeficientes derivados por regressão linear múltipla.

Portanto, de posse dos respectivos atributos do solo estimados pela Equação 2, torna-se possível obter os parâmetros da equação de van Genuchten. Os autores, em consciência do fato de muitas fontes não disporem de todos estes atributos edáficos, com ausência especialmente de dados de densidade e umidade equivalente, elaborou a FPT em diferentes níveis (Anexos A e B), de forma a possibilitar a estimativa desses parâmetros sob quatro circunstâncias:

1. Inclusão de todos os sete atributos do solo ( $A_g$ ,  $A_f$ ,  $S$ ,  $A$ ,  $C_o$ ,  $U_e$ ,  $D_g$ );
2. Exclusão apenas da densidade global ( $A_g$ ,  $A_f$ ,  $S$ ,  $A$ ,  $C_o$ ,  $U_e$ );
3. Exclusão apenas da umidade equivalente ( $A_g$ ,  $A_f$ ,  $S$ ,  $A$ ,  $C_o$ ,  $D_g$ );
4. Exclusão tanto da densidade global como da umidade equivalente ( $A_g$ ,  $A_f$ ,  $S$ ,  $A$ ,  $C_o$ ).

Como já era previsto, ocorreram perfis do solo com horizontes contendo informações incompletas ou mesmo ausentes de densidade global e/ou umidade equivalente. Assim, o ajuste das equações foi realizado com uso dos quatro níveis disponíveis de FTPs.

Pela equação de van Genuchten (1980, citado por TOMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000), foi possível obter o índice de distribuição do tamanho de poros, a porosidade, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a umidade residual e a pressão na qual o ar entra no solo.

Devido às diferentes fundamentações e ampla discussão bibliográfica do tema potencial matricial para estimação da capacidade de campo, amparou-se nas conclusões obtidas por Reichardt (1988), para definição do potencial matricial de -10 kPa para o cálculo da capacidade de campo.

Para alguns perfis com ausência da variável  $C_o$ , realizou-se sua estimação pelo fator de Van Bemmelen, o qual corresponde a 1,724, sob o pressuposto que, em média, a Matéria Orgânica do solo ( $M_o$ ) contém 58% de C. Dessa forma, o teor de  $M_o$  é dado pelo produto do teor de argila pelo fator de Van Bemmelen. De forma proporcionalmente inversa, o teor de  $C_o$  foi obtido pela razão entre a  $M_o$  e o fator de Van Bemmelen, porém, sob consciência de que não há nenhuma evidência de que um único valor do fator seja apropriado para todos os solos (PÉRIE; QUIMET, 2007).

A condutividade hidráulica em solo saturado foi calculada pela FPT desenvolvida por Saxton e Rawls (2006) (equações 4 a 6), com coeficientes ajustados por Bernardes (2010) (Equação 7) para se adequar aos solos do Norte Fluminense, sendo esta, a área de maior proximidade da unidade de estudo com equação ajustada disponível. O valor de  $K_s$  foi assumido inicialmente igual ao valor de  $K_v$  da primeira camada de solo, partindo do pressuposto da ocorrência de uma camada isotrópica.

$$K_s = 1.930(\theta_s - \theta_c)^{3-\lambda} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{B} \quad (5)$$

$$B = \left[ \ln(1.500) - \frac{\ln(33)}{\ln\theta_c} - \ln\theta_{wp} \right] \quad (6)$$

$$K_s = 1.633,674(\theta_s - \theta_c)^{1,715169-\lambda} \quad (7)$$

em que:

$K_s$  = Condutividade hidráulica saturada lateral na superfície ( $\text{mm h}^{-1}$ );

$\lambda$ ,  $B$  = coeficientes da curva de retenção de água no solo;

$\theta_s$  = umidade de saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{c-33}$  = umidade volumétrica no potencial mátrico de -33 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{wp}$  = umidade volumétrica no potencial mátrico de -1.500 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

O valor da variação de  $K_s$  com a profundidade foi obtido da Equação 8 (MORAES et al., 2003), que calcula o decaimento exponencial da condutividade hidráulica com a profundidade do solo. Para isso, foi necessário o isolamento do fator “f” dessa equação, tendo-se como resultado a Equação 9. A variável “f” foi obtida pela média entre a segunda e terceira camadas do solo.

$$K_{s(z)} = K_{sSup} \exp(-fz) \quad (8)$$

em que:

$K_{s(z)}$  = condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{m h}^{-1}$ ) numa determinada profundidade  $z$ ;

$K_{sSup}$  = condutividade hidráulica da primeira camada do solo (camada superficial) ( $\text{m h}^{-1}$ );

$f$  = fator de decaimento ( $\text{m}^{-1}$ ) de  $K_s$  com a profundidade  $z$ .

$z$  = profundidade (espessura) das camadas do solo (m).

$$f = \frac{\ln K_{sSup}}{z} - \frac{\ln K_{s(z)}}{z} \quad (9)$$

Para o preenchimento dos valores faltantes de densidade global do solo, nos perfis considerados, para cada uma das três camadas, foram comparadas quatro FPTs (Tabela 7; equações 10 a 13), obtidas de Benites et al. (2007).

Considerando o fato de que propriedades do solo, como o  $C_o$ , conteúdo de argila e soma de bases, são facilmente obtidos em levantamentos de solos no Brasil

e são variáveis que refletem a matéria orgânica, textura e fertilidade, Benites et al. (2007) desenvolveu uma FTP simplificada para cálculo da densidade do solo (Tabela 7; Equação 14).

Pelo fato da função referente à Equação 13 ter sido desenvolvida com um número relativamente alto de parâmetros, resultou conseqüentemente na indisponibilidade de alguns desses em um pequeno número dos perfis selecionados. Para estes casos particulares foi adotada a equação simplificada, que é dependente apenas da argila,  $C_o$  total e soma de bases (Equação 14).

Tabela 7 – Modelos de estimação da densidade do solo.

| Equação | Número de observações | Fonte                                       |
|---------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 10      | 323                   | Bernoux et al. (1998)                       |
| 11      | 613                   | Tomasella, Hodnett e Rossato, (2000)        |
| 12      | 19.651                | Manrique e Jones (1991)                     |
| 13      | 1.002                 | Benites et al. (2007) (modelo completo)     |
| 14      | 1.396                 | Benites et al. (2007) (modelo simplificado) |

$$D_g = 1,524 - 0,0046(\%A - 0,051(\%C_{ot})) - 0,0045(\text{pH}_{\text{água}}) + 0,001(A_t) \quad (10)$$

$$D_g = 1,578 - 0,054(\%C_{ot}) - 0,006(\%S) - 0,004(\%A) \quad (11)$$

$$D_g = 1,660 - 0,318(\%C_{ot})^{0,5} \quad (12)$$

$$D_g = 1,66141 - 0,12455N - 0,00042A + 0,10622SB - 0,00059\text{Fe}^2\text{O}^3 - 0,00328C : N + \dots \\ \dots + 0,00011A_{da} + 0,00041\text{Al}^2\text{O}^3 - 0,09597(\text{Ca} + \text{Mg}) \quad (13)$$

$$D_g = 1,56 - 0,0005A - 0,01C_{ot} + 0,0075SB \quad (14)$$

em que:

$D_g$  = Densidade global ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$A_t$  = Areia total ( $\text{g kg}^{-1}$ );

$C_{ot}$  = Carbono orgânico total ( $\text{g kg}^{-1}$ );

SB = Soma de bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , e  $\text{K}^+$ ) ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ );

$A_{da}$  = Argila dispersiva em água ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

Por grande parte dos perfis de solo dispor de medições de densidade, optou-se por avaliar e comparar os resultados de predição das FPTs. Para tanto, os índices de validação foram os mesmos que os adotados por Benites et al. (2007), sendo estes: o erro médio de predição (EMP), o desvio padrão do erro de predição (DPEP) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME) (equações 15 a 17).

$$\text{EMP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (15)$$

$$\text{DPEP} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(\hat{Y}_i - Y_i) - \text{EMP}]^2} \quad (16)$$

$$\text{RQME} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (17)$$

A indisponibilidade de dados medidos, a impossibilidade de medições diretas em campo e a complexidade de obtenção da variável foram os principais fatores que impossibilitaram a aquisição de valores de  $I_M$ . Dessa forma, por se tratarem de solos com propriedades hidráulicas médias semelhantes (Tabela 8), decidiu-se por definir  $I_M$  média das classes de pedopaisagens como proporcionalmente correspondentes àquelas encontradas por Cecílio et al. (2013). Ressalta-se, porém, que, apesar dos pressupostos utilizados para o preenchimento da lista das variáveis do modelo, tais valores foram posteriormente ajustados com procedimentos de calibração quando o modelo apresentou-se sensível ao mesmo.

Tabela 8 – Regiões com propriedades hidráulicas médias semelhantes.

| Variáveis         | Média |         | Desvio Padrão |         | Coeficiente de Variação |         |
|-------------------|-------|---------|---------------|---------|-------------------------|---------|
|                   | Autor | Cecílio | Autor         | Cecílio | Autor                   | Cecílio |
| $K_s (x 10^{-5})$ | 2,4   | 3,2     | 0,9           | 0,3     | 36,89                   | 10,52   |
| $\theta_s$        | 0,50  | 0,54    | 0,03          | 0,004   | 5,39                    | 0,65    |
| M                 | 0,45  | 0,40    | 0,05          | 0,00    | 11,50                   | 0,00    |
| $D_a$             | 1,26  | 1,06    | 0,07          | 0,01    | 5,31                    | 0,94    |
| $D_r^*$           | 2,60  | 2,29    | 0,00          | 0,00    | 3,75                    | 0,00    |
| $\Psi_b$          | 7,82  | 8,97    | 4,24          | 0,23    | 54,25                   | 2,58    |

\*Densidade real do solo.

O albedo da superfície do solo foi obtido para os polígonos da classe de uso e cobertura do solo, referente ao solo exposto, calculado segundo a metodologia de Allen, Tasumi e Trezza (2002), em imagens orbitais do satélite Landsat TM, descrito no Tópico 4.2.3.4, das quais se obteve, por zoneamento estatístico, o valor médio para cada classe de pedopaisagem, para cada mês analisado, sendo calculada, em seguida, a média dos dados mensais.

O DHSVM é um modelo de múltiplas camadas do solo; porém, faz-se necessário que aqueles perfis presentes em um determinado tipo de classe de solo apresentem número igual de camadas, possibilitando a obtenção de valores médios dentro de cada profundidade (horizonte) para as respectivas classes. Dos perfis observados, houve uma grande variação em relação ao número de camadas, com uma amplitude de até sete horizontes, implicando assim na necessidade da padronização desses em igual número. Na literatura, tem-se comumente utilizado três camadas de solo para todas as classes, o que julgou ser um total satisfatório, fundamentalmente pela predominante ocorrência de três tipos de horizontes principais nos perfis observados, A, B e C. Para esta padronização, procedeu-se conforme descrito no Apêndice B.

#### 4.2.3 Obtenção dos parâmetros de vegetação

Semelhantemente ao mapa de solos, o modelo é executado com um conjunto de parâmetros de uso e cobertura do solo, no qual em cada célula de grade deve ser contemplada uma determinada classe e seus respectivos parâmetros.

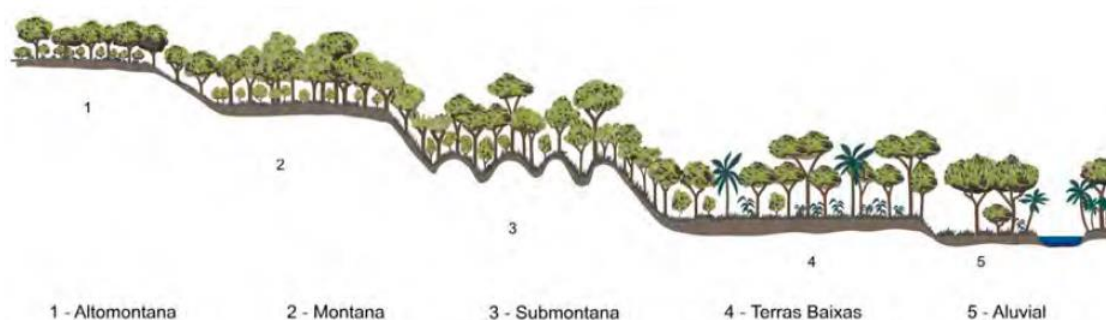
O mapa de uso e cobertura do solo foi disponibilizado pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente – IEMA, fotointerpretado em imagens aéreas ortorretificadas com grid de espaçamento de 1 m<sup>2</sup>, obtidas de um aerolevante ocorrido entre os anos de 2007 e 2008. Tal mapa possui distinção de 25 classes, compreendendo cultivos agrícolas, silviculturais, corpos d'água, exploração mineral, afloramento rochoso, formações vegetais, área urbanizada e solo exposto.

O termo “distribuído”, usado na categorização do modelo, representa explicitamente que a variabilidade espacial das variáveis de entrada ocorre em nível de células de grade de igual tamanho. Alguns dos produtos matriciais certamente

apresentam uma variação contínua no espaço, onde cada elemento está associado a um valor numérico (com valores atribuídos em pontos flutuantes ou ocasionalmente inteiros), dos quais citam-se o MDE e a profundidade do solo. Já outros produtos, apesar de se encontrarem em formato matricial, apresentam distribuição do tipo discreta no espaço (dados temáticos, categóricos, ou descontínuos), como por exemplo, uso e cobertura do solo, tipo de solo e declividade.

Quando se compara as formações vegetais naturais (Figura 5) com outras classes vegetacionais de uso do solo, como cultivos agrícolas e silviculturais, pode-se dizer que a primeira apresenta variações muito mais expressivas por influência do gradiente altitudinal do terreno que as demais. Assim, a compartimentação de coberturas do solo, como a classe floresta nativa, aumenta o nível de detalhamento das classes do mapa usado no modelo, promovendo uma representação mais realística das condições da área estudada.

Figura 5 – Perfil esquemático da Floresta Ombrófila Densa.



Fonte: Veloso, Rangel e Lima, (1991).

O gradiente altitudinal presente na bacia do rio Jucu é altamente expressivo, com amplitude absoluta na ordem de 1.898 m, o que certamente influencia na variação do sistema fisionômico-ecológico da vegetação. No Manual Técnico da Vegetação Brasileira, o tipo vegetacional Floresta Ombrófila Densa é subdividido em cinco formações ordenadas hipsometricamente, condicionando fisionomias diferentes em função da localização latitudinal, com base nas variações das faixas altimétricas pela taxa de lapso de altitude, com variação negativa de 1 grau para cada 100 m acima de um nível referencial. No intuito de captar esta variação, as classes de mata nativa, mata nativa em estágio inicial de regeneração e campo rupestre/altitude foram reclassificadas em Floresta Ombrófila Densa (Floresta



Tropical Pluvial) (IBGE, 2012).

Em contrapartida ao aumento no detalhamento das classes de uso e cobertura do solo, é indispensável levar em consideração a escala e resolução das fontes matriciais de dados, as técnicas que serão adotadas para extrair essas informações e, acima de tudo, a disponibilidade das mesmas para cada classe temática.

As variáveis vegetacionais exigidas pelo modelo (Tabela 9) são de complexa obtenção. Devido à carência de pesquisas, tais variáveis encontram-se muitas vezes disponíveis apenas em âmbito regional e, em alguns casos, somente em escala global. Em decorrência da análise das fontes de dados, concluiu-se ser necessário realizar adequações nas classes de uso do solo, para possibilitar a aquisição de informações das respectivas fontes. Para tanto, adotou-se o procedimento descrito no Apêndice C.

Tabela 9 - Variáveis vegetacionais exigidas pelo modelo DHSVM.

| <b>Símbolo</b>   | <b>Variáveis</b>                                                                                                | <b>Unidade</b> |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| c                | Fração de cobertura do dossel superior                                                                          | adm.*          |
| $h_T$            | Distância desde o solo até o início da copa das árvores (0 – 1, fração da altura total da vegetação, J valores) | adm.           |
| $n_a$            | Coefficiente de atenuação aerodinâmica do dossel                                                                | adm.           |
| $K_b$            | Coefficiente de atenuação da radiação (coeficiente de extinção)                                                 | adm.           |
| h                | Altura da vegetação (dossel superior e inferior)                                                                | m              |
| $r_{smax}$       | Máxima resistência dos estômatos para cada camada de vegetação (para cada camada de vegetação)                  | $s\ m^{-1}$    |
| $r_{smin}$       | Mínima resistência dos estômatos (para cada camada de vegetação)                                                | $s\ m^{-1}$    |
| $\theta^*$       | Limiar de umidade do solo (0 – 1) acima do qual as condições do solo não restringem a transpiração              | adm.           |
| $e_m$            | Limiar de déficit de pressão de vapor acima do qual os estômatos fecham (para cada camada de vegetação).        | Pa             |
| $R_{pc}$         | Fração da radiação de onda curta que é fotossinteticamente ativa (para cada camada de vegetação)                | $W\ m^{-2}$    |
| K                | Número de zona de raízes (igual às camadas do solo)                                                             | unidade        |
| d                | Profundidade das zonas de raízes, equivalente à espessura da camada do solo (para cada camada de solo)          | m              |
| $f_{rO}$         | Fração de raízes do dossel superior (“overstory”) (para cada camada de solo)                                    | adm.           |
| $f_{rU}$         | Fração de raízes do dossel inferior (“understory”) (para cada camada de solo)                                   | adm.           |
| IAF <sub>O</sub> | Índice de área folhar mensal para o dossel superior (jan – dez)                                                 | adm.           |
| IAF <sub>U</sub> | Índice de área folhar mensal para o dossel inferior (jan – dez)                                                 | adm.           |
| $\alpha_O$       | Albedo mensal do dossel superior (jan – dez)                                                                    | adm.           |
| $\alpha_U$       | Albedo mensal do dossel inferior (jan – dez)                                                                    | adm.           |

\*Termo “adimensional” abreviado.

Nos itens subsequentes são descritos os procedimentos relativos à obtenção dos dados contidos da Tabela 9. As demais variáveis de vegetação, seus diferentes métodos de obtenção e respectivas fontes estão descritas no Apêndice F.

#### 4.2.3.1 Fração de cobertura do dossel superior

O produto Terra MODIS *Vegetation Continuous Fields* (VCF) – MOD44B é uma estimativa da densidade da cobertura vegetal em escala global. Foi projetado para representar continuamente a superfície terrestre como uma proporção dos traços básicos de vegetação, fornecendo a quantificação da variação da cobertura arbórea, não-arbórea e solo exposto, em percentagem.

Por apresentar continuidade temporal e alta resolução espacial (em referência a escala a qual é medido), o produto MOD44B é amplamente utilizado em modelagem ambiental e aplicações de monitoramento. Por se tratar de um dado de livre acesso, distribuição espacial contínua, e boa resolução espacial, optou-se por esse produto para o cálculo da variável “c”, adotando o método descrito no Apêndice D.

#### 4.2.3.2 Fração de raízes

Segundo Maidment (1993), o  $\theta^*$ , pode ser obtido em função da capacidade de campo, variando entre 50 a 80% dessa. O  $\theta^*$  foi calculado, para as três camadas de profundidade do solo, de cada uma das classes de pedopaisagens, como sendo no mínimo correspondente ao limite superior da taxa de variação da  $\theta_c$ , pois valores inferiores a 80% aumentaram consideravelmente o número de observações abaixo do valor correspondente ao  $\theta_{wp}$ . Para os casos em que mesmo sob as pré-condições estabelecidas mantiveram o valor inferior a variável  $\theta_{wp}$ , definiu-se o próprio valor desta variável como correspondente a  $\theta^*$ . Como se trata de uma variável de valor unitário de uma classe de vegetação dentro das respectivas classes de solo, ou seja, não é considerada ao nível de subcamadas, sua estimação

foi feita por média ponderada para cada extrato de cobertura vegetal (dossel superior e sub-bosque), adotando como peso de ponderação a variável fração de raiz.

As profundidades de cada camada do solo foram obtidas pela média das profundidades dos perfis localizados em cada classe de pedopaisagem e nas classes adjacentes, com intuito de suavizar mudanças bruscas entre as mesmas e ter maior representatividade média quanto ao número de observações.

Devido à complexidade de obtenção da profundidade das raízes nas seções subterrâneas do solo, as frações de raízes do dossel superior ( $f_{ro}$ ) e inferior ( $f_{ru}$ ) foram obtidas de fontes bibliográficas e, em sua maioria, de levantamentos indiretos. Nogueira, (2013) calculou os valores ponderados do estoque de carbono pela profundidade do solo, tanto em fragmento florestal conservado quanto em restauração, a uma profundidade limite de 100 cm. Para extrapolação desse limite, ajustou-se uma regressão logarítmica para calcular esta variável acumulada em maiores profundidades, a que permitiu também a estimativa de valores nos intervalos pré-definidos em cada espessura das camadas do solo. Tomando-se como referência os perfis do levantamento do projeto RADAM Brasil, calculou-se a média dos valores máximos dos horizontes mais profundos com a presença de raízes, exclusivamente dos perfis localizados em áreas que apresentavam como uso atual, as formações florestais nativas, estabelecendo-se, portanto, o limiar médio do comprimento máximo de raízes para esta classe de cobertura do solo.

A  $f_r$  do cafeeiro foi obtida de Barreto et al. (2005), da média de seis tratamentos de adubação e irrigação com plantas de cinco anos de idade. Como a proporção da densidade de raízes abaixo de 1,5 metros de profundidade foi insignificante, a mesma foi desconsiderada a partir da segunda camada.

Devido à generalização do uso do gênero *Brachiaria* sp. como principal tipo de gramínea adotada em pastagens brasileiras, optou-se por este gênero para a determinação da profundidade do sistema radicular, em função da densidade da massa seca radicular total (raízes grossas, média e finas), por meio de regressão exponencial obtida por Costa et al. (2000) Já para a determinação da  $f_r$  para a classe eucalipto, utilizou-se a média resultante de regressões potenciais ajustadas para duas espécies de eucalipto, calculadas por Grant et al. (2012), para estimar o total de unidades de raízes acumuladas por profundidade do solo, para duas espécies desse gênero.

#### 4.2.3.3 Índice de área foliar

A escolha da fonte de referência do Índice de Área Foliar (IAF), foi embasada na validação e intercomparação dos principais tipos de produtos globais de IAF derivados de sensoriamento remoto, realizadas por Garrigues et al. (2008). Dos critérios estabelecidos, as melhores performances foram dos produtos CYCLOPES e MODIS, com melhor distribuição global, consistência espacial e temporal (variações interanual e sazonal). Porém, durante a coleta de dados por sensores remotos, o CYCLOPES não leva em consideração a escala de representação da aglomeração da folhagem, que trata-se de um dos tipos de incerteza relacionada com a arquitetura da copa, o que induz a uma substancial subestimação do IAF real (CHEN et al., 1997). O MODIS, por sua vez, não apenas considera as escalas da paisagem como também a do dossel da vegetação. O produto MCD15A3, derivado do MODIS, composto do IAF e da Fração de Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida Pela Vegetação – FPAR, apresenta alta resolução espacial (com referência na escala de medição) e temporal, respectivamente de 1 km<sup>2</sup> e 4 dias (LP DAAC, 2011). No entanto o CYCLOPES, apresenta uma resolução temporal de 10 dias e dados disponível apenas para o período de 1999 a 2007 e 2010 a 2011 (WDC, 2013) até o presente momento. Por estes motivos, decidiu-se pelo uso dos produtos advindos do sensor MODIS.

O IAF foi calculado pelo processamento de 366 arquivos HDF-EOS (*Hierarchical Data Format - Earth Observing System*), dos quais se obteve a média mensal do período de 2009 a 2012 (período correspondente à série de dados climáticos), para cada classe de vegetação, adotando-se apenas as feições poligonais com dimensão igual ou superior ao tamanho mínimo do grid de espaçamento (1km<sup>2</sup>) para extração dos valores médios de IAF das respectivas classes. Procedimento semelhante foi adotado para obtenção da variável FPAR. No entanto, sua média foi calculada para o período histórico, dispensando-se a subdivisão mensal, já que o modelo não exige a variação temporal desta variável.

#### 4.2.3.4 Albedo

O albedo de cada classe de vegetação foi obtido pela metodologia proposta por Allen et al. (2002), com uso do *Surface Energy Balance Algorithms for Land – SEBAL*, aplicado às imagens TM – Landsat 5 e 7 (tabelas 10 e 11), obtidas do Earthexplorer, um dos serviços de acesso de dados do *Land Processes Distributed Active Archive Center – LP DAAC*, adotando-se o procedimento descrito no Apêndice E.

Devido a determinadas restrições qualitativas, como adensada presença de nuvens e inconsistência espacial, e por descontinuidade temporal na disponibilidade de imagens TM – Landsat foi necessário um abrandamento quanto ao rigor na seleção das mesmas. Para o período de simulação do DHSVM, correspondente a 4 anos, permitiu-se uma extrapolação de aproximadamente  $\pm 2$  anos, visando selecionar 12 imagens, uma para cada mês (janeiro a dezembro) neste período, para os sensores TM Landsat 5 e 7, em função da disponibilidade e melhor qualidade das mesmas em cada sensor.

Tabela 10 – Imagens captadas pelo TM – Landsat 5 e 7, utilizadas na determinação do albedo para as classes de uso e cobertura do solo.

| <b>Código da Imagem</b> | <b>Mês de referência</b> | <b>Ano de aquisição</b> |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| LE72160742013007CUB00   | Janeiro                  | 2013                    |
| LT52160742011042CUB00   | Fevereiro                | 2011                    |
| LT52160742009068CUB00   | Março                    | 2009                    |
| LT52160742009116CUB00   | Abril                    | 2009                    |
| LT52160742007127CUB00   | Maior                    | 2007                    |
| LT52160742007175CUB01   | Junho                    | 2007                    |
| LT52160742007191CUB01   | Julho                    | 2007                    |
| LT52160742008242CUB00   | Agosto                   | 2008                    |
| LT52160742007271CUB00   | Setembro                 | 2007                    |
| LT52160742009276CUB00   | Outubro                  | 2009                    |
| LT52160742009324CUB00   | Novembro                 | 2009                    |
| LE72160742006356EDC00   | Dezembro                 | 2006                    |

Tabela 11 – Descrição dos canais do TM - Landsat 5 e 7, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima - a e máxima - b), irradiâncias espectrais no topo da atmosfera ( $ESUN_{\lambda}$ ) e coeficientes de regressão linear de cada banda para o cômputo do albedo no topo da atmosfera (TOA).

| Bandas         | Faixa espectral ( $\mu\text{m}$ ) | Coeficientes de calibração ( $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) |       |        |       | $ESUN_{\lambda}$ ( $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ) |       | $w_{\lambda i}$ |       |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|-------|--------------------------------------------------------|-------|-----------------|-------|
|                |                                   | a                                                                               |       | b      |       | TM5                                                    | TM7   | TM5             | TM7   |
|                |                                   | TM5                                                                             | TM7   | TM5    | TM7   |                                                        |       |                 |       |
| 1 (Azul)       | 0,45 – 0,52                       | -1,52                                                                           | -6,2  | 193    | 191   | 1957                                                   | 1969  | 0,293           | 0,293 |
| 2 (Verde)      | 0,52 – 0,60                       | -2,84                                                                           | -6,4  | 365    | 196,5 | 1826                                                   | 1840  | 0,274           | 0,274 |
| 3 (Vermelho)   | 0,63 – 0,69                       | -1,17                                                                           | -5    | 264    | 152,9 | 1554                                                   | 1551  | 0,233           | 0,233 |
| 4 (IV Próximo) | 0,76 – 0,90                       | -1,51                                                                           | -5,1  | 221    | 241,1 | 1036                                                   | 1044  | 0,157           | 0,157 |
| 5 (IV Médio)   | 1,55 – 1,75                       | -0,37                                                                           | -1    | 30,2   | 31,06 | 215                                                    | 225,7 | 0,033           | 0,033 |
| 6 (IV Termal)  | 10,4 – 12,5                       | 1,238                                                                           | 0     | 15,303 | 17,04 | -                                                      | -     | -               | -     |
| 7 (IV Médio)   | 2,08 – 2,35                       | -0,15                                                                           | -0,35 | 16,5   | 10,8  | 80,67                                                  | 82,07 | 0,011           | 0,011 |

Fonte: ALLEN et al. (2002); CHANDER; MARKHAM (2003); GALVINCIO; CORRÊA; ARAÚJO, (2006).

A detecção e extração automática de sombras e nuvens das imagens TM – Landsat foi baseada na metodologia proposta por Polidório et al. (2005), fundamentado na extrapolação das diferenças na resposta radiométrica e atributos de cores das nuvens e sombras em contraste com as demais feições categóricas.

Para a correção do albedo da superfície, foi adotado o método de Allen (BASTIAANSEN, 2000). Apesar desse método não ser o que proporciona menor erro (SILVA et al., 2009) é o método que utiliza unicamente a variável altitude, representada pelo MDE, portanto, de prática aplicação, resultando em estimativas com precisão aceitável.

#### 4.3 MAPA DE CLASSES PEDOLÓGICAS

O mais recente mapeamento do solo do estado do ES (ESPÍRITO SANTO, 1978), e com melhor detalhamento, ainda encontra-se em uma escala grosseira (1:400.000) para estudos de micro e mesoescalas, foi necessária a elaboração de um melhor detalhamento de regiões da paisagem com características pedológicas semelhantes.

A topografia está fortemente relacionada com outras variáveis pedogenéticas, como material de origem, clima, atividade biótica, idade dos solos (JENNY, 1980 citado por ROMANO; CHIRICO, 2004), fluxo lateral de superfície e subsuperfície,

regime de temperatura e radiação solar incidente, dinâmica de vegetação, dinâmica temporal de umidade, entre outras. Esta se apresenta eficiente na avaliação da distribuição espacial e organização das propriedades pedológicas, já que a hidrologia e geomorfologia são processos motores na formação do solo. Portanto, as características do terreno são as variáveis ambientais mais comumente empregadas na complementação dos dados de solo, pois representam o comportamento hidráulico e as condições ambientais locais (ROMANO; CHIRICO, 2004).

Para melhor compreensão, as etapas de preparação da representação matricial de paisagens pedológicas, definidas aqui como pedopaisagens, foram subdivididas da seguinte forma:

- ✓ Aquisição dos dados para obtenção dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos;
- ✓ Elaboração dos parâmetros topográficos e climáticos pedogenéticos;
- ✓ Análise de componentes principais; e
- ✓ Classificação das pedopaisagem por isodata e máxima verossimilhança.

Estando os perfis pedológicos, obtidos para o cálculo dos atributos do solo, distribuídos ao longo da extensão territorial do sul do estado, foi necessária a criação do mapa de pedopaisagens com uma área bem superior a da unidade de estudo, fato que justificou o cálculo dos parâmetros topográficos e climáticos pedogenéticos para uma área que compreendeu no mínimo, todo o sul do estado. A metodologia utilizada para execução de cada uma das etapas é apresentada nos tópicos 4.3 a 4.3.4.

#### 4.3.1 Dados necessários para a elaboração do mapa de classes pedológicas

##### 4.3.1.1 Modelo digital de elevação (MDE)

Após uma análise prévia das alternativas de MDEs passíveis de uso, adotou-se o *Global Digital Elevation Model (GDEM2)*, oriundo do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, disponível gratuitamente na internet, desenvolvido em conjunto pela *U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e *Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI)*. O

ASTER GDEM2 é distribuído em formato GeoTIFF, com coordenadas geográficas no sistema *WGS-84* e unidade de medida vertical em metros.

Esse MDE trata-se da segunda versão do GDEM, com substanciais melhorias, apresentando uma precisão vertical de 17 metros (com 95% de confiança). O deslocamento horizontal foi reduzido para 0,23 pixels, com melhorias na resolução horizontal entre 71 e 82 metros. Apesar do conseqüente aumento de ruídos, o número de vazios e artefatos foi fortemente reduzido, e praticamente eliminado em algumas áreas (LP DAAC, 2011).

Optou-se pelo uso do MDE com estrutura de dados em grades regulares, com realização dos seguintes procedimentos de refinamento:

- ✓ Uso de técnicas de compressão e processamentos de dados geoespaciais, pela mudança da extensão de formato dos arquivos de dados, com a definição do tipo de compressão mais adequada;
- ✓ Remodelamento do terreno com acréscimo de informações topográficas e uso de algoritmos para o aprimoramento das feições de forma; e
- ✓ Uso de ferramentas de suavização de ângulos agudos para melhorar a qualidade cartográfica.

#### 4.3.1.2 Atributos topográficos

As informações básicas para análise topográfica do terreno foram obtidas por meio do MDE, através de derivações que apresentam forte significado na descrição de propriedades ambientais e processos ativos da paisagem. Aqueles atributos que podem ser obtidos imediatamente dessa fonte são classificados como atributos primários; porém, se associados a algum índice ou por combinação de dois ou mais atributos primários, serão denominados de atributos secundários (ROMANO; CHIRICO, 2004).

Os atributos primários e secundários para a classificação das pedopaisagens foram obtidos com base em Romano e Chirico, (2004), Florinsky et al. (2002) e Wilson e Gallant, (2000) conforme descrito no Apêndice G.



#### 4.3.1.3 Variáveis climáticas pedogenéticas

Tricart (1968), após análise dos fatores morfogenéticos e pedogenéticos, afirma que apenas os estudos litológicos, de forma isolada, são insuficientes para explicar o processo de formação dos solos, sendo necessária a consideração dos elementos climáticos. Ab'Sáber (1966) ressalta, ainda, que as paisagens tropicais só poderão ser compreendidas a partir de estudos climáticos, sendo este o fator exógeno que define a dinâmica das bases litológicas nesses ambientes.

Böhner e Selige (2006) utilizaram médias mensais e anuais de diferentes variáveis climáticas em um período de 30 anos (1961-1990) da *German Meteorological Network (DWD)* para predição espacial de atributos do solo adotando tanto atributos topográficos como regionalização climática. Estes autores argumentam que, partindo de um modelo teórico, o impacto sofrido pelas camadas ambientais exige uma integração de variáveis climáticas, o que permite, de forma mais casual, a obtenção de estimativas espaciais de parâmetros e padrões do solo.

Com base no exposto, optou-se por suplementar os fatores de formação do solo com as variáveis climáticas pedogenéticas precipitação e temperatura. Porém ressalta-se que como explicado por Böhner e Selige (2006), são parâmetros de uso casual, portanto busca-se por sua inclusão, considerar a possibilidade da promoção de um efeito positivo na identificação de padrões espaciais de parâmetros do solo quando submetidos a um critério de classificação, mesmo que sob pena de se ter uma representatividade apenas superficial do paleoclima regional.

Os dados meteorológicos foram obtidos do trabalho desenvolvido por Castro (2008), que utilizou séries históricas de um período de 30 anos (1977 – 2006) de variáveis climáticas em escala anual de tempo. Além daquelas estações inseridas no estado do Espírito Santo, o autor adicionou 16 postos pluviométricos, pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA), na região circunvizinha do estado, visando minimizar efeitos de borda em processos de espacialização dos dados, obtendo assim um total de 110 estações.

### 4.3.2 Parâmetros topográficos e climáticos pedogenéticos

#### 4.3.2.1 Cálculo dos atributos topográficos

O GDEM2 é disponibilizado em cenas individuais em um sistema de projeção global, o que implica na necessidade de um processamento de mosaicagem quando da necessidade do uso de mais de um produto, e transformação geográfica para o sistema de projeção local. O procedimento adotado para cumprir com estas condições encontra-se descrito no Apêndice H.

Erros sistemáticos, ou não, presentes em MDEs, podem induzir a sérias interpretações errôneas. Este problema tende a ser agravado em produtos obtidos das derivadas de primeira e segunda ordem, como por exemplo, a declividade, convexidade, aspecto, curvaturas plana e tangencial do perfil. Casos ainda mais críticos podem ocorrer pela derivação de atributos topográficos secundários, como Índice Topográfico de Umidade e Capacidade de Transporte de Sedimentos (MOORE et al. (1993) citado por WILSON e GALLANT, 2000).

A precisão dos parâmetros derivados da elevação do terreno depende não só da precisão dos dados iniciais, ou seja, do próprio MDE, mas também da precisão da técnica de cálculo adotada (FLORINSKY, 1998), portanto, maior atenção foi despendida nesses dois fatores de geração de erros.

Embora a correção ideal de anomalias seja pela reposição das cotas, é possível o tratamento da imagem por simples remoção dos erros e uso dos valores da vizinhança para o preenchimento dos dados ausentes por interpolação (VALERIANO; PICINI, 2003).

A metodologia adotada para remoção das anomalias presentes no GDEM2 foi realizada com as seguintes diretrizes (VALERIANO; PICINI, 2003).

- ✓ Identificação dos locais afetados;
- ✓ Eliminação das áreas de influência;
- ✓ Exportação das cotas altimétricas válidas; e
- ✓ Interpolação dos valores de cota.

Foram executados procedimentos básicos de geoprocessamento para a correção de possíveis valores atípicos presentes no MDE, por detecção de padrões de variação espacial com uso de filtro para destacar mudanças bruscas de altitudes

(Apêndice I).

Mediante a obtenção de um MDE consistente, realizou-se o cálculo dos atributos topográficos, descritos por Florinsky et al. (2002) e Wilson e Gallant (2000)

(Apêndice G)

Muitos são os softwares de análise de informações espaciais que apresentam pacotes de ferramentas para análises do terreno. Devido ao elevado número dos atributos que pode ser calculado pela topografia, nenhum desses softwares contempla a totalidade desses parâmetros topográficos. Logo, além do ArcGIS 10.2.19<sup>®</sup>, optou-se pelo uso do SAGA 2.1.0<sup>®</sup> e Whitebox 3.0.7<sup>®</sup>.

Visando conservar o MDE com suas características originais, quando possível, evitou-se o uso do preenchimento de depressões do terreno. Assim, apenas os atributos dependentes da continuidade espacial do fluxo de superfície foram estimados com o MDE livre de depressões, sendo estes: área de captação modificada, índice topográfico de umidade, índice de energia do fluxo, Comprimento do Caminho de Fluxo e Relevo Relativo. Os procedimentos para o cálculo dos atributos topográficos do terreno encontram-se descritos no Apêndice J.

#### 4.3.2.2 Cálculo dos atributos climáticos pedogenéticos

Neste tópico aborda-se a obtenção das variáveis climáticas temperatura e precipitação para o estado do ES, adotando-se para tal procedimento as médias anuais, oriundas de dados diários, das séries de 30 anos calculadas para 110 estações existentes no estado e áreas circunvizinhas, utilizadas no trabalho desenvolvido por Castro (2008).

##### 4.3.2.2.1 Temperatura

A construção de um modelo de regressão consiste em um processo iterativo de seleção de variáveis independentes, eficazes e explicativas de um fenômeno no

qual se busca sua modelagem para melhor compreensão, previsão de valores em locais desconhecidos e/ou exploração de hipóteses.

Ainda que a escolha das variáveis independentes do modelo de regressão seja oriunda de exaustiva revisão bibliográfica é indispensável o uso de índices diagnósticos eficazes para identificar, por meio de testes probabilísticos, as variáveis candidatas que apresentem melhor correspondência com a variável dependente.

Por não se dispor de estações meteorológicas suficientemente representativas na região de estudo, o valor médio anual de temperatura diária foi estimado a partir do ajuste da Equação 18, em função da altitude (efeito da variação de pressão), latitude (relação com irradiância global), e por julgar-se necessário, incluiu-se também a variável longitude (efeito da maritimidade e continentalidade) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), adotando-se o Mínimo Quadrado Ordinário (MQO) como a técnica de análise de regressão.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \text{Altitude} + \hat{\beta}_2 \text{Latitude} + \hat{\beta}_3 \text{Longitude} \quad (18)$$

Para espacialização da temperatura, pelo modelo de regressão linear múltipla, foi utilizados o MDE, consistido nas etapas anteriores, e camadas matriciais de latitude e longitude com valores em graus decimais.

Uma eficiente forma para validação da equação de regressão é avaliar a capacidade desse modelo em prever a variável dependente com uso de observação não adotada no cálculo dos coeficientes. Como em grande parte dos casos as observações são insuficientes para estimar o modelo proposto, este procedimento torna-se inviável (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

#### 4.3.2.2.2 Precipitação

O processo de reprodução espacial das características do fenômeno precipitação, baseado nos pontos amostrais (correspondentes às estações pluviométricas), foi realizado com uso do método de interpolação Krigagem Bayesiana Empírica (EBK). A decisão da escolha desse interpolador foi tomada com base em uma “Árvore de Classificação de Diferentes Métodos de Interpolação”

(ESRI, 2013). O método selecionado é um método geoestatístico que automatiza os aspectos de maior complexidade na construção de um modelo de krigagem válido.

Ao contrário dos demais métodos de krigagem que utilizam os mínimos quadrados ponderados para estimar os parâmetros do semivariograma, a EBK é um método de interpolação geoestatística que estima os parâmetros do semivariograma pela máxima verossimilhança restrita. (CHILÈS; DELFINER, 1999).

Através de processos de subdivisões e simulações, a EBK realiza a construção de um modelo de krigagem válido, automatizando os parâmetros mais complexos de ajuste do modelo de krigagem, além disso, realiza a escolha do algoritmo de mapeamento adequado e é capaz de lidar com as incertezas sobre a distribuição das observações e suas dependências espaciais (PILZ; SPÖCK, 2007).

As principais vantagens no uso da EBK são: requer mínima modelagem interativa, os erros padrão de previsão são mais precisos do que outros métodos de krigagem, permite previsões precisas de dados moderadamente não estacionários e é mais preciso do que outros métodos de krigagem para pequenos conjuntos de dados.

Os seguintes parâmetros de calibração manual mínimos, das propriedades gerais e de vizinhança de pesquisa foram ajustados pelo critério de tentativa e erro (CHILÈS; DELFINER, 1999):

- ✓ Tamanho do subconjunto: com referência no tamanho do conjunto de dados, estes são inicialmente subdivididos em subconjuntos de sobreposição de tamanho padrão igual a 100 pontos por subconjunto.

- ✓ Fator de sobreposição: representa o grau de sobreposição entre os modelos locais (subconjuntos), no qual cada ponto de entrada poderá cair em vários subgrupos, sendo o fator de sobreposição que define o número médio de subgrupos aos quais os pontos irão cair. Os valores típicos variam entre 0.01 e 5, de forma que maiores fatores promovem superfícies mais suaves.

- ✓ Número de simulações: especifica o número de semivariogramas que serão simulados para cada subconjunto.

- ✓ Ângulo: ângulo do círculo de pesquisa de um ponto, com propriedade de influenciar nos dados de vizinhança quando esta é subdividida em quatro ou mais setores ou por ajuste do tamanho dos semieixos do círculo. O tipo de setor com oito subdivisões apresenta amplitude de calibração correspondente à máxima 22,5°.

- ✓ Raio: distância em unidade de mapa, referente ao comprimento do raio do

círculo de pesquisa.

Os seguintes parâmetros foram definidos com base nas características naturais dos dados de entrada e com a finalidade de obter o *layer* geoestatístico de maior rigor qualitativo:

✓ Tipo de superfície de saída: quatro tipos de superfícies estão disponíveis nesta análise de técnica geoestatística, a predição, quantil, probabilidade e predição do erro padrão. Pelo objetivo do estudo escolheu-se a “predição” como tipo de superfície de saída.

✓ Transformação dos dados: em KBE uma das transformações disponível é a transformação “*multiplicative skewing normal score*” com escolha dos tipos de distribuição empírica ou log-empírica. A transformação com distribuição log-empírica é particularmente sensível a outliers, podendo criar superfície de previsão com valores de ordens de magnitude maior ou menor que os valores de entrada. Os pontos amostrais (estações pluviométricas) são representativos de uma distribuição espacial, de uma variável não estacionária, em uma região de grandes amplitudes de variações climáticas, pois se encontra sob efeito de maritimidade, continentalidade, relevo fortemente descontínuo topograficamente, restrito número de pontos amostrais, alocação aleatória e localização em amplo espaço territorial. Apesar da distribuição log-empírica ser adequada unicamente para dados positivos, como chuvas, a possível implicação resultante do uso desse tipo de transformação sobre as restrições impostas pelas características dos dados de entrada, não justificou a escolha da mesma, portando por obviedade escolheu-se a distribuição empírica para a transformação dos dados.

✓ Tipo de semivariograma: ao optar pela transformação dos dados, tornam-se disponíveis os modelos de semivariograma *exponential*, *exponential detrended*, *whittle*, *whittle detrended*, *k-bessel* e *k-bessel detrended*. Ao avaliar as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos, concluiu ser o método *k-bessel detrended* o ideal para o presente caso, pela maior flexibilidade, precisão e capacidade de remoção das tendências de primeira ordem.

✓ Tipo de vizinhança: define quais pontos circundantes serão utilizados para controlar os resultados de saída, sendo elas a circular padrão e suavização circular. No intuito de não adicionar tendências aos dados por influência na variação dos valores de pontos amostrais de vizinhança, e pela ausência do fator de suavização (*smoothing factor*) na lista de parâmetros disponíveis para calibração – que permite

avaliar a amplitude de variação sobre os dados de vizinhança – decidiu-se por não usar as técnicas de suavização para na estimativa dos dados.

✓ Tipo de setor: trata-se de uma feição circular que apresenta propriedades definidas pelos demais parâmetros de pesquisa de vizinhança (raio do círculo, número de setores, máximo e mínimo de vizinhos, etc.). Esta feição pode ser subdividida em quatro setores com quadrantes de mesmas dimensões, em quatro setores permitindo 45° de deslocamento ou ainda em oito setores. Por comparação às demais, a feição subdividida em oito setores apresentou maior capacidade de ajuste dos dados de vizinhança na previsão do layer geoestatístico.

✓ Número máximo e mínimo de vizinhos: corresponde ao número máximo e mínimo de pontos amostrais que serão compreendidos na área abrangida pelo setor de pesquisa na interpolação de um ponto qualquer. Por padrão, não são permitidas mudanças no número máximo de vizinhos quando o tipo de setor apresenta oito subdivisões, sendo este limite definido como igualmente correspondente ao limite máximo de setores, e pela característica do tipo de setor escolhido não se justificou a redução do número de vizinhos em função da perda na capacidade de previsão dos resultados por sub-amostragem de vizinhança.

A análise do ajuste do método foi realizada com as seguintes predições de erros, calculados por validação cruzada: quadrado médio do erro (RMS); média padronizada; quadrado médio do erro padronizado; e erro padrão médio. Devido ao pequeno número de amostras, provenientes de dados médios de uma série histórica climática com prévia consistência, optou-se pela não remoção dos valores que apresentassem elevado erro na estimação do modelo geoestatístico.

#### 4.3.3 Análise de componentes principais

O elevado número de parâmetros envolvidos na predição das pedopaisagens, e as derivações oriundas, em sua grande maioria, diretamente do MDE, foram os fatores motivacionais para aplicação da Análise de Agrupamento (AA) e Análise de Componentes Principais (ACP), objetivando a remoção dos atributos topográficos redundantes.

Considerou-se conveniente o controle das escalas pela padronização dos

dados para média 0 e desvio padrão igual a 1, sendo dessa forma utilizada para a ACP a matriz de correlação (R).

A remoção das variáveis menos explicativas foi realizada utilizando AA, seguida pela ACP, para remoção da variável menos explicativa dentro de cada grupo formado pela primeira técnica. O número de variáveis a serem retidas corresponde ao número de grupos definidos pela AA, e a seleção das variáveis dentro de cada grupo é feita retendo-se a última variável a ser excluída pela ACP dentro daquele grupo, resultando, portanto, na permanência de variáveis não redundantes e mais explicativas da variabilidade espacial das informações de caráter pedológico.

Dos métodos propostos por Jolliffe (1972, 1973), para a redução do número de variáveis na ACP, decidiu-se pela escolha do método dinâmico baseado em componentes principais. Nesse método, define-se previamente um número de variáveis a serem retidas; remove-se o coeficiente de ponderação (autovetor) associado ao último componente principal (variável menos explicativa), e o procedimento é novamente refeito até se atingir o número total, pré-estabelecido, de variáveis a serem retidas.

Na AA, após a obtenção da matriz de distância euclidiana média entre as variáveis, aplicaram-se sete diferentes regras de amalgamação para AA, visando identificar a de melhor desempenho, sendo estas: *Single Linkage*, *Complete Linkage*, *Unweighted pair-group average*, *Weighted pair-group average*, *Unweighted pair-group centroid*, *Weighted pair-group centroid (median)* e *Ward's method*.

Para medir o grau de ajuste entre a matriz original de distância (matriz fenética) e as resultantes do processo de agrupamento (matriz cofenética) dos testes adotados, utilizou-se o Coeficiente de Correlação Cofenética (CCC), que avalia o grau de deformação provocado pela construção do dendograma. Os CCC inferior a 0,7 indicam inadequação do método de agrupamento (VALENTIN, 2012).

A definição do número de grupos ideal na AA foi realizada com auxílio de um gráfico de distâncias das ligações da matriz de dissimilaridade, que identifica descontinuidades naturais em termos de distância (VICINI; SOUZA, 2005).



#### 4.3.4 Classificação das classes de pedopaisagem por isodata e máxima verossimilhança

Para a classificação das pedopaisagens, adotou-se o método de classificação não supervisionada, com uso de ferramenta baseada em classificação ISODATA e Máxima Verossimilhança (BALL; HALL, 1965; RICHARDS, 2013). Apenas os dados resultantes da ACP foram submetidos a essa classificação. O valor considerado como tamanho mínimo de uma classe foi de 10 vezes o número de camadas nas bandas raster de entrada. O valor inserido para o intervalo de amostragem foi definido correspondente a 20 células, o qual foi considerado como suficiente para representar as menores categorias desejáveis existentes nos dados de entrada. A definição dos grupos foi realizada por comparação ocasional do mapa de solos do estado e daquele gerado pelo classificador. Para adequação da conformação e do total de classes, realizaram-se simulações variando-se o número de classes e a inclusão e/ou exclusão de variáveis, com base no significado intrínseco e importância dos dados considerados.

Para aprimoramento da classificação, todas as bandas tiveram seus valores transformados por padronização dos valores em um intervalo de 0 a 100. O grid de espaçamento adotado para a modelagem hidrológica foi definido como 50 m. Assim, para a mudança do tamanho de pixel de 30 m para 50 m, e para obtenção de um melhor refinamento e homogeneização dos grupos, aplicou-se uma filtragem ao mapa de pedopaisagens, por reamostragem majoritária, o qual determina o valor de cada célula baseando-se nos valores mais frequentes das células vizinhas.

É importante advertir que, sob um olhar atento, há recursos para criação de classes especializadas do solo, as quais não devem ser apenas voltadas para simular as classes já existentes, mas sim características desejadas, e quando submetidos a pesquisas mais criteriosas, estes recursos poderão indicar resultados em um nível de confiança com erro admissível. É justamente pela escassez de estudos nesse direcionamento que deixa-se claro que os critérios adotados, tratam-se apenas de uma proposta para a realidade de áreas com ausência de levantamentos detalhados, e não uma metodologia de substituição das técnicas já consagradas de classificação do solo.

Na literatura estão disponíveis numerosos testes quali-quantitativos para

validação de simulações, e em sua grande maioria, senão todos são embasados em comparações dos valores observados com os valores simulados, porém pela baixa disponibilidade de amostras representativas da área de estudo, a validação do método proposto para criação do mapa de pedopaisagens, fica sujeitada apenas a qualidade dos resultados obtidos pelo modelo DHSVM, que deve apresentar os valores de calibração das variáveis de solo com magnitude correspondente a outros trabalhos que fizeram uso de mapas mais refinados, e tiveram levantamentos mais detalhados e precisos das variáveis pedológicas.

#### 4.4 ESTIMAÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS FALTANTES

Dentre as variáveis climatológicas exigidas pelo modelo, a radiação de onda longa incidente na superfície ( $L_{in}$ ,  $W m^{-2}$ ) não é medida por quaisquer das 27 estações meteorológicas disponíveis.

Por meio de uma análise prévia, foram comparadas cerca de 20 equações propostas na literatura, tendo-se constatado que o modelo referente à Equação 19, testado por Aguiar et al. (2011), apresentou o melhor ajuste para estimar  $L_{in}$ , sendo, portanto o método escolhido.

$$L_{in} = \left[ 0,7 + 5,95 \cdot 10^{-5} \left( e \cdot \exp\left(\frac{1.500}{T}\right) \right) \right] \sigma T^4 \quad (19)$$

em que:

$e$  = Pressão atual do vapor d'água no ar (hPa);

$T$  = Temperatura do ar (K);

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6697 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ).

A pressão atual do vapor d'água foi calculada utilizando-se a Equação 20.

$$e = \frac{URe_s}{100} \quad (20)$$

A pressão de saturação do vapor d'água ( $e_s$ , em hPa), foi calculada pela equação de Tetens (Equação 21) para temperatura maior ou igual a 0 °C (TETENS, 1930, citado por Aguiar et al., 2011).

$$e_s = 6,1078.10^{\frac{7,5t}{237,3+t}} \quad (21)$$

As estações com presença de falhas foram submetidas ao processo de preenchimento por interpolação de dados com as estações vizinhas de maior similaridade. Para tanto, adotou-se o seguinte procedimento:

1. Interpolação das estações meteorológicas descritas no tópico 4.2.1, com uso de Krigagem Ordinária, para obtenção do “Major Range” (alcance) do semivariograma;
2. Uso do alcance como raio de vizinhança para definição de pelo menos 3 estações de maior proximidade daquela com dados faltantes e, como fator secundário de similaridade, adoção do uso das unidades fisiográficas obtidas conforme descritas no Apêndice A;
3. Seleção de três estações, definidas no procedimento anterior, que apresentem maiores coeficientes de correlação de Pearson com a estação de interesse; e
4. Preenchimento das falhas da estação com dados ausentes, pelo método do Inverso da Distância Ponderada – IDW, com uso das estações remanescentes do procedimento anterior.

#### 4.5 DADOS DE ENTRADA GERADOS PELO PRÓPRIO MODELO

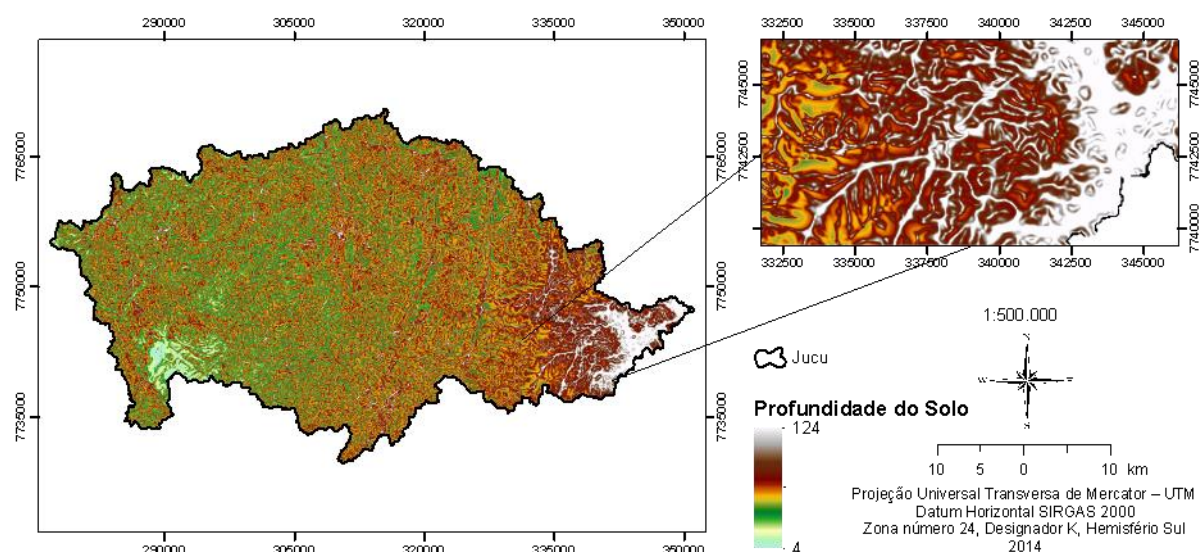
O modelo foi originalmente implementado para realizar a criação de dois produtos de entrada, a profundidade do solo e a rede de drenagem. Estes produtos podem ser disponibilizados pelo usuário, porém, devido à intrínseca dificuldade de obtenção do mapa de profundidade do solo (espessura do solo desde a superfície até a rocha), optou-se pela geração automática do mesmo (Figura 6) e conseqüentemente a complementação da tabela de atributos da rede de drenagem

da bacia (Figura 7) (fornecida pelo usuário).

Os dois produtos foram gerados pelo script “createstreamnetwork”. Inicialmente, obteve-se a rede de drenagem tendo como produtos de entrada o MDE, livre de qualquer tipo de descontinuidade fluvial (depressões espúrias e não espúrias), o limite do divisor hidrográfico, o raster de profundidade do solo (espessura do solo, que quando não disponibilizado é gerado durante o processo), a área mínima drenada por um curso d’água, a profundidade mínima do solo (correspondente no mínimo ao maior valor da soma das profundidades das camadas de solos, “d”) e a profundidade máxima do solo.

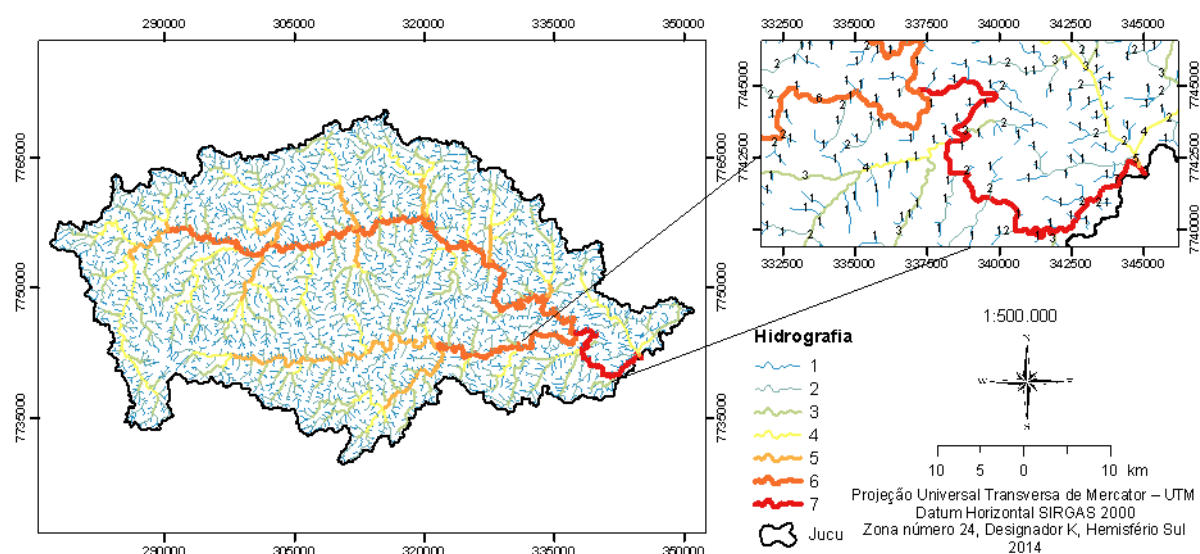
A profundidade máxima do solo foi definida inicialmente com base nos poços piezométricos do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, presentes na área de estudo, ao considerar os materiais constituintes do perfil do solo em cada poço, definindo assim a profundidade com base no perfil de máxima profundidade até atingir a rocha consolidada. A definição da área mínima de contribuição de um curso d’água foi baseada na métrica morfológica de densidade de drenagem usando como referência a feição pole-linear de hidrografia do levantamento realizado pelo IBGE na escala de 1:50.000, que segundo o IBGE (2013), enquadra-se em escala de reconhecimento que atende uma ampla faixa de objetivos dentre os quais cita-se o estudo na escala de bacias hidrográficas. A ordenação e atribuição de classes hidráulicas aos cursos d’água (características morfológicas do canal) foram realizadas automaticamente pelo script, baseando-se no declive e área de contribuição de cada segmento.

Figura 6 – Superfície matricial de profundidade do solo.



Fonte: o autor.

Figura 7 – Rede hidrográfica adotada para modelagem.



Fonte: o autor.

#### 4.6 COMPONENTES DA MODELAGEM HIDROLÓGICA: AQUECIMENTO (*SPIN UP*), CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

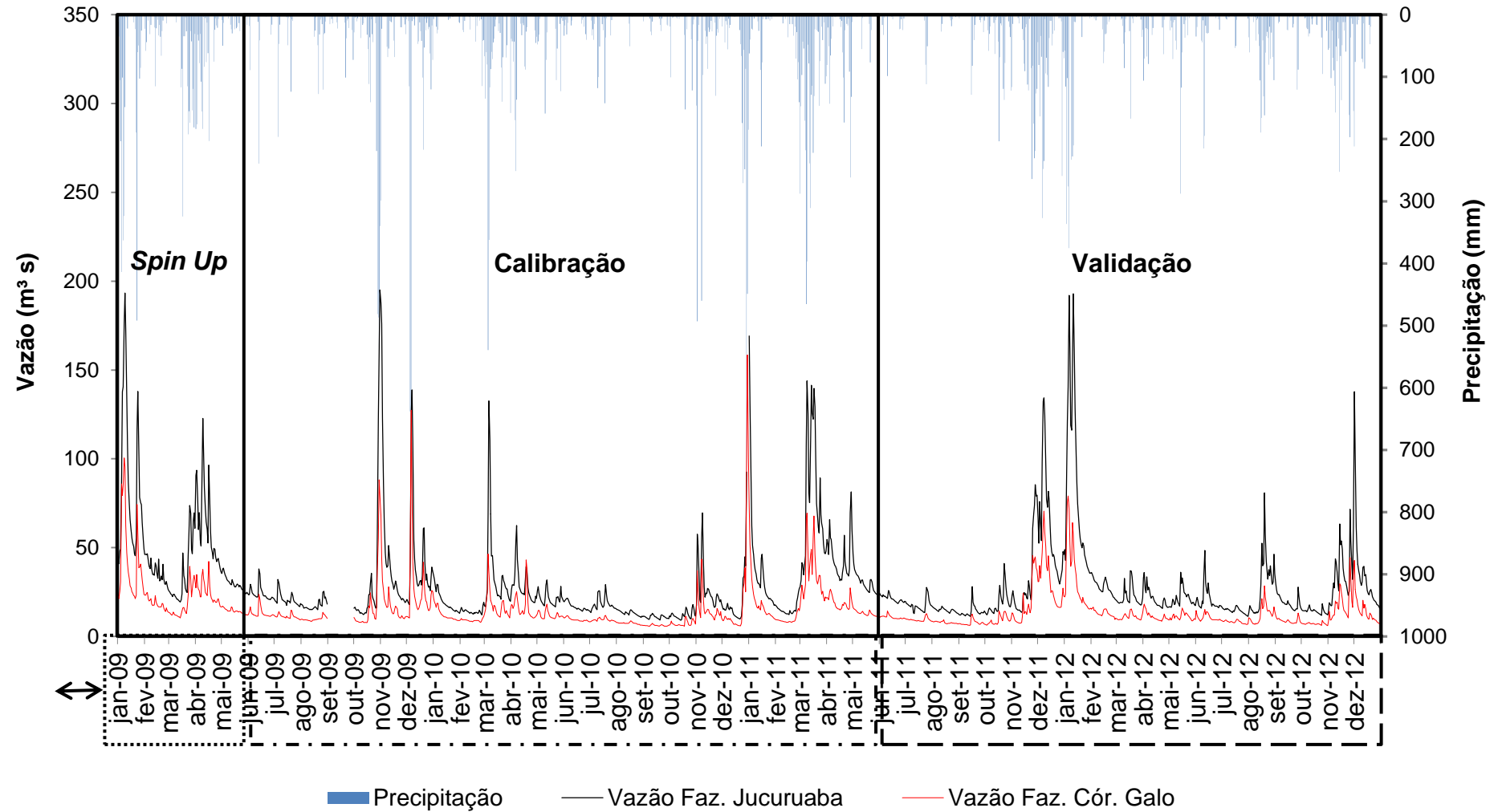
A combinação de todos os dados disponíveis e compatíveis, entre as séries de diferentes estações meteorológicas e fluviométricas, permitiu a geração de apenas quatro anos de dados, para realização da modelagem, contendo a mesma sequência cronológica. Visando não incorrer no comprometimento da modelagem,

devido às dificuldades de subdivisão desta curta série para os procedimentos de aquecimento (*spin-up*), calibração e validação do modelo, exclusivamente por insuficiência de dados, decidiu-se pela extensão dos dados, por meio da simples duplicação da série, passando, portanto, a se ter disponíveis oito anos de dados.

Julgou-se não haver implicações negativas no processo de modelagem, pelo uso da repetição dos dados climáticos, e visando acautelar-se quanto ao critério de particionamento dos dados, utilizou-se o período correspondente a duplicação da série, mais seis meses adicionais para realização do aquecimento, e quanto aos 3,5 anos restantes, separou-se 2 para calibração e 1,5 para validação dos dados (Figura 8).

O processo de aquecimento do modelo foi realizado estabelecendo-se valores médios aproximados para as condições de umidade e temperatura iniciais da área, de forma generalizada. O equilíbrio das condições das variáveis temperatura e umidade da interface solo-vegetação-atmosfera, obtido por redistribuição célula a célula, só ocorre após a execução do modelo para determinado período de tempo definido pelo usuário, e diferentemente do estado inicial destas condições, a condição final terá um estado mais realístico para cada classe de solo, profundidade do solo, uso e cobertura do solo e volume de água no canal, podendo-se então iniciar o processo de calibração dos dados (quando este for necessário).

Figura 8 – Particionamento da série de dados para os três processos intrínsecos da modelagem.



Fonte: o autor.

A calibração do modelo foi embasada nos preceitos apresentados por James e Burges (1962, citados por VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001), que propuseram o ajuste dos parâmetros do modelo para identificar um conjunto de valores que produzam resultados mais consistentes, mantendo relações adequadas entre os valores dos parâmetros e características das bacias hidrográficas. Para modelos distribuídos de alta complexidade, como o DHSVM, geralmente não é adequada à aplicação de procedimentos de otimização, já que o ciclo de processamento computacional pode demandar várias horas, ou até dias, para realizar simulações multianuais, pois muitas dessas simulações estimam relações entre parâmetros individuais e uma função objetivo. Assim, têm sido utilizadas abordagens manuais de tentativa e erro, as quais são muito comuns em práticas hidrológicas, sendo esta mesma prática adotada para calibrar o modelo no presente estudo (VANSHAAR; LETTENMAIER, 2001).

Em consciência da inegável necessidade de ajuste dos parâmetros de entrada do modelo, por calibração, decidiu-se por realizar tal procedimento com a noção de que, a possibilidade de uso da mais refinada técnica de calibração, ainda poderia deixar a desejar quanto à otimização dos parâmetros, devido especialmente aos seguintes fatores: complexa dinâmica de uso do solo; presença de fatores de complexa modelagem (barragens, perda de água por meios não naturais, como exploração em poços profundos ou diretamente nos cursos de água e alterações na quantidade de água devido à incompatibilidade entre divisor topográfico e freático); atribuição de valores médios para parâmetros de distribuição contínua; reduzida dimensão da série de dados meteorológicos; e obtenção de parâmetros de elevada complexidade de aquisição para uma área com tamanha dimensão espacial como é a bacia do rio Jucu.

A identificação dos parâmetros (Tabela 12) aos quais o modelo apresenta maior sensibilidade foi realizada com base no trabalho desenvolvido por Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011), que avaliou a sensibilidade do modelo a vários parâmetros de entrada, tanto em bacias de regiões tropicais quanto em regiões temperadas.



Tabela 12 – Variáveis de solo e vegetação às quais o modelo DHSVM apresenta maior sensibilidade.

| <b>Símbolo</b>   | <b>Variáveis</b>                                                                                                | <b>Unidade</b>  |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| c                | Fração de cobertura do dossel superior                                                                          | adm.*           |
| $h_T$            | Distancia desde o solo até o inicio da copa das arvores (0 – 1, fração da altura total da vegetação, J valores) | adm.            |
| h                | Altura da vegetação (dossel superior e inferior)                                                                | m               |
| $r_{smin}$       | Mínima resistência dos estômatos (J valores)                                                                    | $s\ m^{-1}$     |
| $e_m$            | Limiar de déficit de pressão de vapor acima do qual os estômatos fecham (J valores).                            | Pa              |
| IAF <sub>O</sub> | Índice de área folhar mensal para o dossel superior (jan – dez)                                                 | adm.            |
| IAF <sub>U</sub> | Índice de área folhar mensal para o dossel inferior (jan – dez)                                                 | adm.            |
| $K_s$            | Condutividade hidráulica saturada lateral na superfície                                                         | $m\ s^{-1}$     |
| f                | Coeficiente para a variação da condutividade lateral com a profundidade do solo                                 | m               |
| $\varphi$        | Porosidade do solo (K valores no intervalo 0 - 1)                                                               | $cm^3\ cm^{-3}$ |

A calibração foi realizada exclusivamente para ajustar a vazão dos cursos d'água, por esta ser de fácil obtenção, e por não se ter disponibilidade outras variáveis medidas. A ocorrência de duas estações fluviométricas na bacia permitiu avaliar o potencial do modelo quando aplicado em áreas a montante da qual foi calibrado, ou seja, analisar a influência da calibração da estação mais a jusante (Fazenda Jucuruaba) sobre a estação mais a montante (Córrego do Galo). Deve ficar claro que, com isso, não se está buscando a generalização de uma hipótese, mas sim a análise de um caso particular (estudo de caso).

#### 4.6.1 Seleção de métodos quantitativos diagnósticos

Gupta e Sorooshian (1998), afirmam que, apesar da crescente popularidade dos modelos hidrológicos de base física, implementados computacionalmente, não se teve acompanhamento da solução quanto à identificação de “funções objetivo” idealmente compatível para dar suporte à calibração de tais modelos. Estabeleceram, também, um novo paradigma ao afirmarem que a disponibilidade de melhores e mais abundantes medidas de campo certamente não seriam suficientes para desconsiderar o procedimento de calibração, sustentados na necessidade de se reconhecer a natureza multiobjeto do modelo e seus respectivos erros.

Após quase uma década do apelo feito pelo último autor, foram desenvolvidas orientações mais abrangentes para uma fácil avaliação desses modelos, em termos de precisão dos dados simulados, em comparação com os respectivos dados observados.

Em função da necessidade de padronização das diretrizes de avaliação de modelos hidrológicos de base física, Moriasi et al. (2007) determinou técnicas estatísticas e gráficas de avaliação de modelos e os respectivos intervalos de valores para análise do desempenho das estatísticas recomendadas, valendo-se de ampla revisão de literaturas relacionadas com calibração, validação e aplicações de modelos hidrológicos.

As técnicas estatísticas mais adequadas para a avaliação de modelos hidrológicos são referentes às equações 22, 23 e 24 (MORIASI et al., 2007).

O percentual de tendência PBIAS (Equação 22) possui clara capacidade de indicar o mau desempenho do modelo, com tendências expressas em porcentagem. Valores nulos de PBIAS indicam ausência de tendência nos dados, valores positivos indicam viés de superestimação, e negativos viés de subestimação (GUPTA; SOROOSHIAN, 1998).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})^2} 100 \quad (22)$$

em que:

$n$  = número de observações;

$Y_i^{obs}$  = valores observados;

$Y_i^{sim}$  = valores simulados.

O Erro padrão médio normalizado (RSR) (Equação 23) associa o benefício de um índice estatístico de erro (RMSE) e inclui um fator de escalonamento (STDEV). O RSR pode variar a partir de 0, onde o valor nulo indica ausência de variação residual, até um valor positivo, indicativo do oposto. Embora seja amplamente aceito

que o modelo apresenta melhor desempenho mediante baixos valores de RMSE, o RSR permite qualificar o que realmente é considerado um valor baixo desse índice, com base no desvio padrão das observações (MORIASI et al., 2007).

$$\text{RSR} = \frac{\text{RMSE}}{\text{STDVE}_{\text{obs}}} = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{média}})^2} \right]} \quad (23)$$

em que:

RMSE = raiz do quadrado médio do erro;

STDEV = desvio padrão dos dados observados;

$Y^{\text{média}}$  = média dos valores observados.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) (Equação 24) permite determinar a magnitude relativa da variância residual sob efeito de uma estatística normalizada. Este coeficiente varia de  $-\infty$  a 1, sendo a unidade, indicativa de perfeito ajuste entre os dados observados e simulados. Admite-se que valores entre 0 e 1 sejam indicativos de níveis aceitáveis de desempenho, e que valores negativos sejam indicativos de que o valor médio observado é melhor preditivo do que os valores simulados, sendo, portanto, um desempenho inaceitável do modelo (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{média}})^2} \quad (24)$$

Adotou-se, também, o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado (NSE') (Equação 25), por ser menos sensível aos altos valores extremos que o NSE, devido às diferenças entre módulo.

$$NSE' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n |Y_i^{obs} - Y_i^{média}|} \quad (25)$$

A inclinação ( $\beta_1$ ) e intercepto ( $\beta_0$ ) da reta, resultantes do ajuste de uma regressão linear entre os dados observados e simulados, são também comumente utilizados para avaliação do desempenho de modelos, juntamente com o coeficiente de determinação ( $r^2$ ). A inclinação é indicativa da relação relativa entre os dados simulados e medidos, já o intercepto pode ser indicativo de uma defasagem entre estes ou de falta de alinhamento (MORIASI et al., 2007). Os valores de 1 para a inclinação e 0 para o intercepto, associados a um  $r^2$  igual a 1, são indicativos de perfeita magnitude de concordância entre os dados.

Santhi et al. (2001) e Van Liew, Arnold e Garbrecht (2003), consideram que coeficientes de determinação superiores a 0,5 são aceitáveis, porém acrescenta-se que este índice deve estar associado a uma predição aceitável de  $\beta_1$  e  $\beta_0$ . Moriasi et al. (2007) sugerem que, em simulações de séries mensais de vazões, valores de  $RSR \leq 0,70$  e  $-25 \leq PBIAS \leq 25$  são considerados como indicadores de um ajuste satisfatório. Mesmo tendo-se simulado dados num passo de tempo diário no presente estudo e sabendo-se que na escala diária os critérios devam ser menos rigorosos do que em escalas de tempo maiores, adotaram-se como referência os mesmos critérios propostos para escala mensal, devido à ausência desses critérios para a escala de tempo diária. Já o desempenho de NSE foi classificado segundo os intervalos da Tabela 13 (COLLISCHONN, 2001), julgando-se adequando também para o índice NSE'.

Tabela 13 – Valores de referência para os coeficientes NSE e NSE'.

| <b>Desempenho</b> | <b>Intervalos do coeficiente NSE e NSE'</b> |
|-------------------|---------------------------------------------|
| Adequado          | > 0,75                                      |
| Aceitável         | 0,36 a 0,75                                 |
| Não aceitável     | < 0,36                                      |

Fonte: COLLISCHONN, (2001)

Os métodos quantitativos apresentados foram adotados para a avaliação de desempenho do DHSVM, tanto para a calibração quanto para a fase de validação do modelo.

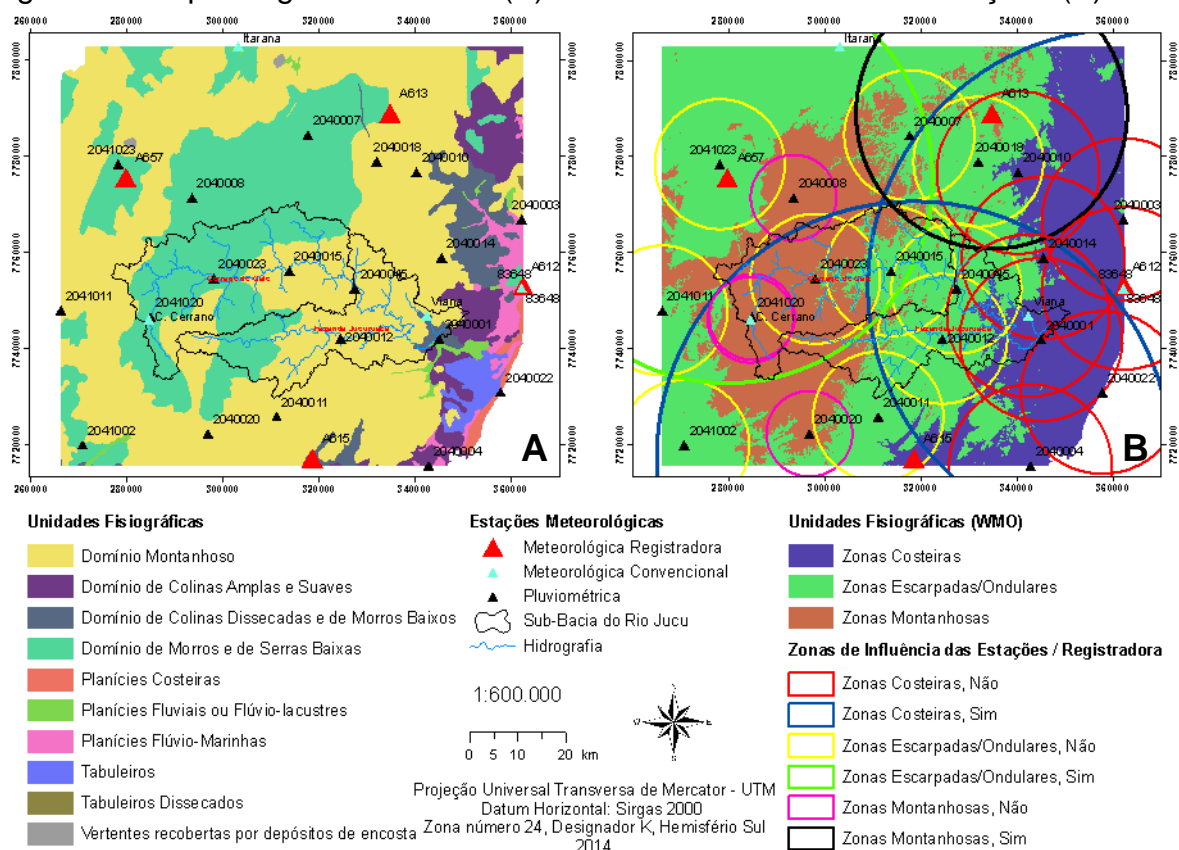
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente serão apresentados, como resultados, os dados de entrada obtidos para a simulação hidrológica da bacia do rio Jucu com o DHSVM. Em seguida, serão apresentados os resultados obtidos com o referido modelo.

### 5.1 DENSIDADE DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

O mapa de Geodiversidade do Estado do ES (Figura 9, A) não teve seu uso justificado para o propósito de quantificação da densidade mínima de estações climatológicas para a região onde se localiza a unidade de estudo, devido principalmente à baixa precisão do mesmo em função da pequena escala de sua criação (1:500.000), no entanto, este produto desempenhou importante função, pois serviu de suporte para: o delineamento das unidades fisiográficas; seus agrupamentos e reclassificação; escolha do método mais adequado de classificação hipsométrica do relevo, identificação do número de classes hipsométricas mínimas e também das excedentes para posterior agrupamento; e para determinação do agrupamento de tais classes por comparação visual. A solução de todas estas proposições foi obtida apenas com a determinação dos intervalos de classes altimétricas realizadas com base no MDE, que é um produto de fácil aquisição e de alta resolução espacial quando utilizado para análise de macro e meso-escala.

Figura 9 – Mapa de geodiversidade (A) e zonas de influência das estações (B).



Fonte: o autor.

De posse do mapa de unidades fisiográficas elaborado (Figura 9, B), as estações não registradoras, dependentes das variáveis climatológicas de parâmetros mínimos exigidos pelo modelo DHSVM, tiveram seus registros completados de forma inalterada com aquelas de maior proximidade e similaridade fisiográfica (Tabela 14), satisfazendo assim a exigência de que todas as estações apresentassem a lista de variáveis mínimas com séries sincronizadas para a simulação hidrológica.

Tabela 14 – Relação das estações meteorológicas com registros completados por similaridade.

| <b>Estação Dependente</b>   | <b>Estação mais próxima e mais similar</b> |
|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 2040001                     | Viana                                      |
| 2040003                     | A612                                       |
| 2040004                     | A615                                       |
| 2040007                     | A613                                       |
| 2040008                     | Centro Serrano                             |
| 2040010                     | A613                                       |
| 2040011                     | A615                                       |
| 2040012                     | Viana                                      |
| 2040014                     | Viana                                      |
| 2040015                     | Viana                                      |
| 2040018                     | A613                                       |
| 2040020                     | Centro Serrano                             |
| 2040022                     | 83648                                      |
| 2040023                     | Centro Serrano                             |
| 2040045                     | Viana                                      |
| 2041002                     | A615                                       |
| 2041011                     | Centro Serrano                             |
| 2041020                     | Centro Serrano                             |
| 2041023                     | A657                                       |
| 83648 <sup>1</sup>          | A612                                       |
| Centro Serrano <sup>1</sup> | A615                                       |
| Viana <sup>1</sup>          | A612                                       |

<sup>1</sup> Estações dependentes das variáveis velocidade do vento e radiação de onda curta incidente.

Por ser a variável climática de maior variabilidade quanto à distribuição espacial, temporal e sazonal, um fator preocupante quanto à precipitação foi a ocorrência de áreas não contempladas pelos pontos de coleta de dados (estações meteorológicas, pluviométricas, etc.). Ressalta-se que a determinação da densidade mínima de estações em função da unidade fisiográfica pelo critério adotado, não leva em consideração os fatores locacionais e de sistematização da distribuição espacial das estações, podendo, portanto, resultar em zonas superadensadas e outras não contempladas. No entanto, toda área abrangida pela unidade de estudo apresentou no mínimo uma estação representativa da mesma (Figura 10). Apesar da desvantagem apresentada, do método descrito, outros métodos comumente utilizados, como o proposto por Llamas (1993), para avaliar o adensamento de estações pluviométricas, em função da altura média das precipitações sobre uma região – obtido pelo quadrado da razão entre o coeficiente de variação da média das precipitações anuais pelo percentual de erro admissível – são métodos que não consideram a heterogeneidade das variáveis diretamente correlacionadas, e não calculam a existência da correlação espacial entre as estações, tendo como

princípio as variáveis estatísticas dos dados disponibilizados, sem levar em consideração a dimensão da bacia e suas características geomorfológicas e climáticas, sendo sua aplicação bastante comprometida para as áreas que não possuam série de dados.

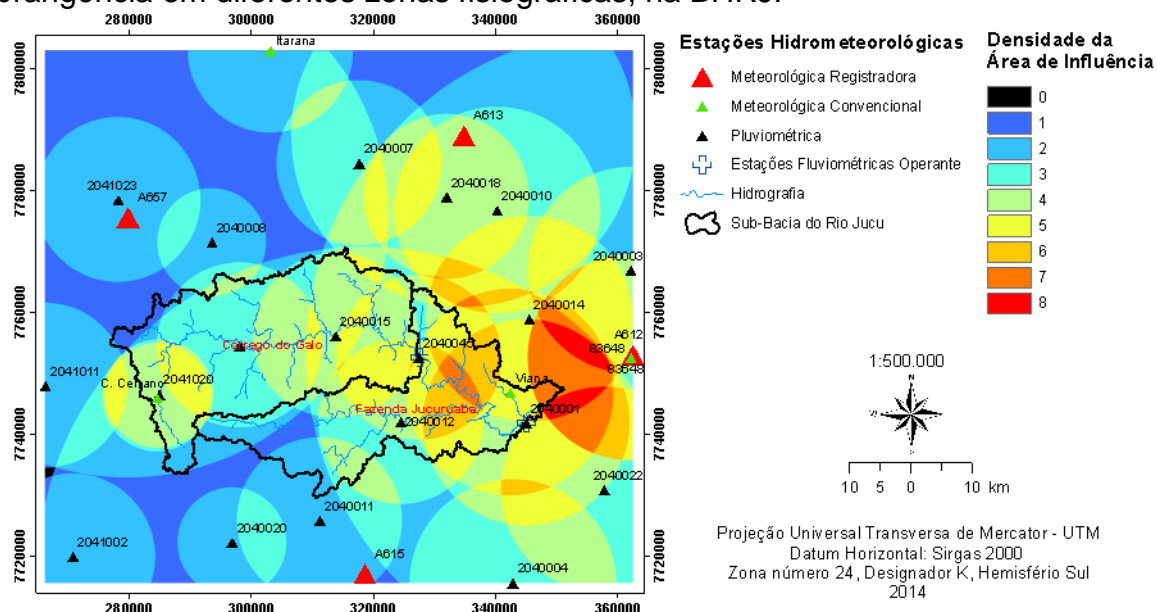
Para considerar apenas o efeito intrínseco da influência das distâncias entre as estações, com base na variável precipitação, a adoção das características do semivariograma, obtido com o método geoestatístico Krigagem Ordinária, calculado para as estações de Castro (2008), descrita no tópico 4.2.1.1, referentes à área de estudo, permitiu, pelo uso do “major range” (alcance), identificar o valor de 66,90 km como a distância limite entre estações, em que ainda há dependência espacial entre as mesmas. A maior distância identificada para as estações selecionadas foi de 32,00 km, concluindo-se que a densidade de estações para a área de estudo é suficiente e apresenta-se aproximadamente duas vezes maior que a densidade mínima calculada.

Por comparação e análise crítica aos para quantificação de densidade de estações, foi possível concluir que o método adotado neste trabalho foi o mais adequado para a finalidade proposta, o qual, por complementação com técnicas geoestatísticas, apresentou maior acurácia e alta relevância nesta análise.

O produto originário da análise de densidade das estações pode ser adotado como auxiliar, porém não determinante, na eliminação de estações marginais de baixa representatividade para modelagem. Identificaram-se, por análise visual, as estações Itarana e Castelo (2041002) como sendo pouco representativas à BHRJ, por seu isolamento quanto à abrangência da cobertura de suas áreas de influência, tanto na distância da área de estudo quanto na influência sobre outras estações de maior proximidade da BHRJ. Assim, a decisão sobre a permanência dessas duas estações foi tomada mediante simulação do modelo e consideração sobre a influência, individual, na qualidade da predição dos dados. Concluiu-se que a estação Itarana não apresentou acréscimo na qualidade da predição do modelo; portanto, se optou por sua exclusão (área de influência na parte superior da Figura 10 sem presença de estação).



Figura 10 – Densidade mínima da rede de diferentes tipos de estações por área de abrangência em diferentes zonas fisiográficas, na BHRJ.



Fonte: o autor.

Em suma, conclui-se que a densidade da rede de estações remanescentes, e sua distribuição espacial, são suficientemente adequadas para representar satisfatoriamente a influência da precipitação sobre a área de estudo, sendo esta a variável climática de maior influência sobre a vazão da BHRJ. Porém, há ressalvas quanto às demais variáveis climáticas, pois ainda que se tenha adotado critérios para identificar a afinidade entre as estações, o preenchimento de forma inalterada dos valores de uma estação para outra, sem atribuição da influência de micro e topo-escala das variações locais, certamente pode influenciar negativamente a predição do modelo. Entende-se que as principais implicações negativas dessa forma de preenchimento dos dados faltantes ocorrem na evapotranspiração, pela elevada demanda de variáveis representativas para o seu cálculo e por sua expressiva influência no balanço hídrico.

O procedimento da extrapolação inalterada do valor de variáveis climatológicas também foi adotado por Santiago, Richards e Jia (2005) para um modelo de macro escala. Notou-se, porém, que a bacia hidrográfica adotada pelo autor tem área de 75,40 km<sup>2</sup> e foi realizada a extrapolação de apenas um ponto para as 38 demais estações pluviométricas, o que não o impediu de obter um  $r^2$  variando de 0,46 a 0,90, e coeficiente de Nash variando de 0,45 a 0,78, durante o período de validação de dados diários de vazão.

## 5.2 MAPA TEMÁTICO DE PEDOPAISAGENS

Muitas são as fontes de erros na quantificação das variáveis edáficas, sendo uma das principais, a baixa densidade de amostragem associada à alta heterogeneidade e anisotropia do solo, adquirindo magnitudes ainda maiores pela distribuição não sistemática da variável medida. Em função da complexidade e do elevado custo de aquisição das variáveis edáficas, o que tem sido comumente adotado é a atribuição do valor médio de um pequeno número de observações, muitas vezes de levantamento exploratório, como sendo representativo de grandes áreas. Diante disso, se entende que são necessárias novas propostas metodológicas, ou continuidades das já existentes, para suprir a carência dessas informações de tão elevada demanda, enquanto tais dificuldades, associadas aos complexos métodos tradicionais, não sejam superadas.

Demattê et al. (2004) comparou o método tradicional e técnicas espectrais por sensoriamento remoto para obtenção de mapas de solo, concluindo que dados espectrais podem ser utilizados como instrumento neste tipo de classificação. Oliveira; Lobo Ferreira (2002) e Abreu e Pena (2013); propuseram metodologias para definição de classes de solo com uso de classes de infiltração máxima e permeabilidade. PINEDA, (2008) utilizou o descritor de terreno HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – desnível acima da drenagem mais próxima), que se baseia apenas na direção de fluxo (área de contribuição) e na rede de drenagem (distância euclidiana), para gerar mapas detalhados de classes de solo. Carvalho Junior et al. (2011) utilizando algoritmos de classificação por máxima verossimilhança e redes neurais artificiais, realizou a classificação de unidades pedológicas baseando-se em um conjunto de variáveis geomorfológicas.

Considerando a ausência de variáveis físico-hídricas nos relatórios técnicos de levantamento dos perfis dos solos, pela classificação tradicional (OTTONI, 2005), proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 1999), e devido às numerosas restrições impostas à obtenção das informações edáficas, optou-se pela elaboração de um mapa temático representativo das propriedades do solo de maior interesse, contendo as propriedades físico-hídricas e termodinâmicas dos solos, necessárias à execução do DHSVM.

Para a elaboração do referido mapa, foram utilizados atributos climáticos e pedogenéticos, cujos resultados são apresentados a seguir.

### 5.2.1 Mapa de precipitação

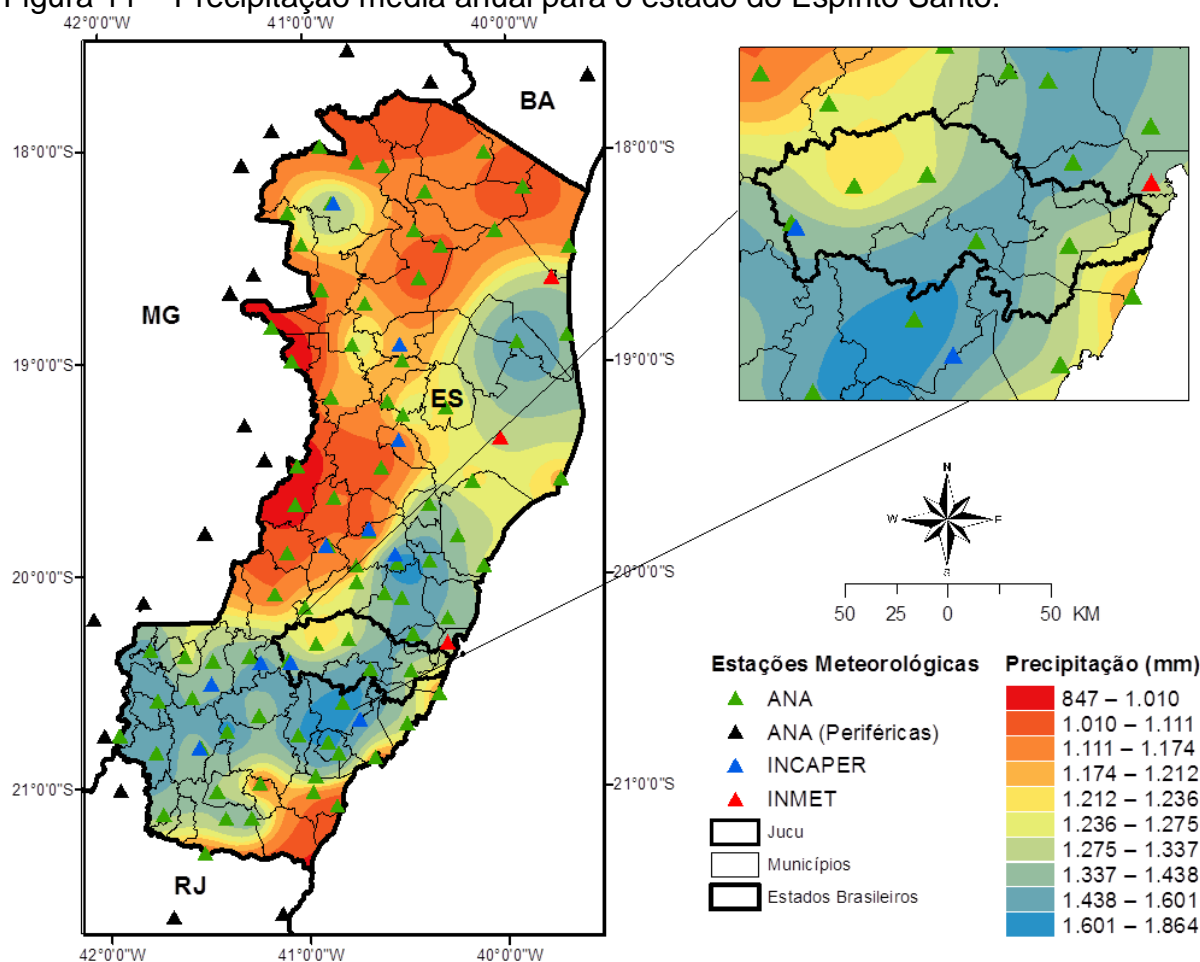
A criação de um modelo válido para a variável precipitação, com o método adotado de interpolação, requereu modelagem interativa mínima e resultou em maior precisão quanto aos erros de previsão quando comparado com outros tipos de krigagem, até mesmo o método de Co-krigagem valendo-se do MDE com dados sistematicamente distribuídos e altamente adensados (resultados não apresentados). Apesar do método elegido, e dos parâmetros de modelagem testados, serem alusivos à morosidade, isso não foi tido como desvantagem do processamento, em função principalmente do número reduzido de amostras selecionadas e por ser uma das ferramentas de análise geoestatística que apresenta melhor desempenho por processamentos paralelos, com disponibilidade de um sistema que otimiza o processamento por utilizar vários processadores (CPU multi-core) com seleção automática do número de núcleos para o não comprometimento da memória do computador. Não houve, portanto qualquer influência negativa na seleção do método de maior precisão e exatidão para elaboração de uma superfície de dados espacializada com alta confiabilidade e mínimo impacto negativo dos erros de predição.

Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros do modelo geoestatístico utilizado para a interpolação da precipitação, resultando na espacialização apresentada na Figura 11.

Tabela 15 – Parâmetros do modelo geoestatístico (KBE) utilizado para interpolação da precipitação na BHRJ.

| Propriedades Gerais          |                    |
|------------------------------|--------------------|
| Tamanho do subconjunto:      | 90                 |
| Fator de Sobreposição:       | 3                  |
| Número de Simulações:        | 100                |
| Tipo de Superfície de Saída: | Predição           |
| Transformação dos dados:     | Empírica           |
| Tipo de semivariograma:      | K-Bessel Detrended |
| Pesquisa de Vizinhança       |                    |
| Tipo de vizinhança:          | Circular padrão    |
| Máximo de vizinhos:          | 8                  |
| Mínimo de vizinhos:          | 8                  |
| Tipo de setor:               | 8 setores          |
| Ângulo (°):                  | 0                  |
| Raio (m):                    | 47.554,22          |

Figura 11 – Precipitação média anual para o estado do Espírito Santo.



Fonte: o autor.

A validação do modelo adotado foi fundamentada em estatísticas de erro de previsão por validação cruzada. As previsões centradas nos valores verdadeiros são

indicativas de imparcialidade, dessa forma o erro médio de previsão deve ser próximo de zero, porém, por este depender da escala dos dados, os erros de previsão são submetidos à padronização, dividindo-os por seus erros padrão de previsão, da qual a média também deve ser próxima de zero. O erro médio e o Erro Médio Padronizado foram respectivamente 3,373 mm e 0,008. Baseando-se em uma média livre de influências escalares, o erro médio apresentou resultado dentro do esperado e com imparcialidade das previsões.

A validação do erro padrão de previsão foi obtida por análise da variabilidade da previsão dos dados verdadeiros. Para tanto, uma adequada estimação requer que o Erro Médio Padrão deva apresentar valores próximos à Raiz do Quadrado Médio do Erro. Apesar da imprecisão da estimativa, com valores na ordem de 122,95 para a Raiz do Quadrado Médio do Erro e 123,94 para o Erro Médio Padrão, a semelhança entre estes valores é indicativa da avaliação correta da variabilidade e exatidão das predições. Dividindo-se o erro de previsão pelo erro padrão de previsão, para obtenção da Raiz do Quadrado Médio do Erro Padronizada, obteve-se o valor de 1,0064, próximo de 1. Tal resultado corrobora com a validação do modelo ajustado e, ainda, por apresentar-se ligeiramente superior a 1, é indicativo de subestimativa da previsão. Esta subestimativa também pode ser observada ao considerar o intercepto e o coeficiente angular, com respectivos valores de 457,15 e 0,64, e  $r^2$  de 0,62, portanto com capacidade explicativa da variabilidade dos dados de entrada acima de 60%.

### 5.2.2 Mapa de temperatura

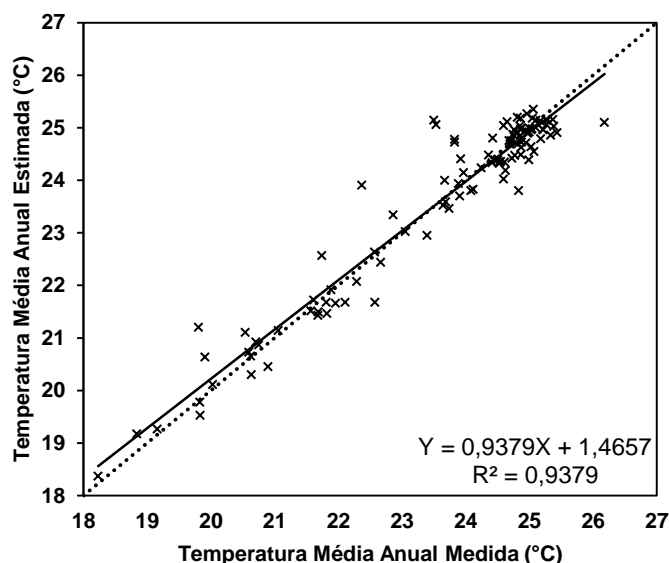
O modelo de regressão linear múltipla obtido para estimação da temperatura é apresentado na Equação 26, composto da altitude, latitude e longitude como variáveis independentes (explicativas).

$$\text{Temperatura} = 19,7170 - 0,0065\text{Altitude} + 0,1763\text{Latitude} - 0,2246\text{Longitude} \quad (26)$$

O  $r^2$  apresentado pela Equação 26 foi de 0,9314, indicativo de excelente capacidade preditiva do modelo. Por ser composto de mais de uma variável independente, adotou-se o  $r^2$  ajustado para refletir a complexidade do modelo quanto ao número total de variáveis utilizadas em sua elaboração. Esse índice apresentou um valor não muito diferente daquele não ajustado, com valor de 0,9307, de forma que o modelo ainda mantém-se com capacidade explicativa de mais de 93 % da variabilidade da variável dependente.

A análise gráfica dos resultados medidos contra os estimados (Figura 12) ilustra maior precisão e exatidão para os valores máximos de temperatura e pequena superestimação dos valores mínimos e intermediários, evidenciados pela representação linear da tendência dos dados, ajustada pelos respectivos valores do intercepto e do coeficiente angular.

Figura 12 – Temperatura média anual histórica medida e simulada para o estado do ES.



Fonte: o autor.

Os coeficientes (Equação 26) são representativos do grau de associação e do tipo de relação com cada variável do modelo à qual o mesmo é associado. As variáveis altitude e longitude apresentaram correlação linear negativa com a variável dependente e correlação positiva para variável latitude, portanto com base no comportamento natural esperado. Os coeficientes do modelo apresentam-se nas mesmas unidades que suas variáveis independentes associadas, de forma que

mantendo-se todas as outras variáveis constantes, um coeficiente refletirá a variação esperada na variável dependente para cada 1 unidade de variação na variável independente, assim sendo, a exemplo da altitude, a temperatura é reduzida em  $-0,00649\text{ }^{\circ}\text{C}$  para cada metro adicional dessa variável explicativa, o que corrobora com o valor do “*lapse rate*” de temperatura (taxa de queda da temperatura com a altitude) apresentado por Hartmann (1994), de  $6,5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ , para o perfil de temperatura médio global.

### 5.2.3 Análise de componentes principais

A melhoria das técnicas de modelagem do solo e da variação espacial de suas propriedades, a disponibilidade de ferramentas para análise da paisagem, a acessibilidade de atributos do terreno em alta resolução espacial e a crescente necessidade de abordagens simplificadas capazes de capturar padrões espaciais significativos de propriedades hidráulicas do solo, tanto em grandes escalas como em escalas refinadas, são motivos que têm direcionado muitas pesquisas ao estudo da influência da topografia nas propriedades e processos do solo (ROMANO; CHIRICO, 2004).

Uma das principais intensões na aplicação da metodológica de geração das classes de pedopaisagem consistiu na identificação e seleção de um número mínimo de produtos que se enquadrassem na descrição e cumprisse com os propósitos citados por Romano e Chirico (2004), uma vez que é visível o apelo para que estas propostas sejam continuadas e novas iniciativas nesta direção sejam tomadas.

Além do MDE, dificilmente encontra-se tão prontamente disponível um produto que reúna tantos requisitos necessários ao cumprimento do objetivo proposto, dos quais citam-se: a facilidade de acesso, qualidade em resolução espacial e precisão, disponibilidade de ferramentas de geoprocessamento e adequabilidade desse produto a tais ferramentas, diversidade em funcionalidade e usabilidade, e sobre tudo derivação em níveis categóricos de subprodutos com propriedades distintas e discriminantes do terreno. Entende-se, porém, que se por

um âmbito o grande número de atributos que podem ser derivados do MDE constitui vantagem, por outro, a redundância quanto suas origens pode certamente implicar em desvantagem pelo seu uso conjunto na busca de variabilidade máxima de cada produto.

Para contornar o problema associado aos subprodutos derivados do MDE, a utilização de AA apresentou-se muito eficiente para separação de grupos com elevada redundância, seguida da seleção da variável mais explicativa, dentro de cada grupo, por meio da ACP.

Com exceção do método de AA (Tabela 16) intitulado *Weighted pair-group centroid (median)*, que apresentou um CCC de 0,37, todos os demais métodos apresentaram índices superiores a 0,70, destacando-se os métodos *Weighted pair-group average* e *Unweighted pair-group average*, com os maiores valores, o que torna a escolha dentre eles dependente apenas do interesse por ponderação ou não do método. Definiu-se o maior valor de CCC como sendo o critério de seleção do método.

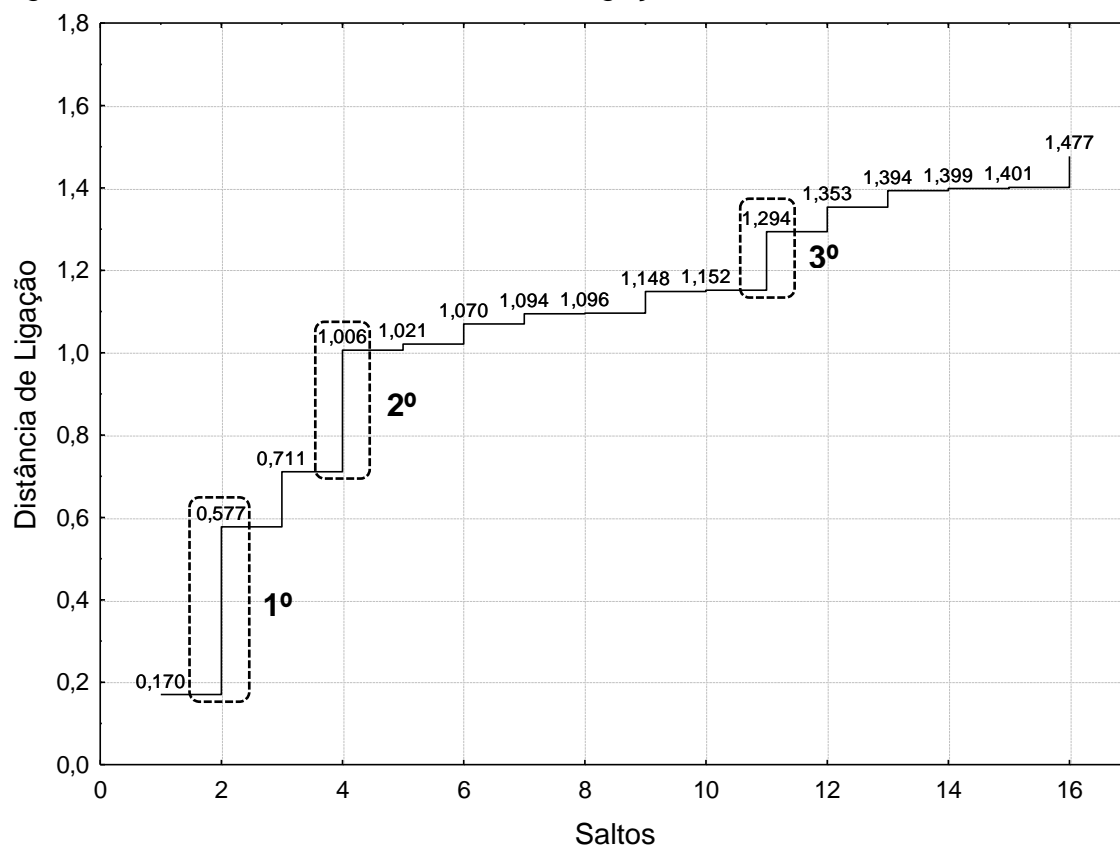
Tabela 16 – Métodos de análise de agrupamento e seus respectivos Coeficientes de Correlação Cofonética.

| <b>Método de Amalgamação</b>          | <b>CCC</b> |
|---------------------------------------|------------|
| Single Linkage                        | 0,7986     |
| Complete Linkage                      | 0,7774     |
| Unweighted pair-group average         | 0,8778     |
| Weighted pair-group average           | 0,8771     |
| Weighted pair-group centroid          | 0,6380     |
| Weighted pair-group centroid (median) | 0,3737     |
| Ward's method                         | 0,6775     |

O ponto de corte no dendrograma para a determinação do número de grupos, formados pelas 17 variáveis, foi embasado no gráfico de distância das ligações da matriz de dissimilaridade (Figura 13), sendo realizado no maior salto entre grupos. A escolha do primeiro ou do segundo maior salto contraria o objetivo de redução de massa, já que incluiriam muitas variáveis, formando 16 grupos no primeiro e 15 no segundo corte, de um total de 17 variáveis. Portanto, optou-se pela escolha do terceiro maior salto, com distância de ligação de 1,29, obtendo-se 7 grupos, o que resultou na remoção de 10 variáveis.



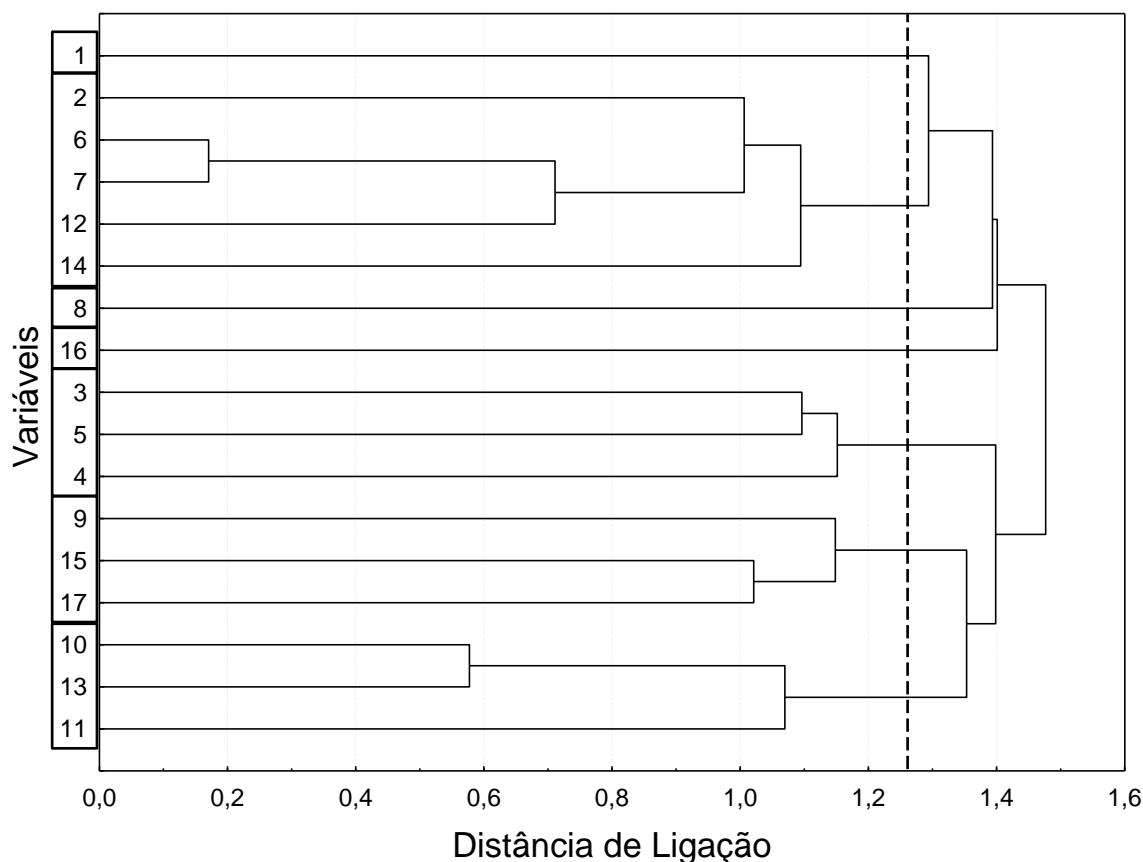
Figura 13 – Gráfico de distância entre as ligações da matriz de dissimilaridade.



Fonte: o autor.

A amplitude máxima na distância de ligação entre grupos, obtida pela matriz de dissimilaridade plotada no dendrograma (Figura 14), foi de 1,48, fazendo distinção entre os pares mais distantes, compreendidos pelas variáveis índice de energia do fluxo e área de captação modificada correspondentes aos segmentos do dendrograma 10 e 13 e fator  $I_s$  e declividade correspondentes aos segmentos 6 e 7, sendo estas últimas as variáveis de maior semelhança entre si, com uma variação de apenas 0,17 de distância de ligação, ou 11,55% de dissimilaridade.

Figura 14 – Dendrograma da análise de agrupamento dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos.



Fonte: o autor.

Segundo a ordem de remoção das variáveis (Tabela 17) conservaram-se apenas a 11, 8, 14, 16, 3, 1, 17 que correspondendo respectivamente a: índice topográfico de umidade, aspecto, mde, curvatura plana, precipitação, distância euclidiana e curvatura do perfil.

Pela análise dos resultados da classificação dessas sete variáveis submetidas à *Iso Cluster Unsupervised Classification* presenciou-se uma representação irrealista de classes pedológicas do solo por consequência do uso da variável Aspecto, acarretando em um elevado número de feições de dimensão diminuta quando comparado ao mapa temático de solos por análise das classes pedológicas quanto a sua alocação, distribuição, abrangência e padrões de ocorrência, portanto essa variável foi removida do grupo inicialmente selecionado para classificação.

Após nova simulação com exclusão da variável Aspecto, identificaram-se no novo produto, representações irrealistas provenientes de fortes tendências à geração de classes com padrões da variável precipitação em grandes áreas de

ocorrência, justificando-se também sua remoção. Por fim a simulação seguinte revelou-se estar em conformidade com os padrões naturais das classes edáficas, notando-se a presença de regiões com elevada propensão de representação de certas classes de solo definidas pelo método convencional de classificação dos solos (Figura 15).

Tabela 17 – Ordem de remoção dos atributos topográficos primários, secundários e climáticos pedogenéticos.

| Grupos da AA | Variáveis * | Descrição                       | Ordem de Remoção pela ACP |
|--------------|-------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1            | 1           | Distância Euclidiana            | NR <sup>*1</sup>          |
|              | 2           | Relevo Relativo                 | 8                         |
| 2            | 6           | Fator LS                        | 9                         |
|              | 7           | Declividade                     | 7                         |
|              | 12          | Declive de Captação Modificada  | 3                         |
|              | 14          | Modelo Digital de Elevação      | 12 <sup>*k</sup>          |
| 3            | 8           | Aspecto                         | 6 <sup>*k</sup>           |
| 4            | 16          | Curvatura Plana                 | 11 <sup>*k</sup>          |
| 5            | 3           | Precipitação                    | 15 <sup>*k</sup>          |
|              | 5           | Radiação Solar                  | 13                        |
|              | 4           | Temperatura                     | 14                        |
| 6            | 9           | Comprimento do Caminho de Fluxo | 5                         |
|              | 15          | Curvatura Tangencial            | 10                        |
|              | 17          | Curvatura do Perfil             | NR <sup>*2</sup>          |
| 7            | 10          | Índice de Energia do Fluxo      | 1                         |
|              | 13          | Área de Captação Modificada     | 2                         |
|              | 11          | Índice Topográfico de Umidade   | 4 <sup>*k</sup>           |

\*Para melhor disposição, a ordenação das variáveis segue a sequência do dendrograma.

\*Última variável removida dentro do grupo e, portanto, selecionada para classificação do mapa de pedopaisagens.

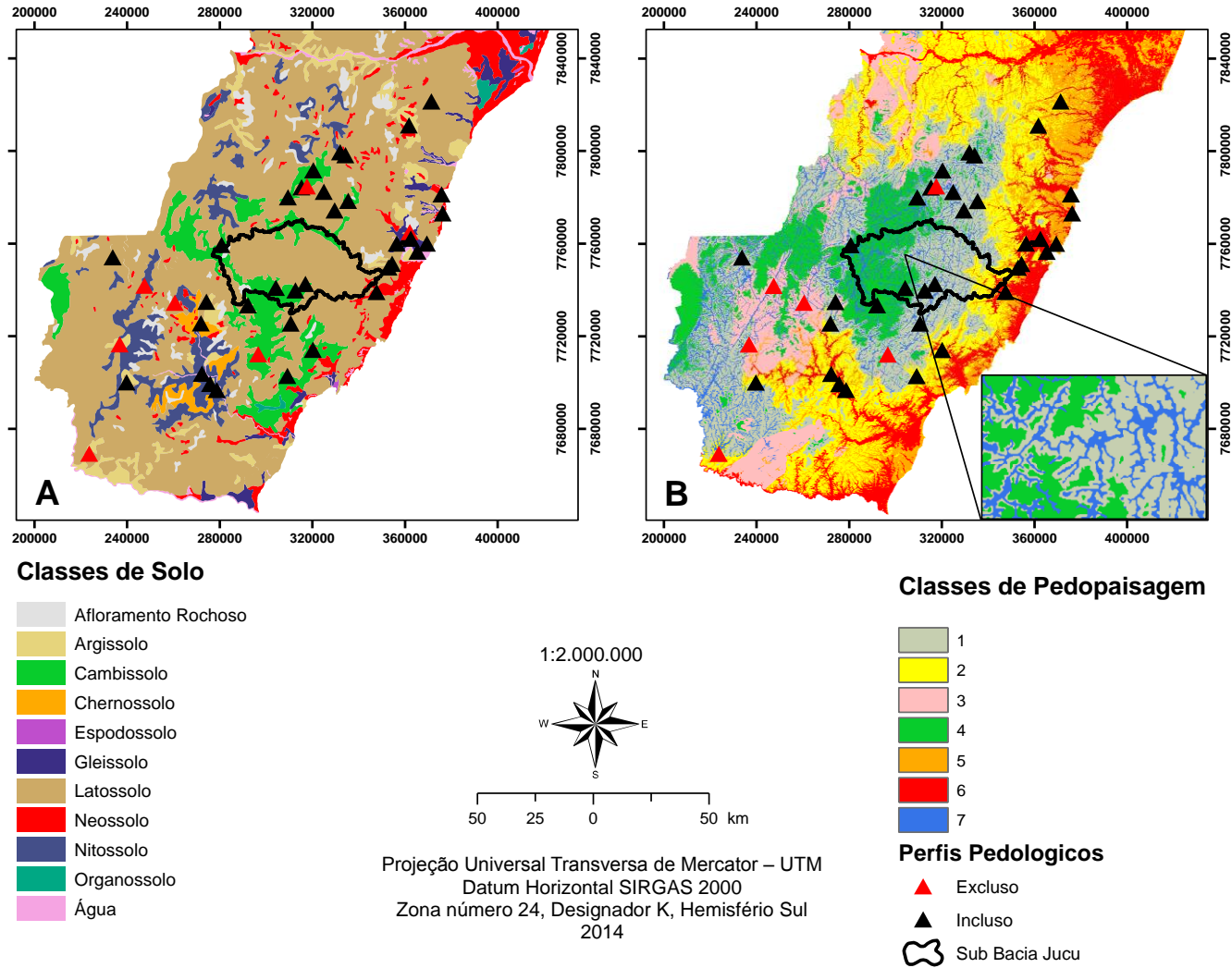
<sup>1,2</sup> Variáveis mais explicativas pela ACP e “Não Removidas” por empate no método.

Ressalta-se que a intensão na elaboração das classes de pedopaisagens do solo não foi a definição de classes pedológicas como usualmente tem sido feito, mas sim o delineamento de áreas inominadas com características físico-hídricas e termodinâmicas semelhantes, o que foi certamente alcançado pela intrínseca correlação da seleção final das variáveis com tais características, com base nos seguintes processos físicos: gradiente de fluxo lateral e aceleração em direção aos corpos d’água, gradiente climático local, convergência e divergência de fluxo d’água, conteúdo de água no solo, potencial energético, distribuição espacial da umidade, previsão de zonas de saturação, e aceleração dos fluxos laterais pelo gradiente natural do relevo.

Carvalho Junior, (2011) ao avaliar o Algoritmo de Máxima Verossimilhança para o mapeamento de paisagens do solo com adoção de variáveis topográficas, obteve 65,9% de precisão para o método de amostragem sistemática considerando sua área de estudo em relação ao mapa de referência. Pineda (2008), porém, sem a intenção de simular as classes de solo, mas no intuito de separá-las com referência a suas características hidráulicas, adotou o descritor de terreno, HAND (*Height Above the Nearest Drainage* – desnível acima da drenagem mais próxima), que se baseia na direção de fluxo e na rede de drenagem, para definir o mapa temático de solos para o modelo DHSVM, ressalta-se, porém que nenhum desses autores adotou critérios estatísticos para a seleção das variáveis mais preditivas e não redundantes em seu mapeamento.

De um total de 45 perfis, distribuídos na bacia e em áreas circunvizinhas (Figura 15), utilizou-se apenas 36, selecionados para obtenção das variáveis edáficas. A remoção de 9 perfis, considerados não representativos da área de estudo, ocorreu tanto pelas limitações das funções de pedotransferência, no que se refere ao cálculo dos valores de algumas variáveis considerados extremos, como por consulta a especialistas familiarizados com a região, que sob análise, identificaram-se os perfis com valores discrepantes e/ou com elevado afastamento da área de estudo.

Figura 15 – Mapa de classes de solo do Sul do ES (A) e de pedopaisagem (B).



Fonte: o autor.

Os motivos que inibiram a escolha de qualquer decisão diferente daquela que foi tomada quanto a obtenção do mapa de pedopaisagens e dos parâmetros edáficos, ainda que sob a pena de má distribuição dos pontos amostrais nas diferentes classes de pedopaisagem, foram: a impossibilidade da coleta pessoal de dados; a indisponibilidade de fornecimento dos mesmos por instituições privadas ou, ainda, por órgãos governamentais; as possíveis discrepâncias nos valores de dados com origem ainda mais distante do que os apresentados; a ausência de georreferenciamento dos pontos em grande parte das fontes; e, em última instância, a simples ausência de tais informações dentro dos limites dos divisores topográficos da bacia.

Os valores obtidos dos parâmetros do solo, para cada classe de pedopaisagem, em cada uma das três camadas de profundidades do solo, podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros pré-calibração e respectivos valores das classes de pedopaisagem para o DHSVM.

| Parâmetros                 | Unidade        | Classes de Pedopaisagem |         |         |         |         |         |
|----------------------------|----------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                            |                | 1                       | 2       | 4       | 5       | 6       | 7       |
| $K_s$ ( $\times 10^{-5}$ ) | $m s^{-1}$     | 4,06                    | 2,46    | 2,17    | 2,82    | 4,66    | 2,71    |
| f                          | adm.*          | 0,27                    | 0,33    | 0,23    | 0,11    | 0,23    | 0,14    |
| $I_M$                      | $m s^{-1}$     | 0,00014                 | 0,00009 | 0,00008 | 0,00010 | 0,00017 | 0,00010 |
| $\alpha_s$                 | adm.           | 0,17                    | 0,19    | 0,16    | 0,21    | 0,21    | 0,17    |
| K                          | Camadas        | 3                       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       |
| $\Phi$                     | $cm^3 cm^{-3}$ | 0,52                    | 0,48    | 0,52    | 0,45    | 0,49    | 0,54    |
|                            |                | 0,49                    | 0,47    | 0,54    | 0,49    | 0,49    | 0,53    |
|                            |                | 0,48                    | 0,47    | 0,55    | 0,52    | 0,49    | 0,51    |
| m                          | adm.           | 0,47                    | 0,46    | 0,46    | 0,50    | 0,42    | 0,35    |
|                            |                | 0,53                    | 0,43    | 0,49    | 0,49    | 0,46    | 0,38    |
|                            |                | 0,49                    | 0,40    | 0,49    | 0,46    | 0,46    | 0,35    |
| $\Psi_b$                   | $kPa^{-1}$     | 0,95                    | 0,63    | 0,53    | 0,84    | 1,84    | 1,01    |
|                            |                | 0,73                    | 0,35    | 0,40    | 0,66    | 1,71    | 0,62    |
|                            |                | 0,61                    | 0,45    | 0,37    | 0,55    | 0,89    | 0,63    |
| $\theta_r$                 | $cm^3 cm^{-3}$ | 0,52                    | 0,47    | 0,52    | 0,45    | 0,49    | 0,54    |
|                            |                | 0,48                    | 0,47    | 0,54    | 0,48    | 0,49    | 0,52    |
|                            |                | 0,49                    | 0,48    | 0,55    | 0,52    | 0,49    | 0,52    |
| $\theta_c$ (10 kPa)        | $cm^3 cm^{-3}$ | 0,24                    | 0,25    | 0,31    | 0,22    | 0,21    | 0,31    |
|                            |                | 0,26                    | 0,33    | 0,36    | 0,28    | 0,28    | 0,33    |
|                            |                | 0,28                    | 0,32    | 0,37    | 0,31    | 0,28    | 0,31    |
| $\theta_{wp}$              | $cm^3 cm^{-3}$ | 0,18                    | 0,19    | 0,25    | 0,17    | 0,14    | 0,23    |
|                            |                | 0,22                    | 0,27    | 0,30    | 0,22    | 0,22    | 0,25    |
|                            |                | 0,22                    | 0,25    | 0,31    | 0,23    | 0,20    | 0,22    |
| $D_a$                      | $kg m^{-3}$    | 1163                    | 1293    | 1227    | 1363    | 1307    | 1133    |
|                            |                | 1211                    | 1332    | 1211    | 1289    | 1339    | 1210    |
|                            |                | 1272                    | 1361    | 1199    | 1256    | 1308    | 1275    |
| $K_v$ ( $\times 10^{-5}$ ) | $m s^{-1}$     | 4,06                    | 2,46    | 2,17    | 2,82    | 4,66    | 2,71    |
|                            |                | 2,76                    | 1,07    | 1,50    | 2,31    | 2,93    | 1,99    |
|                            |                | 2,26                    | 1,40    | 1,38    | 2,13    | 2,55    | 2,32    |

\*Termo “adimensional” abreviado.

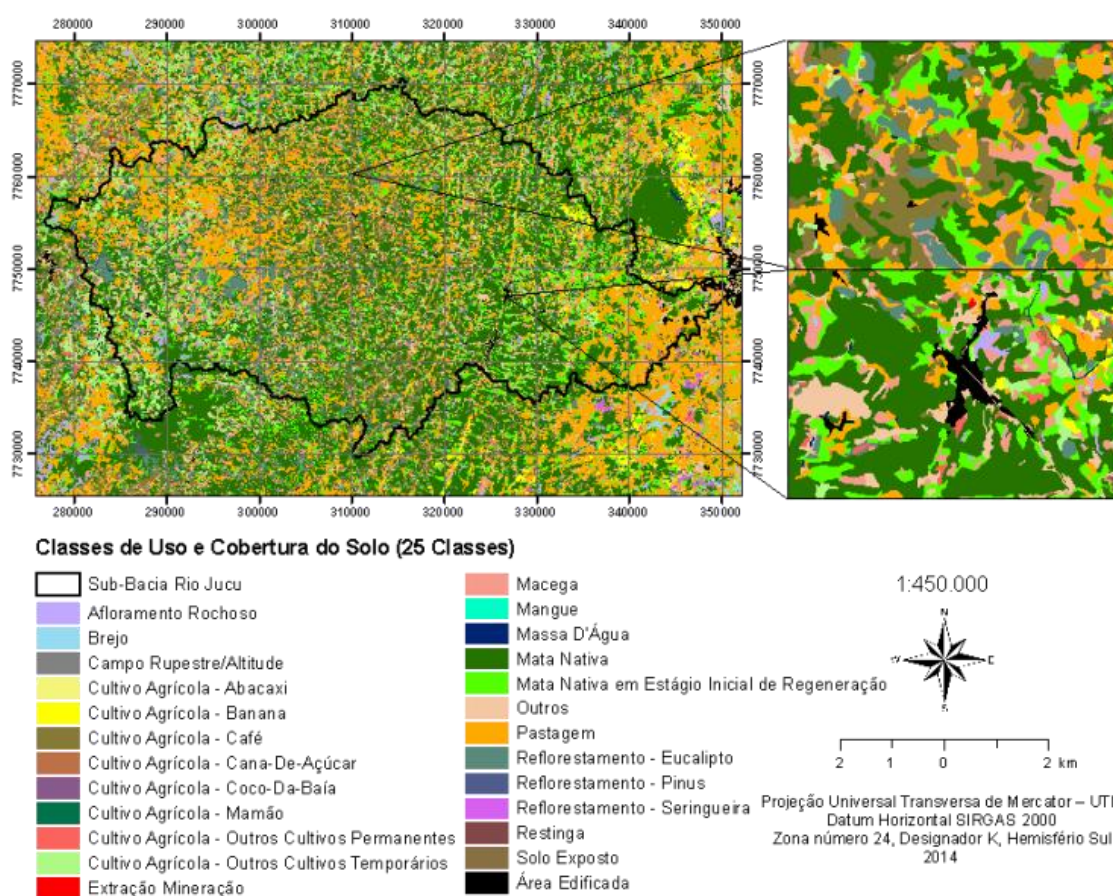
### 5.3 PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO

A edição realizada no mapa temático de vegetação (Figura 16) permitiu conciliar um melhor detalhamento da classe de florestas nativas, além de remoção imparcial de classes indeterminadas e generalização daquelas com propriedades semelhantes. Esse procedimento possibilitou a captura da variação espacial de padrões e a superação da complexa obtenção dos valores médios de cada classe, em função da baixa resolução espacial de algumas das fontes de dados.

Os procedimentos adotados para adequação do mapa de uso e cobertura do

solo permitiram explorar seu melhor desempenho em conciliação ao modelo DHSVM e às restrições dos dados disponíveis. Pelas Figuras 16 a 18 observam-se as diferentes transições até a obtenção do mapa ilustrado na Figura 19, que trata de uma combinação das classes de solo e de cobertura do solo. Neste mapa o número de classes aumentou expressivamente, passando a ser composto de 76 classes, e o mesmo, foi o produto utilizado como mapa temático de entrada do modelo.

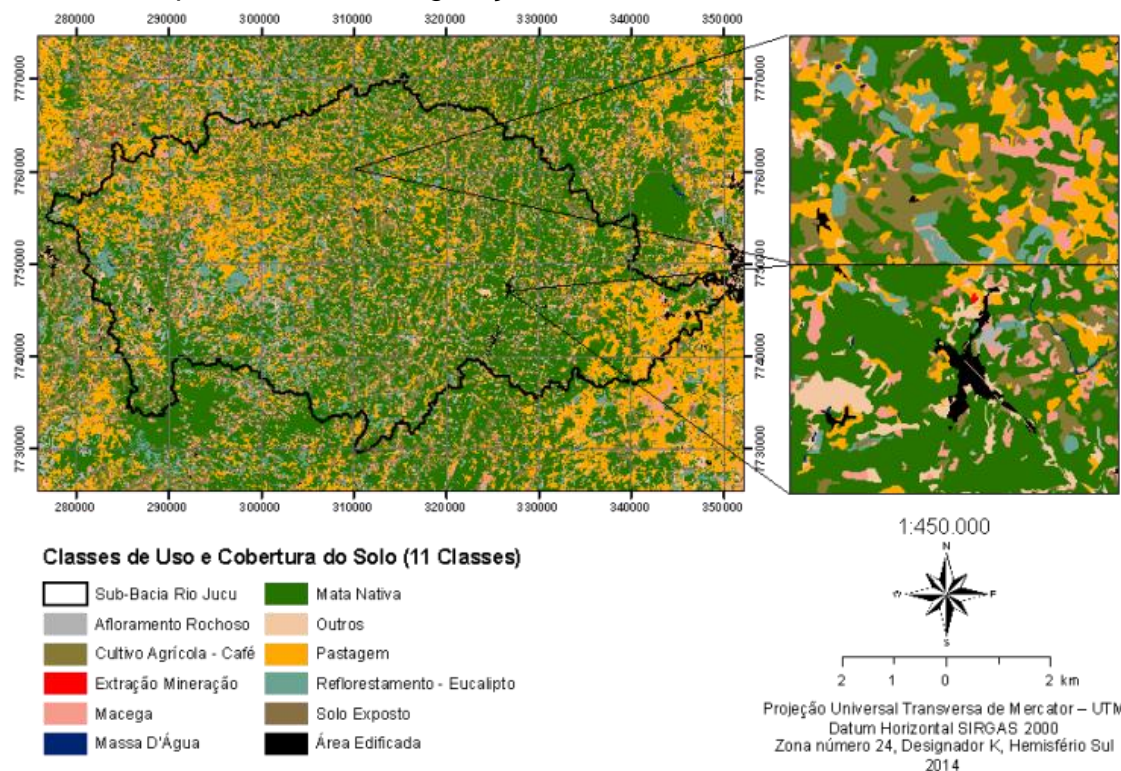
Figura 16 – Mapa temático de vegetação original com 25 classes de uso e cobertura do solo.



Fonte: o autor.

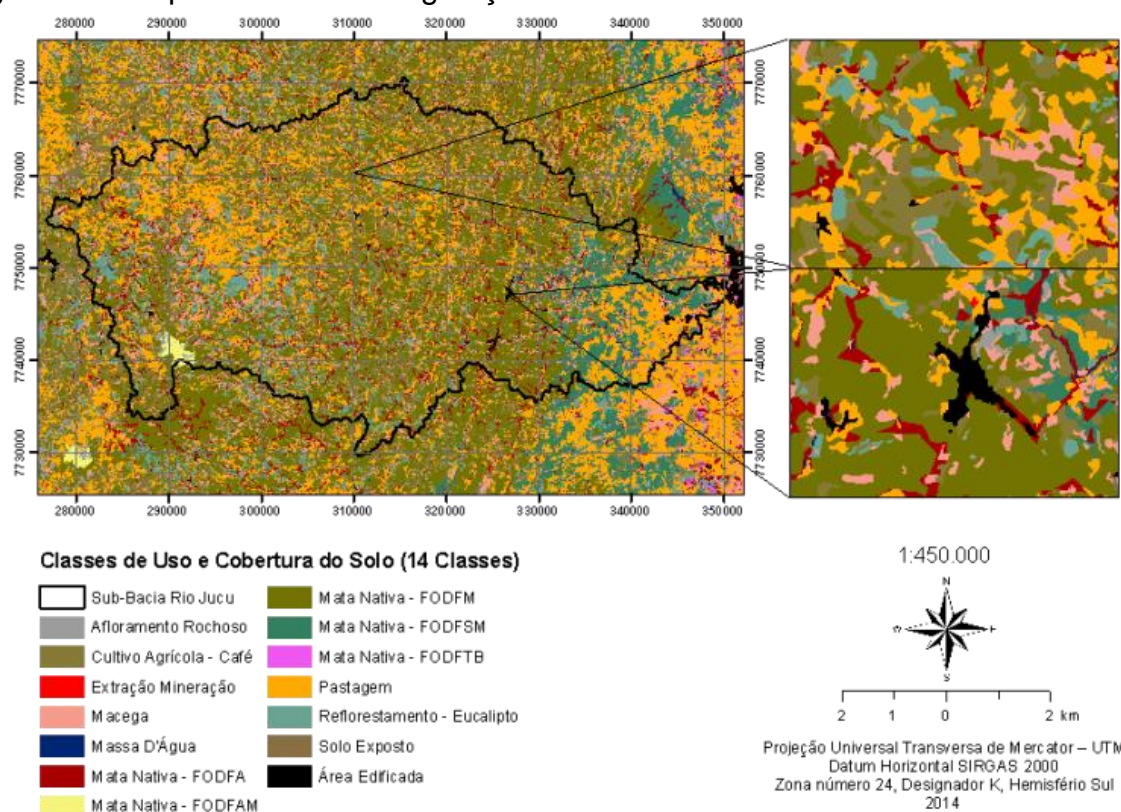


Figura 17 – Mapa temático de vegetação com 11 classes de uso e cobertura do solo.



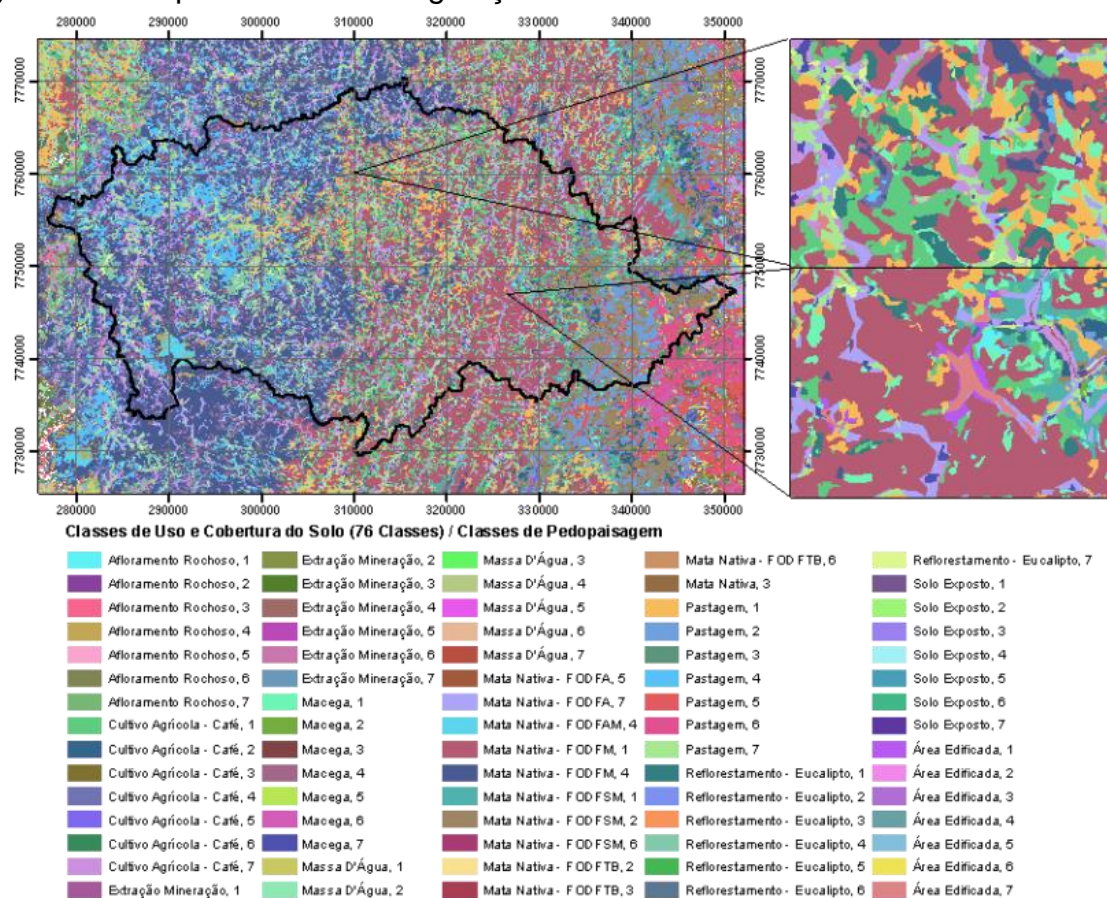
Fonte: o autor.

Figura 18 - Mapa temático de vegetação com 14 classes de uso e cobertura do solo.



Fonte: o autor.

Figura 19 – Mapa temático de vegetação com 76 classes de uso e cobertura do solo.

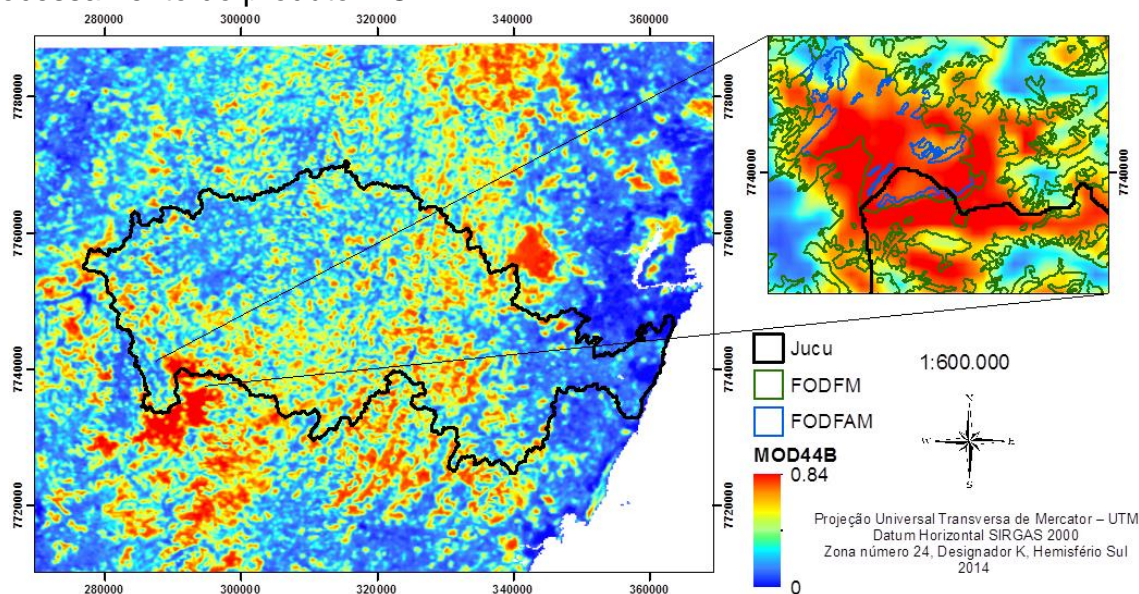


Fonte: o autor.

As variáveis do modelo foram obtidas de igual modo para todas as classes correspondentes ao penúltimo mapa (14 classes), porém para o cálculo das variáveis  $\theta^*$ ,  $d$  e  $f_r$  foi necessária a subdivisão de cada classe do mapa de uso do solo, pelas respectivas classes de pedopaisagens a qual encontrava-se inserida, justificando, portanto, o uso do mapa temático de vegetação com 76 classes.

Na Figura 20 pode ser contemplada a densidade da cobertura vegetal obtida pelo produto MOD44B, na qual se observam os padrões naturais de uso e cobertura do solo, sendo capturado com variações transicionais abruptas, permitindo a obtenção do valor médio mais próximo do real para cada uma das classes de uso do solo. Para cálculo do valor dessas variáveis, além dos polígonos dentro dos divisores topográficos da BHRJ, optou-se também pelas áreas adjacentes até a região de descontinuação da extensão dos polígonos internos, partindo do pressuposto de que não há variações significativas dentro da extensão de ocorrência desses polígonos por influência dos limites da bacia.

Figura 20 – Proporção da densidade da cobertura vegetal obtida pelo processamento do produto MOD44B.



Fonte: o autor.

Quando comparados ao valor médio dos polígonos de maior dimensão em cada classe, os polígonos com área correspondente a duas células do produto MOD44B foram considerados como representativos da categoria, pela baixa variação na amplitude dos valores. Portanto, não houve necessidade de readequação das feições poligonais das classes para representação de maior cobertura espacial.

Para as classes de FOD, o número de camadas do solo no qual ocorrem raízes foi definido com base no valor máximo médio de profundidade do sistema radicular em cada camada, tendo como fonte as informações pedológicas referentes ao nível de abundância de raízes ao longo dos perfis, obtidos do levantamento realizado no projeto RADAMBRASIL. Para tanto, foram selecionados os seis perfis disponíveis na região, com ocorrência em áreas nas quais o uso atual correspondesse a formações florestais do bioma Mata Atlântica. Além do número de camadas com ocorrência de raízes, pôde-se definir também, pelo valor médio, até que profundidade limite na camada mais profunda do solo deveria ser calculada a fração de raízes, tendo sido obtida como profundidade média máxima 174 cm. Pela equação logarítmica, ajustada aos dados (Tabela 19), foi possível obter o valor pontual para os limites inferiores de cada camada do solo.

Para a classe de uso do solo café, a proporção da densidade de raízes abaixo de 1,5 metros de profundidade foi considerada insignificante, tendendo a valores

iguais pela estabilização da curva da equação logarítmica proposta por Barreto et al. (2005). Assim, optou-se por não calcular a proporção de raízes para a terceira camada, limitando-se a segunda camada, com no mínimo 143 cm e máximo de 167 cm de profundidade para as seis classes de solo presentes na bacia.

Semelhantemente para a classe café, a classe pastagem não ultrapassou a segunda camada do solo, tendendo a estabilização do valor limite a um metro de profundidade; porém, com uma proporção de raízes com ocorrência acima de 99% concentradas na primeira camada, pela equação de Costa et al. (2000). Já para a classe eucalipto, a estabilização da curva, obtida por equação potencial, se deu a 230 cm de profundidade, pela média de duas equações propostas por Grant et al. (2012). Ressalta-se que todas as equações obtiveram um  $r^2$  superior a 0,95, com um excelente ajuste da curva de tendência às equações logarítmicas, exponenciais e potenciais, para as diferentes coberturas vegetais.

Tabela 19 – Equações de ajuste para a profundidade de enraizamento de diferentes espécies vegetais.

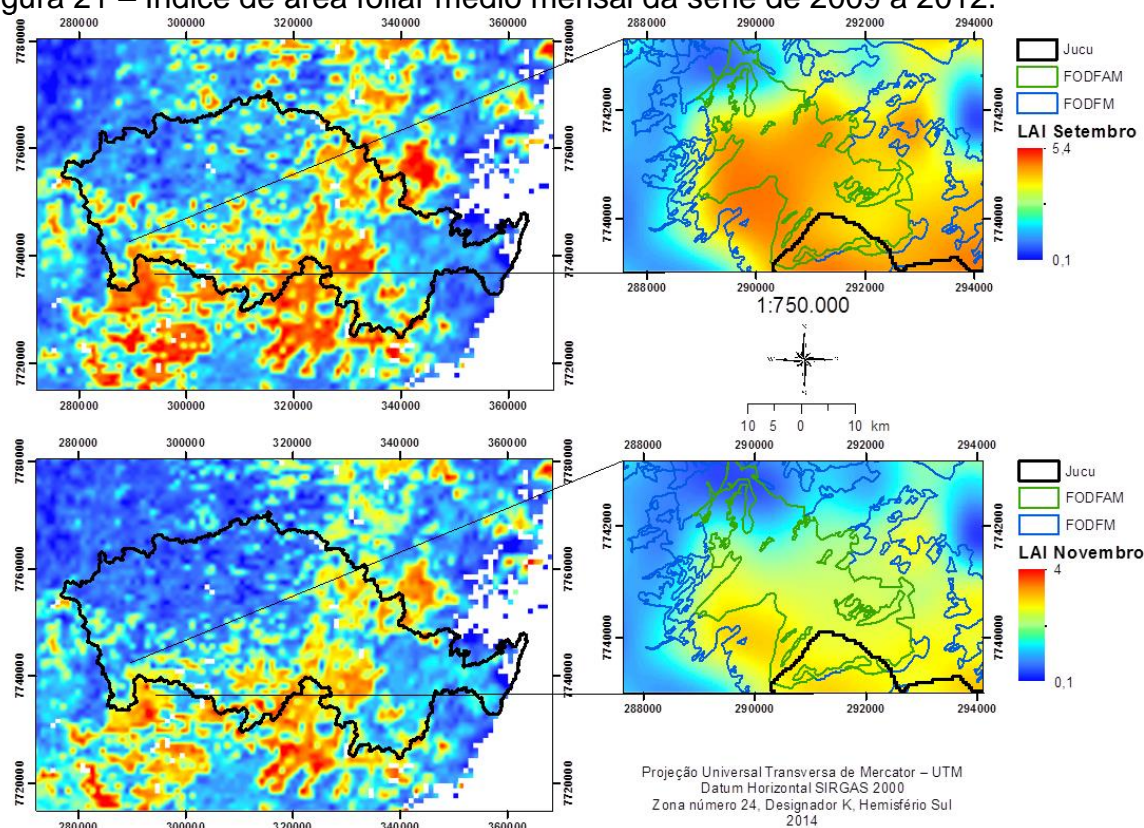
| <b>Classe Temática</b> | <b>Equação</b>              | <b><math>r^2</math></b> | <b>Fonte</b>          |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Floresta               | $Y = 1,164\ln(X) - 0,8853$  | 0,9753                  | Autor                 |
| Café                   | $Y = 1,0046\ln(X) - 1,8963$ | 0,9920                  | BARRETO et al. (2005) |
| Eucalipto1             | $Y = 1 - 0,966^X$           | 0,9670                  | GRANT, et al. (2012)  |
| Eucalipto2             | $Y = 1 - 0,965^X$           | 0,9590                  | GRANT, et al. (2012)  |
| Pastagem               | $Y = 6,8407e^{(-5,9061X)}$  | 0,9493                  | COSTA. et al. (2000)  |

O IAF obtido do produto MCD15A3 – do sensor MODIS, correspondente à série histórica adotada pelo DHSVM com resolução temporal de 4 dias – resultou em valores de alta representatividade mensal dessa variável para a área de estudo, pelo uso de aproximadamente 8 medições mensais para cada ano e 30 medições mensais para a série histórica. Portanto, apesar de ser um produto que se encontra disponível em uma resolução espacial inferior ao MOD44B, ainda assim seu uso é mais apropriado que os métodos diretos de medição (*in loco*), quando se leva em consideração: a dimensão da área de estudo; a densidade amostral; a alta variabilidade na composição do uso e cobertura do solo; a frequência mínima mensal de medição; ou simplesmente a disponibilidade de produto de melhor resolução espacial, mantendo-se a resolução temporal mínima e abrangência territorial correspondente.

Por terem sido selecionadas apenas as feições poligonais de uso e cobertura do solo com no mínimo 1 km<sup>2</sup> (tamanho regular da célula do raster MCD15A3),

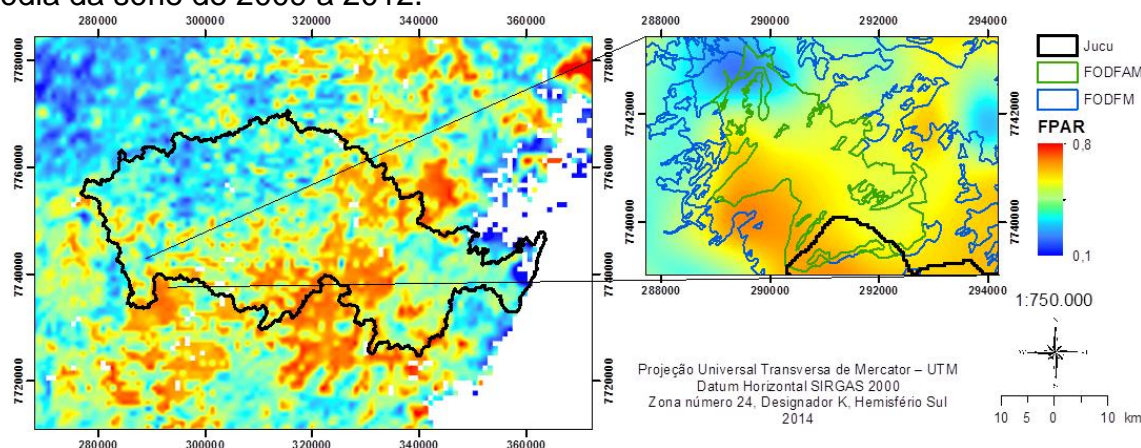
julgou ser necessário adotar uma área circunvizinha à bacia, com “buffer” de aproximadamente 15 km, para melhor representatividade da área de estudo, tanto para o IAF (Figura 21) quanto para FRFA (Figura 22). Ressalta-se que os resultados obtidos da comparação do cálculo do IAF com uso de técnicas de sensoriamento remoto – como a de Allen et al. (2002), no processamento digital de imagens orbitais, mesmo com resolução espacial mais refinada, quando comparados ao MOD15A3 – foram subestimados em até 60% para a área considerada (resultados não apresentados) quando comparado a média histórica calculada, obtida pelo sensor MODIS.

Figura 21 – Índice de área foliar médio mensal da série de 2009 a 2012.



Fonte: o autor.

Figura 22 – Fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação média da série de 2009 a 2012.



Fonte: o autor.

Em reafirmação ao pressuposto de que não há variações significativas dentro da extensão de ocorrência dos polígonos adjacentes à bacia, e em função da inevitável remoção de partes da imagem pela ocorrência de nuvens e sombras de nuvens, realizou-se o cálculo para aquisição da variável albedo sem exclusão de tais polígonos externos, pois em alguns casos as áreas descartadas das imagens chegaram a representar 36% da área total da bacia, no entanto, sem comprometimento integral de qualquer classe de uso e cobertura do solo para qualquer um dos meses. Em função das condições climáticas locais, as imagens referentes aos meses de secos apresentaram mínimas ou nenhuma ocorrência de nuvens.

O método proposto por Polidório et al. (2005), para detecção automática de nuvens e sombra, apesar de simples aplicação, apresentou resultados satisfatórios, sendo condizente com o limiar de segurança proposto pelo método, permitindo ainda flexibilidade para calibração dos pesos, independência das características do relevo e mínima remoção das regiões com ausência de nuvens.

É variável o requerimento do modelo quanto aos parâmetros de uso e cobertura do solo em função da ocorrência de uma, duas ou nenhuma camada de vegetação (dossel superior, sub-bosque ou ausência de vegetação arbustivo-arbórea). Assim, foi considerada a presença de sub-bosque apenas para as classes FOD, e ausência de dossel superior para as classes pastagem e café. Mediante o particular requerimento de variáveis ao modelo, obtiveram-se os valores, para cada classe de vegetação, apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Parâmetros pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo para o DHSVM.

|                    | Café              | FODFAM | FODFM   | FODFSM  | FODFTB  | FODFA   | Pasto   | Ref. Eucalipto | Área Edific. | Macega |      |
|--------------------|-------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|--------------|--------|------|
| c                  | -                 | 0,72   | 0,53    | 0,49    | 0,26    | 0,42    | 0,2     | 0,50           | -            | 0,31   |      |
| h <sub>T</sub>     | adm.              | -      | 0,84    | 0,71    | 0,61    | 0,67    | 0,83    | -              | 0,44         | -      |      |
| n <sub>a</sub>     | -                 | 2,50   | 2,50    | 2,50    | 2,50    | 2,50    | -       | 2,50           | -            | -      |      |
| K <sub>b</sub>     | -                 | 0,70   | 0,70    | 0,70    | 0,70    | 0,70    | -       | 0,50           | -            | -      |      |
| h <sub>O</sub>     | m                 | -      | 6,33    | 12,37   | 18,00   | 27,00   | 12,00   | -              | 22           | -      |      |
| h <sub>U</sub>     | -                 | 1,28   | 0,91    | 1,78    | 2,59    | 3,89    | 1,73    | 0,21           | -            | 0,33   |      |
| r <sub>smaxO</sub> | -                 | 5000   | 5000    | 5000    | 5000    | 5000    | -       | 5000           | -            | -      |      |
| r <sub>smaxU</sub> | s m <sup>-1</sup> | 5000   | 2788    | 2788    | 2788    | 2788    | 5000    | -              | -            | 5000   |      |
| r <sub>sminO</sub> | -                 | 153    | 153     | 153     | 153     | 153     | -       | 125            | -            | -      |      |
| r <sub>sminU</sub> | -                 | 175    | 153     | 153     | 153     | 153     | 165     | -              | -            | 165    |      |
| e <sub>mO</sub>    | Pa                | -      | 3663    | 3663    | 3663    | 3663    | -       | 2128           | -            | -      |      |
| e <sub>m_U</sub>   | -                 | 3636   | 3663    | 3663    | 3663    | 3663    | 4202    | -              | -            | 4202   |      |
| R <sub>pcO</sub>   | W m <sup>-2</sup> | -      | 0,63    | 0,63    | 0,64    | 0,67    | -       | 0,70           | -            | -      |      |
| R <sub>pcU</sub>   | -                 | 0,53   | 0,00091 | 0,00090 | 0,00093 | 0,00097 | 0,00097 | 0,51           | -            | 0,53   |      |
| K                  | unid.             | 3      | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 3              | 3            | 3      |      |
| IAF <sub>O1</sub>  | -                 | 1,69   | 3,18    | 2,88    | 2,94    | 3,30    | 3,28    | 1,59           | 3,84         | 0,96   | 1,67 |
| IAF <sub>O2</sub>  | -                 | 1,69   | 3,26    | 3,05    | 3,13    | 3,55    | 3,57    | 1,51           | 4,14         | 0,96   | 1,95 |
| IAF <sub>O3</sub>  | -                 | 1,67   | 3,04    | 3,03    | 3,12    | 3,26    | 3,30    | 1,56           | 3,86         | 1,01   | 1,78 |
| IAF <sub>O4</sub>  | -                 | 2,03   | 4,00    | 3,59    | 3,60    | 3,63    | 3,73    | 1,78           | 4,51         | 1,09   | 2,01 |
| IAF <sub>O5</sub>  | -                 | 2,10   | 3,64    | 3,44    | 3,54    | 3,54    | 3,63    | 1,83           | 4,37         | 1,08   | 2,01 |
| IAF <sub>O6</sub>  | adm.              | 1,97   | 3,84    | 3,50    | 3,43    | 3,36    | 3,57    | 1,65           | 4,39         | 0,97   | 1,92 |
| IAF <sub>O7</sub>  | -                 | 1,88   | 4,04    | 3,51    | 3,33    | 3,29    | 3,50    | 1,51           | 4,37         | 0,91   | 1,87 |
| IAF <sub>O8</sub>  | -                 | 1,67   | 3,98    | 3,13    | 2,98    | 2,96    | 3,11    | 1,35           | 3,97         | 0,78   | 1,68 |
| IAF <sub>O9</sub>  | -                 | 1,62   | 3,75    | 3,21    | 3,06    | 3,20    | 3,23    | 1,29           | 3,88         | 0,80   | 1,71 |
| IAF <sub>O10</sub> | -                 | 1,18   | 2,47    | 2,25    | 2,38    | 2,76    | 2,63    | 1,09           | 2,73         | 0,70   | 1,42 |
| IAF <sub>O11</sub> | -                 | 1,18   | 2,31    | 2,08    | 2,17    | 2,58    | 2,47    | 1,17           | 2,61         | 0,78   | 1,31 |
| IAF <sub>O12</sub> | -                 | 1,59   | 2,91    | 2,75    | 2,92    | 3,00    | 3,05    | 1,52           | 3,32         | 0,91   | 1,62 |
| IAF <sub>U1</sub>  | -                 | -      | 0,0046  | 0,0041  | 0,0042  | 0,0048  | 0,0047  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U2</sub>  | -                 | -      | 0,0047  | 0,0044  | 0,0045  | 0,0051  | 0,0051  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U3</sub>  | -                 | -      | 0,0044  | 0,0044  | 0,0045  | 0,0047  | 0,0048  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U4</sub>  | -                 | -      | 0,0058  | 0,0052  | 0,0052  | 0,0052  | 0,0054  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U5</sub>  | -                 | -      | 0,0053  | 0,0050  | 0,0051  | 0,0051  | 0,0052  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U6</sub>  | adm.              | -      | 0,0055  | 0,0050  | 0,0049  | 0,0048  | 0,0051  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U7</sub>  | -                 | -      | 0,0058  | 0,0051  | 0,0048  | 0,0047  | 0,0050  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U8</sub>  | -                 | -      | 0,0057  | 0,0045  | 0,0043  | 0,0043  | 0,0045  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U9</sub>  | -                 | -      | 0,0054  | 0,0046  | 0,0044  | 0,0046  | 0,0047  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U10</sub> | -                 | -      | 0,0036  | 0,0032  | 0,0034  | 0,0040  | 0,0038  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U11</sub> | -                 | -      | 0,0033  | 0,0030  | 0,0031  | 0,0037  | 0,0036  | -              | -            | -      | -    |
| IAF <sub>U12</sub> | -                 | -      | 0,0042  | 0,0040  | 0,0042  | 0,0043  | 0,0044  | -              | -            | -      | -    |
| α <sub>O1</sub>    | adm.              | 0,15   | 0,11    | 0,12    | 0,14    | 0,15    | 0,17    | 0,17           | 0,13         | 0,21   | 0,14 |
| α <sub>O2</sub>    | -                 | 0,15   | 0,11    | 0,12    | 0,13    | 0,14    | 0,13    | 0,17           | 0,13         | 0,20   | 0,14 |
| α <sub>O3</sub>    | -                 | 0,14   | 0,10    | 0,11    | 0,12    | 0,13    | 0,12    | 0,16           | 0,12         | 0,18   | 0,14 |
| α <sub>O4</sub>    | -                 | 0,14   | 0,11    | 0,11    | 0,12    | 0,13    | 0,12    | 0,15           | 0,13         | 0,16   | 0,14 |
| α <sub>O5</sub>    | -                 | 0,14   | 0,09    | 0,10    | 0,11    | 0,13    | 0,11    | 0,15           | 0,12         | 0,17   | 0,13 |
| α <sub>O6</sub>    | -                 | 0,14   | 0,10    | 0,10    | 0,11    | 0,13    | 0,11    | 0,16           | 0,13         | 0,18   | 0,14 |
| α <sub>O7</sub>    | -                 | 0,14   | 0,10    | 0,10    | 0,12    | 0,13    | 0,11    | 0,16           | 0,13         | 0,18   | 0,14 |
| α <sub>O8</sub>    | -                 | 0,14   | 0,09    | 0,10    | 0,11    | 0,13    | 0,11    | 0,15           | 0,12         | 0,18   | 0,13 |
| α <sub>O9</sub>    | -                 | 0,15   | 0,10    | 0,11    | 0,14    | 0,15    | 0,13    | 0,18           | 0,13         | 0,21   | 0,15 |
| α <sub>O10</sub>   | -                 | 0,14   | 0,10    | 0,11    | 0,12    | 0,13    | 0,12    | 0,16           | 0,12         | 0,18   | 0,14 |

(continua)

Tabela 20 - Parâmetros pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo para o DHSVM.

(continuação)

|                | Café | FODFAM  | FODFM   | FODFSM  | FODFTB  | FODFA   | Pasto | Ref. Eucalipto | Área Edific. Macega |      |
|----------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|----------------|---------------------|------|
| $\alpha_{O11}$ | 0,16 | 0,11    | 0,12    | 0,14    | 0,15    | 0,13    | 0,17  | 0,13           | 0,21                | 0,14 |
| $\alpha_{O12}$ | 0,15 | 0,11    | 0,12    | 0,13    | 0,14    | 0,13    | 0,16  | 0,13           | 0,19                | 0,13 |
| $\alpha_{U1}$  | -    | 0,00016 | 0,00018 | 0,00020 | 0,00022 | 0,00025 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U2}$  | -    | 0,00016 | 0,00017 | 0,00018 | 0,00020 | 0,00018 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U3}$  | -    | 0,00015 | 0,00016 | 0,00017 | 0,00019 | 0,00017 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U4}$  | -    | 0,00015 | 0,00016 | 0,00018 | 0,00019 | 0,00017 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U5}$  | -    | 0,00013 | 0,00014 | 0,00016 | 0,00018 | 0,00015 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U6}$  | adm. | 0,00014 | 0,00015 | 0,00016 | 0,00019 | 0,00016 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U7}$  |      | 0,00014 | 0,00015 | 0,00017 | 0,00019 | 0,00016 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U8}$  |      | 0,00014 | 0,00015 | 0,00017 | 0,00019 | 0,00016 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U9}$  |      | 0,00014 | 0,00016 | 0,00019 | 0,00022 | 0,00019 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U10}$ |      | 0,00015 | 0,00016 | 0,00017 | 0,00019 | 0,00017 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U11}$ |      | 0,00016 | 0,00018 | 0,00020 | 0,00021 | 0,00019 | -     | -              | -                   | -    |
| $\alpha_{U12}$ | -    | 0,00016 | 0,00017 | 0,00019 | 0,00021 | 0,00018 | -     | -              | -                   | -    |

Tabela 21 - Parâmetros pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo subdivididas nas classes de pedopaisagens.

| Uso e Cobertura do Solo                                          | Classe de Solo | $\theta^*o$ | $\theta^*u$ | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $f_{rO1}$ | $f_{rO2}$ | $f_{rO3}$ | $f_{rU1}$ | $f_{rU2}$ | $f_{rU3}$ |
|------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                  |                | adm.        |             | m     |       |       | adm.      |           |           | adm.      |           |           |
| Afl. Rochoso/<br>Extração Mineral/<br>Massa D'água/ Solo Exposto | 1              | -           | -           | 0,27  | 1,16  | 0,82  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | 2              | -           | -           | 0,33  | 1,33  | 1,82  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | 4              | -           | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | 5              | -           | -           | 0,28  | 1,24  | 1,80  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | 6              | -           | -           | 0,25  | 1,31  | 2,37  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | 7              | -           | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | -         | -         | -         |
|                                                                  | Café           | 1           | -           | 0,20  | 0,27  | 1,16  | 0,82      | -         | -         | -         | 0,46      | 0,54      |
| 2                                                                |                | -           | 0,23        | 0,33  | 1,33  | 1,82  | -         | -         | -         | 0,50      | 0,50      | 0         |
| 4                                                                |                | -           | 0,28        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,43      | 0,57      | 0         |
| 5                                                                |                | -           | 0,20        | 0,28  | 1,24  | 1,80  | -         | -         | -         | 0,46      | 0,54      | 0         |
| 6                                                                |                | -           | 0,20        | 0,25  | 1,31  | 2,37  | -         | -         | -         | 0,42      | 0,58      | 0         |
| 7                                                                |                | -           | 0,26        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,43      | 0,57      | 0         |
| FODFAM                                                           | 4              | 0,27        | 0,28        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | 0,55      | 0,40      | 0,04      | 0,40      | 0,60      | 0         |
| FODFM                                                            | 1              | 0,20        | 0,21        | 0,27  | 1,16  | 0,82  | 0,58      | 0,38      | 0,04      | 0,40      | 0,60      | 0         |
|                                                                  | 4              | 0,27        | 0,28        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | 0,55      | 0,40      | 0,04      | 0,40      | 0,60      | 0         |
| FODFSM                                                           | 1              | 0,20        | 0,21        | 0,27  | 1,16  | 0,82  | 0,58      | 0,38      | 0,04      | 0,40      | 0,60      | 0         |
|                                                                  | 2              | 0,23        | 0,24        | 0,33  | 1,33  | 1,82  | 0,62      | 0,37      | 0,01      | 0,40      | 0,60      | 0         |
|                                                                  | 6              | 0,19        | 0,20        | 0,25  | 1,31  | 2,37  | 0,55      | 0,42      | 0,02      | 0,40      | 0,60      | 0         |
| FODFTB                                                           | 2              | 0,23        | 0,24        | 0,33  | 1,33  | 1,82  | 0,62      | 0,37      | 0,01      | 0,40      | 0,60      | 0         |
|                                                                  | 6              | 0,19        | 0,20        | 0,25  | 1,31  | 2,37  | 0,55      | 0,42      | 0,02      | 0,40      | 0,60      | 0         |
| FODFA                                                            | 5              | 0,20        | 0,20        | 0,28  | 1,24  | 1,80  | 0,58      | 0,39      | 0,03      | 0,40      | 0,60      | 0         |
|                                                                  | 7              | 0,25        | 0,26        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | 0,55      | 0,40      | 0,04      | 0,40      | 0,60      | 0         |
| Pastagem                                                         | 1              | -           | 0,19        | 0,27  | 1,16  | 0,82  | -         | -         | -         | 0,9990    | 0,0010    | 0         |
|                                                                  | 2              | -           | 0,20        | 0,33  | 1,33  | 1,82  | -         | -         | -         | 0,9996    | 0,0004    | 0         |
|                                                                  | 4              | -           | 0,25        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,9991    | 0,0009    | 0         |
|                                                                  | 5              | -           | 0,18        | 0,28  | 1,24  | 1,80  | -         | -         | -         | 0,9994    | 0,0006    | 0         |

(continua)



Tabela 21 - Parâmetros pré-calibração das classes de uso e cobertura do solo subdivididas nas classes de pedopaisagens.

(continuação)

| Uso e Cobertura do Solo | Classe de Solo | $\theta^*o$ | $\theta^*u$ | $d_1$ | $d_2$ | $d_3$ | $f_{rO1}$ | $f_{rO2}$ | $f_{rO3}$ | $f_{rU1}$ | $f_{rU2}$ | $f_{rU3}$ |
|-------------------------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                         |                | adm.        |             | m     |       |       | adm.      |           |           | adm.      |           |           |
| Pastagem                | 6              | -           | 0,16        | 0,25  | 1,31  | 2,37  | -         | -         | -         | 0,9996    | 0,0004    | 0         |
|                         | 7              | -           | 0,25        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,9991    | 0,0009    | 0         |
| Refl. Eucalipto         | 1              | 0,20        | -           | 0,27  | 1,16  | 0,82  | 0,61      | 0,38      | 0,006     | -         | -         | -         |
|                         | 2              | 0,22        | -           | 0,33  | 1,33  | 1,82  | 0,69      | 0,31      | 0,003     | -         | -         | -         |
|                         | 4              | 0,27        | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | 0,58      | 0,42      | 0,006     | -         | -         | -         |
|                         | 5              | 0,19        | -           | 0,28  | 1,24  | 1,80  | 0,62      | 0,37      | 0,005     | -         | -         | -         |
|                         | 6              | 0,19        | -           | 0,25  | 1,31  | 2,37  | 0,58      | 0,42      | 0,004     | -         | -         | -         |
|                         | 7              | 0,25        | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | 0,58      | 0,42      | 0,006     | -         | -         | -         |
| Área Edificada          | 1              | 0,20        | -           | 0,27  | 1,16  | 0,82  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
|                         | 2              | 0,23        | -           | 0,33  | 1,33  | 1,82  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
|                         | 4              | 0,27        | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
|                         | 5              | 0,20        | -           | 0,28  | 1,24  | 1,80  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
|                         | 6              | 0,19        | -           | 0,25  | 1,31  | 2,37  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
|                         | 7              | 0,25        | -           | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,44      | 0,30      | 0,02      |
| Macega                  | 1              | -           | 0,19        | 0,27  | 1,16  | 0,82  | -         | -         | -         | 0,9990    | 0,00105   | 0         |
|                         | 2              | -           | 0,20        | 0,33  | 1,33  | 1,82  | -         | -         | -         | 0,9996    | 0,00039   | 0         |
|                         | 4              | -           | 0,25        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,9991    | 0,00093   | 0         |
|                         | 5              | -           | 0,18        | 0,28  | 1,24  | 1,80  | -         | -         | -         | 0,9994    | 0,00064   | 0         |
|                         | 6              | -           | 0,16        | 0,25  | 1,31  | 2,37  | -         | -         | -         | 0,9996    | 0,00043   | 0         |
|                         | 7              | -           | 0,25        | 0,25  | 1,18  | 0,87  | -         | -         | -         | 0,9991    | 0,00093   | 0         |

## 5.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O MODELO DHSVM

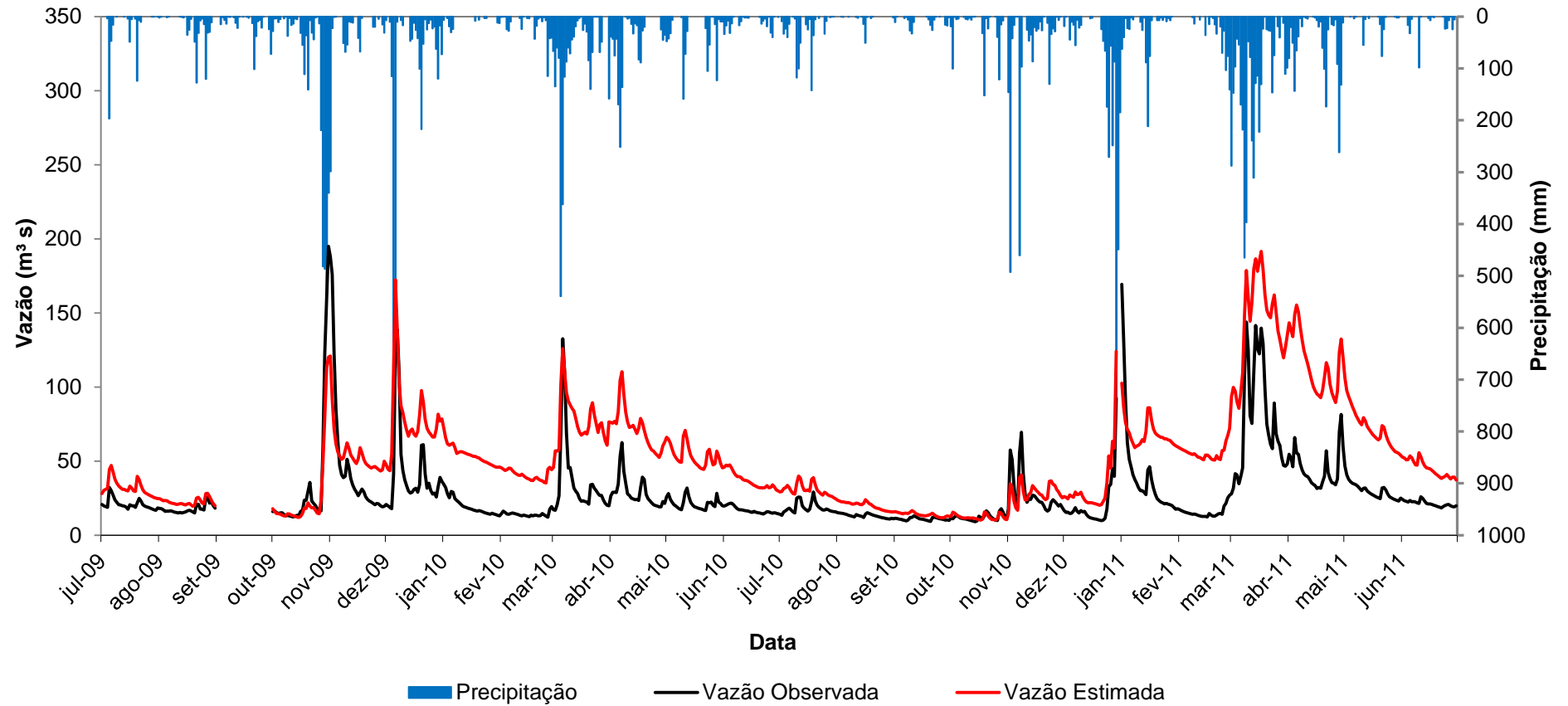
### 5.4.1 Simulação sem calibração do modelo DHSVM

Na Figura 23 são apresentadas as vazões diárias observadas, e simuladas pelo DHSVM na bacia do rio Jucu, na estação fluviométrica Fazenda Jucuruaba, para um período de dois anos, de julho de 2009 a julho de 2011. Considerando-se esses resultados preliminares do modelo, obtidos antes da calibração, é possível ponderar sobre o nível de adequação das metodologias utilizadas para obtenção dos dados de entrada do modelo, a qualidade das fontes desses dados, a necessidade de calibração do modelo e o nível de esforços que demandará tal calibração, fatores estes, descritos com mais detalhes adiante.

É evidente a capacidade do modelo em acompanhar as tendências das vazões observadas, porém com expressiva superestimação das vazões e

incapacidade de representar adequadamente a curva de recessão da vazão após o período de cheia, havendo estabilização das vazões ao escoamento de base apenas no final do ano, comportamento que pode ser observado claramente nos dados simulados no período de novembro de 2009 a novembro de 2010. A dificuldade de representar a curva de recessão, devido à superestimação do escoamento de base, também pode ser observada nos trabalhos realizados por Cuo et al. (2008), Cuo et al. (2006) e Pineda (2008), porém, em tais trabalhos esta variação é menos expressiva, ou seja, a magnitude dos erros é menor devido a maior acurácia dos dados de entrada. No presente caso, por análise dos demais resultados de saída do modelo, esse comportamento está diretamente relacionado ao conteúdo e movimento de água subsuperficial no solo, influenciado majoritariamente pela porosidade e condutividade hidráulica lateral do solo saturado, havendo, portanto uma excessiva descarga do fluxo de base.

Figura 23 – Precipitações e vazões diárias observadas na estação Fazenda Jucuruaba, ocorridas na bacia do rio Jucu, e vazões simuladas pelo modelo DHSVM.



Fonte: o autor.

Os resultados desta simulação foram considerados não satisfatórios, em constatação tanto pela análise gráfica como pelos índices estatísticos (Tabela 22), dos quais apenas o coeficiente de determinação apresentou-se um pouco acima do nível mínimo de satisfação, por adequação média de precisão da estimação, devido à compensação dos erros, proporcionada exclusivamente pela capacidade do modelo em captar as tendências dos picos de vazão.

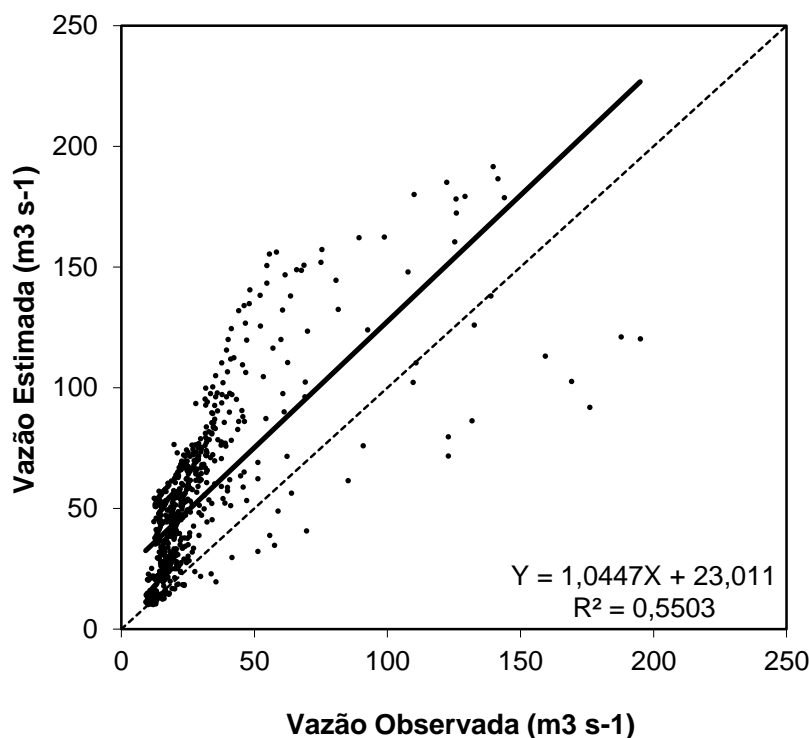
A vazão média simulada foi superestimada em aproximadamente duas vezes quando comparada com a vazão observada, apresentando valores na ordem de  $51,70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , enquanto a real não ultrapassou  $27,46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Tabela 22 – Índices estatísticos do desempenho do modelo DHSVM (não calibrado) para os dados de vazão da estação Fazenda Jucuruaba.

| <b>Índices diagnósticos</b>                   | <b>Sigla</b> | <b>Valor</b> | <b>Satisfatório</b>             |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|---------------------------------|
| Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe | NSE          | -0,7797      | >0,36                           |
| NSE ajustado                                  | NSE'         | -0,6561      | >0,36                           |
| Percentual de tendência (%)                   | PBIAS        | -88,26       | $-25 \leq \text{PBIAS} \leq 25$ |
| Erro padrão médio normalizado                 | RSR          | 1,3702       | $\leq 0,7$                      |
| Coeficiente de determinação                   | $r^2$        | 0,5503       | 0,5                             |
| Intercepto                                    | $\beta_0$    | 23,011       | -                               |
| Coeficiente angular                           | $\beta_1$    | 1,0447       | -                               |

Por análise gráfica (Figura 24) conclui-se que a modelagem foi inexata e de baixa precisão, subentendendo-se que a superestimação da simulação, poderia ser ajustada mediante a calibração de valores que realizassem uma redução uniforme da vazão média dos dados, proporcionando assim exatidão aos mesmos, porém acutelando-se em não promover subestimativa dos valores mínimos em decorrência do deslocamento da linha de tendência, devendo-se em seguida dispender atenção para os erros referentes aos picos das vazões máximas no ajuste da precisão do modelo.

Figura 24 – Vazão observada e estimada pelo modelo não calibrado para a estação Fazenda Jucuruaba.



Fonte: o autor.

#### 5.4.2 Simulação com calibração do modelo DHSVM

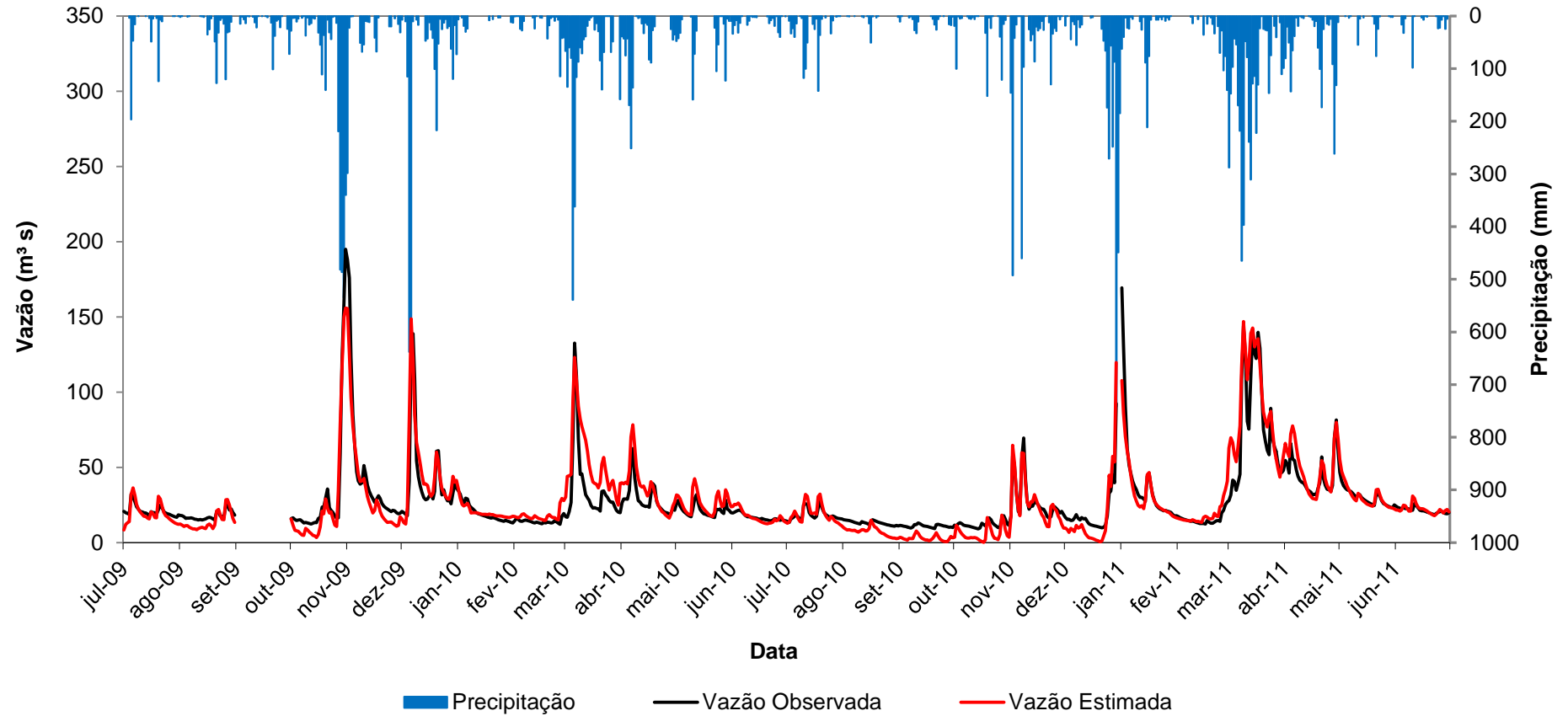
Sendo um modelo puramente físico, então, teoricamente, o DHSVM não precisaria de calibração. No entanto, devido às limitações quanto aos dados de entrada, muitas vezes oriundos de estimativas, e fornecidos na forma de valores médios para grandes áreas, e pelo fato de que os algoritmos do modelo tratam-se de aproximações faz-se necessária a calibração do modelo antes de sua validação (DOTEN; LETTENMAIER, 2004).

Em primeira instância, pode-se afirmar que a inevitável calibração dos dados demandou pouco esforço computacional e técnico, já que as tendências de vazões máximas e mínimas foram captadas pelo modelo, de modo que a calibração manual foi suficientemente satisfatória quando supervisionada com base teórica, por exaustiva consulta bibliográfica, para interpretação do efeito dos parâmetros sobre o ciclo hidrológico, portanto dispensando-se a implementação dos sofisticados

métodos automáticos de calibração, que devido à elevada resolução espacial do espaçamento do grid dos dados de entrada, associada a uma unidade de estudo de mesoescala, poderia inviabilizaria este processo no particular caso, pelo elevado esforço computacional e dispêndio de tempo, pouco contribuindo para a elucidação das complexas relações não lineares do sistema espacial dinâmico e integrado de modelagem do DHSVM.

Nota-se, pela Figura 25, que a calibração do modelo resultou em um ajuste promissor, ainda mais por se tratar de um modelo desenvolvido em regiões temperadas e pouco experimentado no Brasil, com um número muito limitado de publicações nacionais, e nunca antes testado no estado do ES. As vazões máximas foram estimadas com elevada precisão, tendo sido corrigida a sua incapacidade de representação da curva de recessão das vazões após os picos de máxima. No entanto, como já era previsto, houve grande dificuldade de conciliar o ajuste das vazões máximas sem afetar as vazões dos períodos de estiagem. Para Cuo et al. (2006), a precisão do escoamento de base ou estimativas dos picos de vazão podem ser melhoradas individualmente, mas dificilmente se consegue resultados satisfatórios para ambos, teoria igualmente aceita e confirmada por Dymond et al. (2010) em seus estudos.

Figura 25 – Precipitações e vazões diárias observadas na estação Córrego do Galo, ocorridas na bacia do rio Jucu, e vazões simuladas pelo modelo DHSVM.



Fonte: o autor.

A vazão média observada foi de  $27,46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e a vazão simulada, outrora quase duas vezes superior a esta, foi surpreendentemente ajustada para  $27,89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , com um coeficiente NSE ultrapassando 0,85 (Tabela 23), o que corresponde a mais de duas vezes o limite mínimo de adequação do modelo, aproximando-se do rigor de estimação mensal encontrado por Cuo et al. (2009), que obteve valores de 0,59 a 0,87 para NSE. Observa-se, ainda, que todos os demais índices superaram quali-quantitativamente o limite satisfatório para julgar adequada a calibração, comprovando-se que os parâmetros identificados por Cuo et al. (2011) como passível de manipulação para calibração dos dados, são também suficientemente aptos para áreas com características edáficas, climáticas e vegetacionais semelhantes a do presente estudo.

Julga-se que as metodologias de obtenção dos dados e as respectivas fontes são qualitativamente adequadas para a série temporal considerada, pois se considera que o ajuste dos dados sofreu pequena magnitude por calibração quando comparado à amplitude de variação das variáveis calibradas e a sensibilidade do modelo às mesmas, ou seja, os erros expressivos observados graficamente, decorrentes de má especificação dos parâmetros de entrada, influentes diretamente no escoamento de base, puderam ser corrigidos por pequena alteração dos valores físico-hídricos do solo, sendo esta uma variável que apresenta naturalmente uma grande amplitude de variação dos dados em pequenas porções territoriais.

Tabela 23 – Índices estatísticos do desempenho do modelo DHSVM calibrado para os dados de vazão da estação Fazenda Jucuruaba.

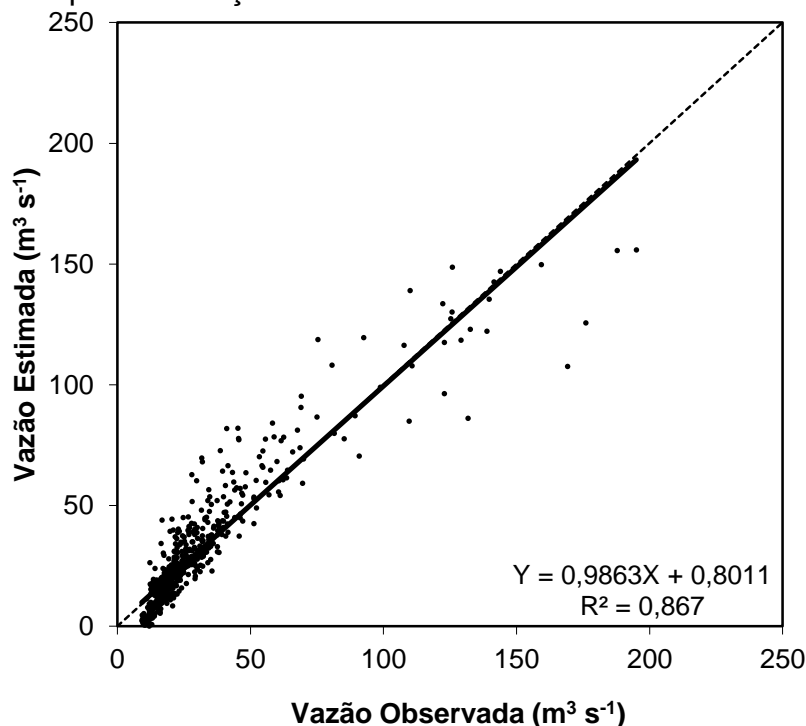
| <b>Índices diagnósticos</b>                   | <b>Sigla</b> | <b>Valor</b> | <b>Satisfatório</b>             |
|-----------------------------------------------|--------------|--------------|---------------------------------|
| Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe | NSE          | 0,8581       | >0,36                           |
| NSE ajustado                                  | NSE'         | 0,6006       | >0,36                           |
| Percentual de tendência (%)                   | PBIAS        | -1,55        | $-25 \leq \text{PBIAS} \leq 25$ |
| Erro padrão médio normalizado                 | RSR          | 0,3869       | $\leq 0,7$                      |
| Coeficiente de determinação                   | $r^2$        | 0,867        | 0,5                             |
| Intercepto                                    | $\beta_0$    | 0,8011       | -                               |
| Coeficiente angular                           | $\beta_1$    | 0,9863       | -                               |

O gráfico abaixo (Figura 26) ilustra que, após a calibração, o ajuste dos valores permitiu preservar a tendência dos picos de vazões, apresentando intercepto próximo do valor nulo e coeficiente angular próximo da unidade, o que corresponde a um resultado idealizado, com elevada precisão da predição e obtenção de um



coeficiente de determinação exprimindo que a capacidade do modelo encontra-se num limiar de 87% de explicação da variabilidade do fenômeno em estudo.

Figura 26 – Comparação entre vazões observadas e estimadas pelo modelo DHSVM calibrado para a estação Fazenda Jucuruaba.



Fonte: o autor.

Durante a calibração, identificou-se que, individualmente, a variável porosidade determina o teor máximo de água no solo, e a condutividade hidráulica saturada lateral na superfície controla a taxa do movimento de água na coluna de solo. Estas duas variáveis em conjunto determinaram a divisão da água entre a coluna do solo e o fluxo do canal. Cuo et al. (2006), por sua vez, destaca os efeitos da umidade do solo sobre o saldo de radiação e a vazão.

Cuo et al. (2011) afirma que o modelo apresenta efeitos não lineares para algumas das variáveis de entrada, de forma que a não linearidade do modelo, a propriedade de uma variável influir sobre outras e os diferentes efeitos obtidos por combinação entre duas ou mais variáveis, foram sem dúvida as características de maior complexidade durante o processo de calibração. Porém, estas também são as características que levam ao conhecimento mais profundo sobre a interatividade do funcionamento desse modelo e equifinalidade de suas variáveis.

O processo de calibração foi iniciado com a variável profundidade do solo, a qual o modelo mostrou-se ser muito sensível, corroborando com os trabalhos de Vanshaar e Lettenmaier (2001) e Thanapakwin et al. (2006). São necessárias, para a geração dos referidos dados de entrada, as profundidades mínima e máxima do solo, o MDE sem descontinuidade fluvial, e os limites topográficos da bacia hidrográfica. Com exceção da profundidade máxima, todos os demais parâmetros foram mantidos inalterados. Adotando-se como ponto de partida o valor inicial obtido por meio dos poços do SIAGAS, correspondente a 124 m, variou-se este valor em intervalos de  $\pm 10$ m, diminuindo-se esta amplitude à medida que já não mais satisfazia o rigor desejado. A profundidade máxima ideal, ou seja, que proporcionou a maximização dos coeficientes NSE, NSE' e de determinação, minimização do RSR e tendência ao valor nulo para PBIAS, correspondeu a 160 m, portanto com 36m menor que o valor atribuído inicialmente. Esta variação na profundidade máxima do solo foi considerada não atípica, devido principalmente, à grande amplitude de variação desse atributo pedológico para a área de estudo, que dentro da bacia obteve amplitude de 124 m. Assim, à reduzida amostragem pontual referente aos poços tubulares e a não amostragem de pontos mais a jusante na bacia, são fatores que indicam possibilidade de que áreas com maior profundidade do solo, seguramente não tenham sido contempladas.

Após a profundidade do solo, calibraram-se os parâmetros  $K_s$ ,  $\Phi$ ,  $f$ ,  $c$ , IAF,  $r_{smin}$ , inicialmente de forma respectivamente ordenada e posteriormente de forma interativa, ou seja, com combinações entre estas variáveis para identificar possíveis ocorrências de equifinalidade. O modelo não apresentou sensibilidade significativa às demais variáveis identificadas por Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011), que justificasse a calibração das mesmas.

O parâmetro  $K_s$  é considerado como máximo na superfície do solo, tendendo a diminuir exponencialmente com a profundidade (WHITAKER, 2003). Esta abordagem foi inicialmente proposta por Beven (1982), mediante vasta análise para seu embasamento, sendo um pressuposto fundamental na forma original do modelo TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979). Este parâmetro, juntamente com  $f$ , são os componentes de calibração mais críticos do modelo, influenciando as taxas de escoamento de subsuperfície, saturação do solo, posição do lençol freático, e a importância relativa do escoamento subsuperficial e saturação de escoamento

superficial (WHITAKER, 2003).

Apenas para a mínima resistência estômatal ocorreu variação expressiva sobre o valor de entrada inicialmente atribuído ao modelo, decorrente principalmente devido a sua grande amplitude de variação natural. Porém, para as demais variáveis, a variação total sobre o valor inicial não ultrapassou 50% do mesmo na classe temática de maior variação dos dados. Mediante estas prerrogativas, pode-se concluir novamente, sob um novo juízo crítico, que as fontes de dados e metodologias adotadas neste estudo foram suficientemente adequadas para a obtenção das variáveis de entrada.

Em referência ao mapa de pedopaisagens, a impossibilidade de validação do mesmo, pela limitada disponibilidade de dados amostrais, consistiu em uma fonte expressiva de incerteza. Como esclarecido anteriormente, a metodologia adotada para obtenção desse mapa temático, e o próprio mapa, estariam sujeitos à investigação do desempenho qualitativo dos resultados obtidos pelo modelo, pois tal mapa não pode ser validado devido à escassez de informações. Para isso, a amplitude da mudança dos valores das variáveis durante o processo de calibração deveria equivaler à amplitude da mudança dos valores para as mesmas variáveis em outros trabalhos que fizeram uso de dados obtidos de medições mais precisas, assim sendo, concluir-se-ia que os dados adotados para este trabalho não estão fora de um limite real para a área de estudo.

A alteração dos valores, durante a calibração da variável  $K_s$  não ultrapassou sequer um desvio padrão dos valores obtidos por Meyer, Rockhold e Gee, (1997), tendo o mesmo ocorrido para "f" nos estudos realizados por Giambelluca, (1996) e Ziegler, (2000) e a  $\Phi$  nos estudos de Giambelluca, (1996); Ziegler, (2000); Meyer, Rockhold e Gee, (1997). Em Pineda (2008), a condição proposta também foi obedecida, ao comparar a proporção de variação dos valores iniciais dos parâmetros de entrada do modelo pelos valores finais (após o processo de calibração), concluindo-se, dessa forma, que as fontes de dados e a metodologia para geração do mapa de pedopaisagens utilizadas no presente estudo, foram capazes de produzir um produto satisfatoriamente realístico e suficientemente representativo da área de estudo em uma escala de maior refinamento, quando comparada aos recentes produtos livremente disponíveis para esta mesma finalidade.

Apenas seis parâmetros (Tabelas 24 e 25) foram necessários para a

calibração do modelo, sendo três referentes às propriedades edáfica e o restante às propriedades vegetacionais. Tal condição favoreceu ainda mais o processo de calibração, sobretudo pelo fato desse não ter sido automatizado. Além disso, permitiu orientar as prioridades futuras de observações de campo quanto ao rigor no levantamento de dados que o modelo apresente maior sensibilidade.

Tabela 24 – Parâmetros e respectivos valores das classes de pedopaisagem pós-calibração.

| Parâmetros                 | Unidade        | Classes de Pedopaisagem |      |      |      |      |      |
|----------------------------|----------------|-------------------------|------|------|------|------|------|
|                            |                | 1                       | 2    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| $K_s$ ( $\times 10^{-5}$ ) | $m s^{-1}$     | 2,05                    | 1,25 | 1,10 | 1,40 | 2,35 | 2,35 |
| F                          | adm.*          | 0,35                    | 0,43 | 0,30 | 0,14 | 0,30 | 0,18 |
| $\Phi$                     | $cm^3 cm^{-3}$ | 0,58                    | 0,52 | 0,47 | 0,48 | 0,53 | 0,52 |
|                            |                | 0,54                    | 0,51 | 0,51 | 0,53 | 0,53 | 0,50 |
|                            |                | 0,52                    | 0,51 | 0,52 | 0,57 | 0,53 | 0,47 |

Tabela 25 – Parâmetros e respectivos valores das classes de uso e cobertura do solo pós-calibração.

|                    |            | Café | FODFAM | FODFM | FODFSM | FODFTB | FODFA | Pasto | Ref. Eucalipto | Área Edific. | Macega |
|--------------------|------------|------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|----------------|--------------|--------|
| c                  | adm.       | -    | 0,95   | 0,70  | 0,65   | 0,34   | 0,55  | -     | 0,66           | -            | -      |
| $r_{sminO}$        | $s m^{-1}$ | -    | 1333   | 1333  | 1333   | 1333   | 1333  | -     | 666            | -            | -      |
| $r_{sminU}$        |            | 280  | 1333   | 1333  | 1333   | 1333   | 1333  | 280   | -              | 1333         | 666    |
| IAF <sub>O1</sub>  | adm.       | 2,20 | 4,13   | 3,74  | 3,82   | 4,29   | 4,26  | 4,29  | 4,99           | 1,25         | 2,17   |
| IAF <sub>O2</sub>  |            | 2,20 | 4,24   | 3,97  | 4,07   | 4,62   | 4,64  | 4,62  | 5,38           | 1,25         | 2,54   |
| IAF <sub>O3</sub>  |            | 2,17 | 3,95   | 3,94  | 4,06   | 4,24   | 4,29  | 4,24  | 5,02           | 1,31         | 2,31   |
| IAF <sub>O4</sub>  |            | 2,63 | 5,20   | 4,67  | 4,68   | 4,72   | 4,85  | 4,72  | 5,86           | 1,42         | 2,61   |
| IAF <sub>O5</sub>  |            | 2,73 | 4,73   | 4,47  | 4,60   | 4,60   | 4,72  | 4,60  | 5,68           | 1,40         | 2,61   |
| IAF <sub>O6</sub>  |            | 2,56 | 4,99   | 4,55  | 4,46   | 4,37   | 4,64  | 4,37  | 5,71           | 1,26         | 2,50   |
| IAF <sub>O7</sub>  |            | 2,44 | 5,25   | 4,56  | 4,33   | 4,28   | 4,55  | 4,28  | 5,68           | 1,18         | 2,43   |
| IAF <sub>O8</sub>  |            | 2,17 | 5,17   | 4,07  | 3,87   | 3,85   | 4,04  | 3,85  | 5,16           | 1,01         | 2,18   |
| IAF <sub>O9</sub>  |            | 2,10 | 4,87   | 4,17  | 3,98   | 4,16   | 4,20  | 4,16  | 5,04           | 1,04         | 2,22   |
| IAF <sub>O10</sub> |            | 1,53 | 3,21   | 2,93  | 3,09   | 3,59   | 3,42  | 3,59  | 3,55           | 0,91         | 1,85   |
| IAF <sub>O11</sub> |            | 1,53 | 3,00   | 2,70  | 2,82   | 3,35   | 3,21  | 3,35  | 3,39           | 1,01         | 1,70   |
| IAF <sub>O12</sub> |            | 2,07 | 3,78   | 3,58  | 3,80   | 3,90   | 3,97  | 3,90  | 4,32           | 1,18         | 2,10   |

Apesar das limitações computacionais, maiores adequações do modelo certamente podem ser obtidas por automatização por processo de calibração, quanto mais sobre supervisão dos efeitos interativos entre as variáveis. Porém, é importante lembrar que ainda que um ganho mais expressivo fosse obtido, os fatores não modelados ainda seriam fortes limitantes de tal processo, dos quais citam-se:

1. Área de drenagem com regime fluviométrico não natural: existência de duas PCHs na área de estudo, denominadas Jucu e Pedreira, alocadas, respectivamente no ribeirão Tijuco Preto e Jucu Braço Sul. Os dois cursos d'água apresentam regime permanente, com áreas de drenagem correspondente a 28,40% da área total da bacia delimitada referente à estação Fazenda Jucuruaba, sendo 5,50% correspondentes a área drenada na seção da primeira estação e 22,90% da segunda. A presença dessas PCHs é a principal causa da subestimação da vazão simulada no período de estiagem, que para a série adotada à calibração, corresponde ao período de agosto a meados de outubro. Nesse período, também nota-se uma situação não natural, em que não há picos de vazão durante os eventos de precipitação, o que é concernente da regularização das vazões controladas nas respectivas PCHs, sendo que estes picos de vazão podem ser nitidamente observados pelos dados simulados e também a tendência natural no decréscimo do escoamento de base;

2. Classes não contempladas de uso e cobertura do solo: apesar da utilização de um mapa temático recente quanto ao uso e cobertura do solo, fotointerpretado em uma escala refinada em ortofotos de alta resolução, oriundas de aerolevanteamento, não foi possível o aproveitamento desse recurso de forma integral, já que devido a não tão refinada resolução matricial de algumas fontes de dados (grid de espaçamento de dimensão restritiva à extração de valores pelas classes poligonais do mapa de uso e cobertura do solo), foi necessário o agrupamento de muitas classes, que de outra forma não seria possível obter informações exigidas ao modelo, o que resultou em certa descaracterização desse mapa temático, ou seja, da real paisagem da área de estudo;

3. Descontinuidade temporal da biodinâmica vegetal e dinâmica de uso do solo: o DHSVM não apresenta capacidade de modelagem de processos biodinâmicos, como crescimento de culturas anuais e perenes. Já no que se refere à dinâmica da vegetação e de uso do solo, esta ficou sujeitada à atribuição de um valor médio concernente ao IAF, que por ter sido obtida em uma resolução temporal de altíssimo grau, certamente abrandou as implicações negativas decorrentes dessa incapacidade de simulação;

4. Representação temática com mudança abrupta das classes de solo: a distribuição das propriedades edáficas ocorre de forma contínua no espaço; porém,

como o levantamento dos dados exigidos pelo modelo, ainda que de forma exploratória, é de elevado ônus, pouco pode ser feito frente a este problema, já que dificilmente o procedimento considerado ideal equivalerá à relação custo/benefício;

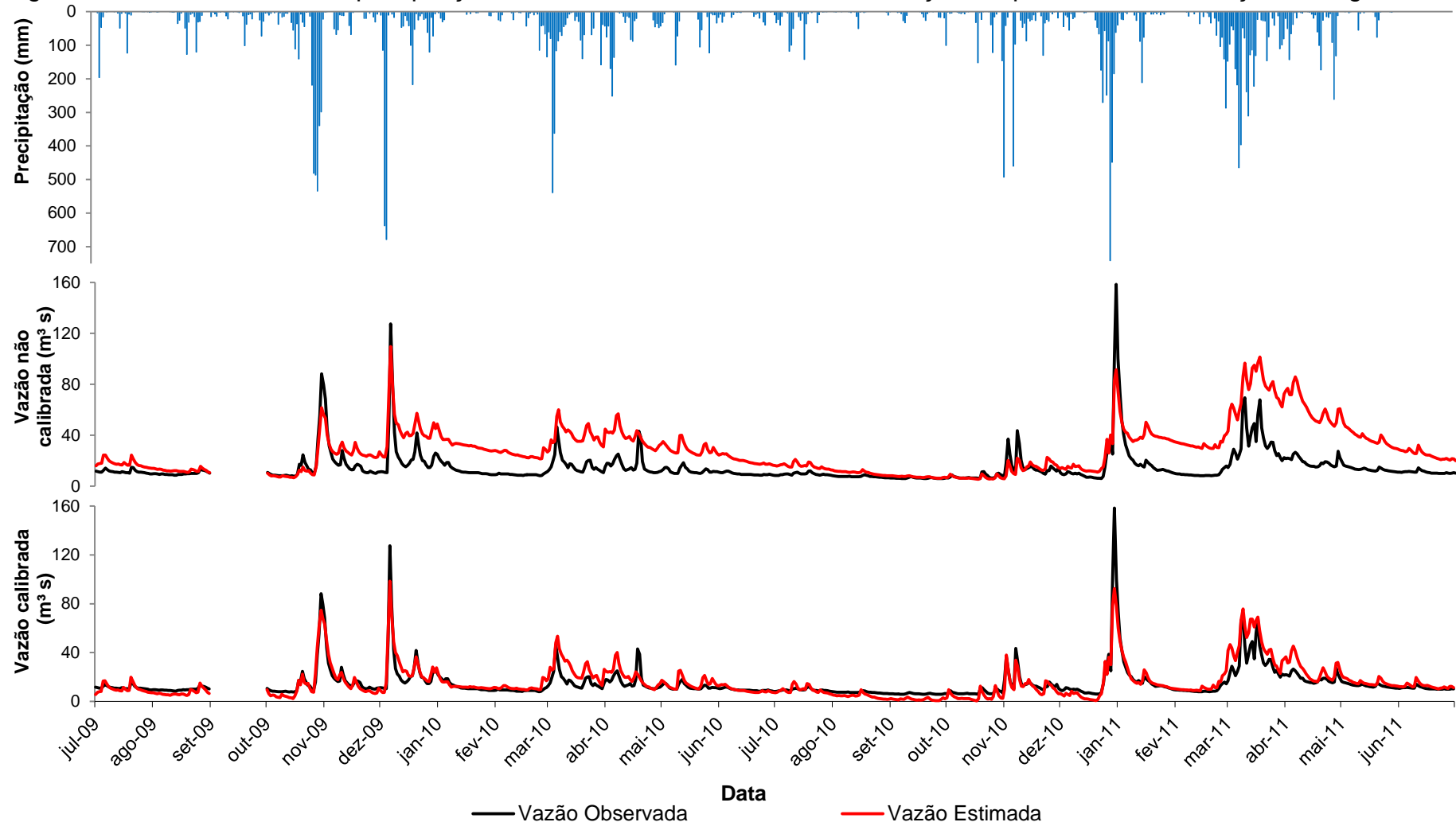
5. Fluxo preferencial não representado: a performance de previsão do modelo depende da capacidade de simulação do fluxo de superfície e subsuperfície. A versão utilizada ainda não conta com uma explícita representação de caminhos preferenciais de fluxo, assunto discutido no trabalho de Beckers e Alila (2004), que explicaram as vantagens e desvantagens da precisão do modelo na simulação simultânea dos picos de vazão e do escoamento de base quando o fluxo preferencial não encontra-se explicitamente representado;

6. Erros grosseiros e imprecisão dos dados de entrada. Ainda que o usuário seja metucioso durante os processos de obtenção dos dados de entrada e configuração do modelo, este não está totalmente livre dos riscos de cometer erros grosseiros. Além disso, o modelo requer numerosos parâmetros de entrada, e não foi realizada coleta de dados em campo para este estudo. Além da possibilidade de terem ocorrido erros nos dados de vazões observados utilizados para comparação dos dados simulados.

O DHSVM foi também aplicado para simulação das vazões da estação fluviométrica Córrego do Galo, situada a montante da estação Fazenda Jucuruaba, com área de drenagem de 979,05 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 57,98% da área total da bacia drenada pela última estação.

Graficamente, observa-se que a lâmina de vazão da estação Córrego do Galo segue o mesmo padrão identificado na estação mais a jusante dessa, tanto na pré-calibração quanto na pós-calibração dos dados da estação Fazenda Jucuruaba (Figura 27), para a mesma série temporal.

Figura 27 – Série de dados de precipitação e vazão medida e simulada na resolução temporal diária, da estação Córrego do Galo.



Fonte: o autor.

Pelos índices estatísticos (Tabela 26), os resultados pós-calibração apresentaram desempenho inferior aos obtidos para a estação Fazenda Jucuruaba, comportamento este já esperado, devido a não realização de calibração para a estação Córrego do Galo. Entretanto, tais resultados são considerados satisfatórios, demonstrando que, quando calibrado para uma bacia, o DHSVM possui potencial de aplicação para a modelagem hidrológica de suas sub-bacias, sem a necessidade de calibração específica. Porém, para melhor compreensão desse comportamento devem ser realizados estudos mais criteriosos, adotando-se maior número de estações, e que contemplem diferentes categorias de sub-bacias dentro de uma área com elevada heterogeneidade.

Tabela 26 – Índices estatísticos do desempenho do modelo para os dados de vazão da estação Córrego do galo.

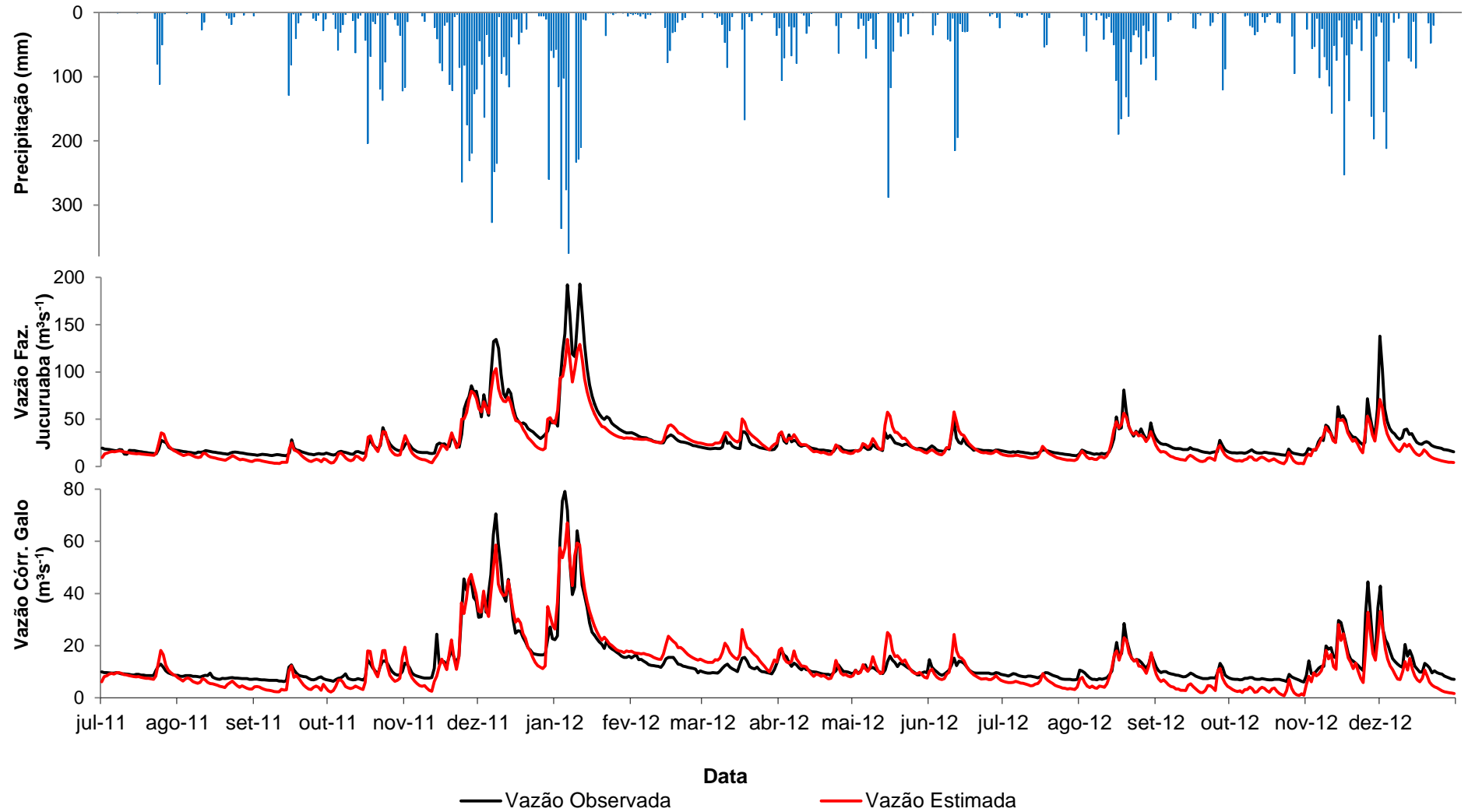
| <b>Sigla</b> | <b>Valor Pré-Calibração</b> | <b>Valor Pós-Calibração</b> | <b>Satisfatório</b>             |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| SE           | -1,0656                     | 0,7828                      | >0,36                           |
| NSE'         | -0,9021                     | 0,4732                      | >0,36                           |
| PBIAS        | -92,32                      | -6,09                       | $-25 \leq \text{PBIAS} \leq 25$ |
| RSR          | 1,4732                      | 0,4777                      | $\leq 0,7$                      |
| $r^2$        | 0,4717                      | 0,8011                      | 0,5                             |
| $\beta_0$    | 13,886                      | 1,7599                      | -                               |
| $\beta_1$    | 0,9823                      | 0,9416                      | -                               |

#### 5.4.3 Validação do modelo DHSVM

Na Figura 28 são apresentadas as vazões diárias observadas e simuladas nas estações Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo, para um período inferior ao da calibração, correspondente a 1,5 anos, de julho de 2011 a dezembro de 2012. Apesar da forte tendência em acompanhar os picos de vazões, notam-se superestimativas dos picos de vazões intermediárias e subestimativa das vazões máximas e mínimas.



Figura 28 – Série de dados de vazão medida e simulada validada, monitoradas na estação Fazenda Jucuruaba e Córrego. do Galo.



Fonte: o autor.

As vazões médias observadas das estações foram  $28,11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , para a Fazenda Jucuruaba, e  $13,65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , para o Córrego do Galo, sendo as respectivas vazões simuladas de  $23,95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e  $12,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , representando subestimativas de 15% e 9%, respectivamente. A redução de precisão do modelo na fase de validação, em comparação com a fase de calibração, também foi observada no estudo realizado por Cuo et al. (2006), no entanto Dymond et al. (2010), Cuo et al. (2008); Thanapakpawin et al. (2006), obtiveram resultados diferentes, com o período de validação apresentando melhores resultados. Para Cuo et al. (2009), de 12 bacias estudadas, 6 tiveram os índices estatísticos do período de validação superiores a do período calibrado, 1 de igual proporção e o restante menores. Já para Cuo et al. (2006) de 12 bacias calibradas, 6 apresentaram valores superiores para o período de validação, 4 de igual proporção e o restante menores. Portanto, não se pode afirmar, tão seguramente, que o período de dados incógnito pelo modelo deveria apresentar índices estatísticos inferiores àqueles calibrados, entendendo-se, portanto, que trata-se de um comportamento relativo.

Os ajustes globais dos hidrogramas, quantificados pelos coeficientes de NSE (Tabela 27), apresentaram valores muito próximos para as duas estações. Já o NSE', indicou maior precisão para a estação principal (Fazenda Jucuruaba), o que pode ser explicado pelo fato desse índice ser menos sensível aos altos valores extremos, devido a não consideração das diferenças ao quadrado. Pelo coeficiente PBIAS, constata-se o mesmo observado visualmente nos hidrogramas, ou seja, que a estação fluviométrica mais a montante proporcionaram menor subestimativa dos valores.

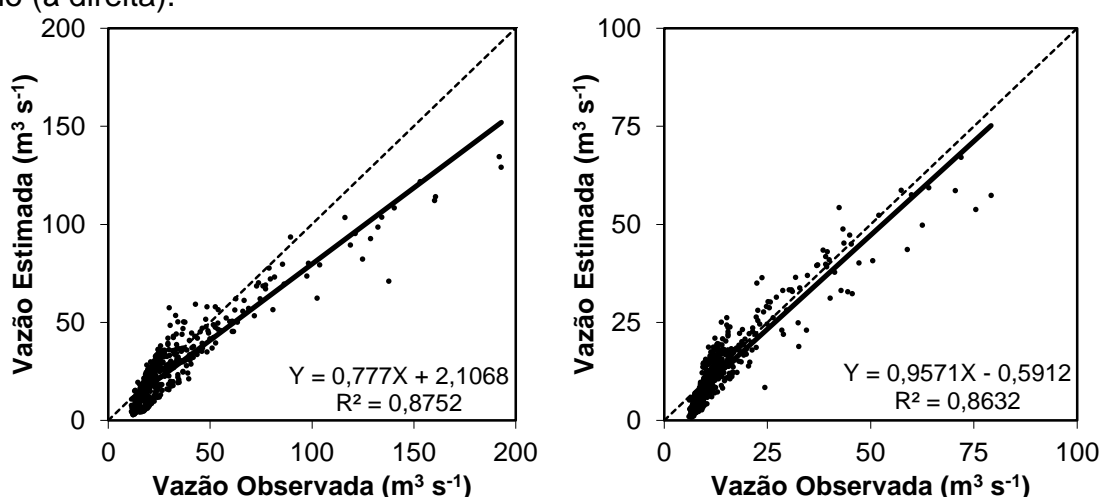
Tabela 27 – Índices estatísticos do desempenho do modelo pós-calibrado para os dados de vazão das estações Fazenda Jucuruaba e Córrego do Galo.

| <b>Sigla</b> | <b>Valor Fazenda Jucuruaba</b> | <b>Valor Córrego do Galo</b> | <b>Satisfatório</b>             |
|--------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| NSE          | 0,8355                         | 0,8402                       | >0,36                           |
| NSE'         | 0,5409                         | 0,4888                       | >0,36                           |
| PBIAS        | 14,81                          | 8,62                         | $-25 \leq \text{PBIAS} \leq 25$ |
| RSR          | 0,4056                         | 0,3997                       | $\leq 0,7$                      |
| $r^2$        | 0,8752                         | 0,8632                       | 0,5                             |
| $\beta_0$    | 2,1068                         | - 0,5912                     | -                               |
| $\beta_1$    | 0,777                          | 0,9571                       | -                               |

Nas Figuras 29, observa-se que apesar de ter havido uma precisão dos dados ligeiramente superior na validação da estação fluviométrica principal, com  $r^2$  de 0,87

contra 0,86, os coeficientes da regressão linear mostram maior exatidão para a estação mais a montante da principal, com um excelente ajuste visual da linha de tendência. As subestimativas dos dados simulados (visivelmente apresentadas nas respectivas linhas de tendência), semelhantemente a calibração, também podem ser explicadas pela presença de uma expressiva área de drenagem com regime fluviométrico não natural correspondente a presença das PCHs, que mantêm um regime mais regular e superior ao regime de seus respectivos cursos d'água, de forma mais nítida no período de estiagem. Nota-se, também, que o efeito de tais barramentos é mais fortemente expresso na sessão de drenagem mais a jusante, ou seja, a que compreende maior área de drenagem e encontra-se sob efeito dos dois barramentos.

Figura 29 – Comparações entre vazões observadas e estimadas pelo modelo, no período de validação, para a estação Fazenda Jucuruaba (à esquerda) e Córrego do Galo (à direita).



Fonte: o autor.

Os dados de entrada do DHSVM, necessários para a modelagem da bacia do rio Jucu, são de elevada complexidade de obtenção e até mesmo medição. Ainda assim, tais dados foram todos obtidos sem qualquer levantamento de campo, para um local com baixa disponibilidade de informações. O processo de calibração do modelo promoveu uma modesta alteração dos valores iniciais dos parâmetros, sendo, portanto considerados satisfatórios aos resultados obtidos para a série temporal considerada.

Dessa forma, espera-se que este estudo, considerado pioneiro na região sudeste do Brasil, possa orientar e respaldar novas perspectivas, que certamente

serão vislumbradas no âmbito da modelagem hidrológica com modelos fisicamente distribuídos.

## 6 CONCLUSÃO

✓ Os procedimentos relativos aos dados climáticos permitiram adequação na calibração do modelo para a série histórica considerada, dos quais citam-se: preenchimento de variáveis para as estações às quais estas não encontram-se disponíveis, adoção do modelo testado por Aguiar et al. (2011) para estimação da radiação de onda longa incidente e da metodologia proposta pela WMO para análise da densidade mínima da rede de diferentes tipos de estações por área de abrangência em diferentes zonas fisiográficas, aprimorada com técnicas geoestatísticas. No entanto, tal adequação apresenta limitação temporal, já que foi considerado um período de tempo relativamente curto quando comparado à série mínima necessária para considerar as tendências na distribuição temporal dos dados. Assim, é imprescindível investimentos na instrumentalização da bacia do rio Jucu e circunvizinhas, com rede de estações meteorológicas automáticas mais adensadas para obtenção de dados em médio e longo prazo.

✓ O modelo DHSVM mostrou ser uma ferramenta hidrológica com elevada capacidade de promover simulações realísticas de processos de transferência solo-vegetação-atmosfera, mesmo sem qualquer ajuste do código fonte para representação de características regionais, o que implica em dizer que sua base física foi eficiente para a área de estudo, mesmo com as particulares diferenças do local onde foi originalmente desenvolvido.

✓ As camadas matriciais de caráter edáfico mostraram-se representativas da variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas e termodinâmicas para tematização de classes categóricas do mapa de pedopaisagem, o qual foi tido como suficientemente representativo das propriedades de interesse à modelagem da bacia do rio Jucu, o que implica em dizer que, onde não há mapas temáticos de solo com suficiente refinamento, para a região na qual localiza-se a unidade de estudo, o uso dessa metodologia poderá satisfazer tal insuficiência.

✓ A aplicação e validação do DHSVM apresentaram resultados satisfatórios, mesmo quando submetido a índices estatísticos diagnósticos de maior rigor, dispensando-se qualquer tipo de alteração em seu código fonte no presente estudo. Portanto, o DHSVM apresentou-se apto para aplicação na bacia do rio Jucu e, provavelmente, também em diferentes outros ambientes com características

edáficas, climáticas, topográficas e vegetacionais diferentes daquelas a qual foi desenvolvido.

✓ Apesar de comumente o critério de validação ser realizado com base nos dados do deflúvio de uma bacia, julga-se serem necessários outros componentes do ciclo hidrológico para melhor adequação do balanço hídrico, ainda mais quando se desejar estimar outros parâmetros que não o deflúvio do rio. Dessa forma, a calibração dos dados, deverá ser aprimorada com o a calibração de outros componentes como, por exemplo, nível do lençol freático, escoamento superficial, umidade do solo, dentre outros.

✓ Comprovou-se que o modelo pode ser utilizado para previsão em seções a montante daquelas onde se encontra localizada a estação fluviométrica submetida à calibração, concluindo-se que a gestão da bacia no aspecto hídrico quantitativo não se limita apenas a seção onde os dados foram calibrados e validados, sendo, portanto, viável o estudo ao longo de toda a rede de drenagem delimitada pelos divisores topográficos.

✓ Os artifícios utilizados para suprir a carência das informações necessárias ao modelo hidrológico DHSVM poderá servir de base para aplicação em outras regiões, além de aspecto indicativo de uma busca mais direcionada dos dados de entrada para estudos que demandem maior precisão, adoção das técnicas existentes ou criação de novas metodologias para exploração das informações a favor do usuário, e ampliação na composição de um acervo local para futuras aplicações nesta linha de pesquisa.

✓ Ainda que os dados utilizados no presente estudo tenham sido adquiridos por meios indiretos, estes levaram a uma boa precisão das simulações pelo modelo. Porém, é imprescindível que estudos relativos à gestão da bacia do rio Jucu disponham de levantamentos, ao menos semidetalhados e com continuidade temporal ininterrupta, dos dados de entrada ao qual o DHSVM apresenta maior sensibilidade. O aumento quantitativo e qualitativo desses tenderá a minimizar o dispêndio no processo de calibração do modelo, devido ao conseqüente ganho na representação mais realística dos fenômenos estudados.

✓ Apesar dos bons resultados obtidos com a calibração manual do modelo, o uso de métodos que automatizem este processo pode melhorar seu desempenho, tanto na identificação do valor médio mais realístico dos processos físicos para as classes temáticas de solo e vegetação, como para o melhor ajuste dos resultados

sob investigação, já que o número de combinações manuais possíveis é limitada, além de minimizar o dispendioso trabalho de alteração de valores dos parâmetros, que torna-se mais oneroso com o detalhamento dos diferentes tipos de dados de entrada.

✓ A presença de duas PCHs na bacia do rio Jucu, com área correspondente a 28,40% da área total drenada pela estação Fazenda Jucuruaba, foi o principal fator de limitação qualitativa em relação à análise dos dados simulados, pelos índices diagnósticos, já que a série de dados medidos de vazão, considerada inicialmente como real, apresentou tendência irrealística, especialmente para os períodos de estiagem, com regularização das vazões e superestimativa dos valores reais, o que levou a subestimativa dos dados simulados tanto para o período de calibração como ao de validação do modelo, sendo tal subestimativa mais expressiva no processo de validação pela ocorrência de dois eventos de estiagem. Portanto espera-se que o modelo tenha apresentado capacidade preditiva superior a indicada pelos métodos quantitativos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. O domínio dos mares de morro no Brasil. São Paulo, USP/Instituto de geografia, (**Série Geomorfologia**, 2), 9 p. 1966.

ABREU, M.; PENA, S. B. Permeabilidade e Áreas de Máxima Infiltração. In: **Estrutura Ecológica Nacional, Uma Proposta de Delimitação e Regulamentação**. Lisboa: Isapress. 121-136 p. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, (Brasil). **Inventário das estações pluviométricas**. 2 ed. Brasília: ANA; SGH. 495 p. 2009a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, (Brasil). **Inventário das estações fluviométricas**. 2 ed. Brasília: ANA; SGH. 196 p. 2009b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, (Brasil). **Estado do Espírito Santo**. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br/cd4/es.doc> . Acesso em: 20 jan. 2012.

AGUIAR, L. J. G.; COSTA, J. M. N.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; COSTA, A. C. L.; FERREIRA, W. P. M. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, 215-224 p., 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 98, p. 921-929, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 2006. 300 p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and User's Manual**. Idaho Implementation. version 1.0, Ago./2002, 98p.

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERGB, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179-195, 2004.

ALMEIDA, A. Q. de; RIBEIRO, A. P. Y. G.; RASCON, N. JR. L.; LIMA E. P. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 15, n. 4, p. 354–358, 2011.

ANDRADE, R. G.; RODRIGUES, C. A. G.; QUARTAROLI, C. F.; FURTADO, A. L. dos S.; BRUNINI, O.; SANCHES, I. I'A. Estudo do índice de área foliar de pastagens em diferentes níveis de degradação com aplicação de imagens Landsat 5 - TM e dados de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém, PA. **Anais...** Belém, PA: SBMET, 2010. 5 p.

ARAÚJO JÚNIOR, A. A.; CAMPOS, S.; BARROS, Z. X.; CARDOSO, L.G.



Diagnóstico físico conservacionista de 10 microbacias do rio Capivara – Botucatu (SP), visando o uso racional do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 2, p. 106-121, 2002.

ASSAD, E. D.; MASUTOMO, R.; ASSAD, M. L. L. Estimativa das precipitações máximas prováveis com duração de 24 horas e de 30 minutos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 5, p. 677-686, 1992.

BACK, A. J. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussunga, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 170-175, 2009.

BALDISSERA, G. C. **Estudo observacional e de Modelagem Hidrológica de uma Micro-Bacia em Floresta não Perturbada Na Amazônia Central**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá. 2005.

BALL, G. H.; HALL, D. J. **ISODATA, A novel method of data analysis and pattern classification**. Technical Report. 1965.

BARRETO, C. V. G.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; SILVA, E. A.; PIRES, R. C. de M. Profundidade efetiva do cafeeiro irrigado e fertirrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **La Referência**. EMBRAPA. [S.L.], 2005

BARROSO, D. G.; SILVA, M. L. N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe Agropecuário**, [S.l.], v. 176, n. 16, p. 17-24, 1992.

BASTIAANSEN, W. G. M. **SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey**. Journal of Hydrology, v.229, p.87-100, 2000.

BECKERS, J.; ALILA, Y. A model of rapid preferential hillslope runoff contributions to peak flow generation in a temperate rain forest watershed. **Water Resources Research**, [S.l.], v. 40, 2004.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. [S.l.]: Forrex, 2009. 166 p.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E.C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, 139, 90-97 p., 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 3, p. 743-749, May/June. 1998.

BEVEN KJ, KIRKBY MJ. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**. v. 24, p. 43-69, 1979.

BEVEN K. On subsurface stormflow: an analysis of response times. **Hydrological Sciences Journal**. v. 4, p. 505-521, 1982.

BERNARDES, R. J. **Funções de pedotransferência e qualidade física de três solos do norte fluminense para a cultura do coqueiro anão**. 2010. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes. 2010.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8.ed. São Paulo: Ícone, 2012. 355p.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed., Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. Cap. 5, p. 177-231.

BLAKE, G. J. **The interception process**. In: Chapman, T. G. (Org.). **Prediction in catchment hydrology**. [S.l.]: Australian Academy of Science. 1975. p. 59-81.

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

BOEHNER, J.; KOETHE, R.; CONRAD, O.; GROSS, J.; RINGELER, A.; SELIGE, T. **Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation**. In: MICHELI, E., NACHTERGAELE, F., MONTANARELLA, L. **Soil Classification 2001**. Luxembourg, European Soil Bureau, Research Report, n. 7, p. 213-222, 2002.

BÖHNER, J.; SELIGE, T. **Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation**. **Göttinger Geographische Abhandlungen**, [S.L.], v. 15, p. 13-27, 2006.

BRANDÃO, V. dos, S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da. **Infiltração da água no solo**. 3. ed., Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRASIL - Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório dos Solos da Região sob Influência da Cia. Vale do Rio Doce**. Boletim Técnico, v. 13, 154 p. Rio de Janeiro. 1970.

BRASIL - Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. **PROJETO RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais**. Folhas SF. 23/24. v. 32. 775 p. Rio de Janeiro/Vitória. 1983.

BRASIL - Ministério de Minas e Energia. Secretaria Geral. **PROJETO RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais**. Folhas SE. 24. v.34. 544 p. Rio Doce. 1987.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 22 mar. 2012.

BRASIL: Mapa da área de aplicação da lei nº 11.428 de 2006. IBGE. 2012. Escala 1:5.000.000.

BRUIJNZEEL, L. A. The hydrological cycle in moist tropical forest. In: BRUIJNZEEL, L. A. (Org.). **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: IAHS, 1990. p. 5-38.

BURROUGH P. A; MCDONNELL R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press; 1998.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Bragantia*, v. 21, p. 163-213, 1962.

CAMPANHARO, W. A. **Análise do Modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) para as bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2013.

CANEDO, P. M. Hidrologia Superficial. In: **Engenharia Hidrológica**, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1989. cap. 4.

CARO, C. F. D.; OLIVEIRA, O. M.; SENNA, D. S.; LEMOS, R.; CALIMAN, J. P. Análise da arborização urbana das praças na região Metropolitana da cidade de Alegre, ES. In: **CIÊNCIA E ÉTICA: O PARADIGMA DO SÉCULO XXI**. 8 INIC, 9 EPG, 3 INIC JR. 2009, São José dos Campos: UNIVAP, 2009. P. 1-6.

CARVALHO JUNIOR, W. de; CHAGAS, C. da S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G.; BHERING, S. B.; FRANCELINO, M. R. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 6, 691-696 p., nov./dec. 2011.

CARVALHO, L. G. de; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de Referência: Uma Abordagem Atual de Diferentes Métodos de Estimativa. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set. 2011.

CASTRO, F. da S. **Zoneamento Agroclimático para a cultura do *Pinus* do Estado do Espírito Santo**. 2008. Dissertação (Mestre em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, 2008.

CECÍLIO, R. A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado**. 2002.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Modelo para estimativa da infiltração de água e perfil de umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37: 411-421 p., 2013.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 415-422, 2003.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. **Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges**. IEEE TRANSACTIONS ON

GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. v. 41. n. 11. 2003.

CHEN, J. M.; RICH, P. M.; GOWER, S. T.; NORMAN, J. M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D24, 429-443 p., dec/1997.

CHILÈS, J. P.; DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty**. New York: John Wiley & Sons. 695 p. 1999.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrologia aplicada**. Santa fé de Bogotá: Martha Edna Suárez R., 1994. 584 p.

CHOWDARY, V. M.; RAO, M. D.; JAISWAL, C. S. Study of infiltration process under different experimental conditions. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 83, p. 69-78, 2006.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisa Hidráulica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COSTA, F.; PEREYRA, R. O.; PARCIONIK, S.; ABREU, J. B. R. Distribuição vertical de características morfológicas do sistema radicular de *Brachiaria humidicola*. **Pasturas Tropicales**. v. 24, n. 3, 2000.

CRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgarde Blücher. 1980. 188 p.

CUO, L.; BEYENE, T. K.; VOISIN, N.; SU, F.; LETTENMAIER, D. P., ALBERTI, M., RICHEY, J. E. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin. **Hydrological Processes**, Washington, 2010.

CUO, L.; GIAMBELLUCA, T. W.; ZIEGLER, A. D.; NULLET, M. A. Use of the distributed hydrology soil vegetation model to study road effects on hydrological processes in Pang Khum Experimental Watershed, northern Thailand. **Forest Ecology and Management**, Honolulu, v. 224, p. 81-94, 2006.

CUO, L.; GIAMBELLUCA, T. W.; ZIEGLER, A. D. Lumped parameter sensitivity analysis of a distributed hydrological model within tropical and temperate catchments. **Hydrological processes**, v. 25, 2405-2421 p., 2011.

CUO, L.; LETTENMAIER, D. P.; ALBERTI, M.; RICHEY, J. E. Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin. **Hydrological Processes**. v. 23, 907-933 p. 2009.

CUO, L.; LETTENMAIER, D. P.; MATTHEUSSEN, B. V.; STORCK, P.; WILEY, M. Hydrologic prediction for urban watersheds with the Distributed Hydrology–Soil–Vegetation Model. **Hydrological Processes**. 2008.

CURTO, R. A. **Avaliação de métodos de estimação de altura de estratificação**

**vertical em uma floresta estacional semidecidual.** 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES, 2011.

DEMATTE, J. A. M.; GENÚ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação de mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, 1219-1229 p., dez. 2004.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. Colorado, Atmospheric Analysis and Prediction Division, U.S. Department of Commerce. 1986.

DORMAN, J. L.; SELLERS, P. J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB). **American Meteorological Society**, v. 28, p. 833-855, 1989.

DOTEN, C. O.; BOWLING, L. C.; LANINI, J. S.; MAURER, E. P.; LETTENMAIER, D. P. A partially distributed model for the dynamic prediction of sediment erosion and transport in mountainous forested watersheds. **Water resources research**, [S.l.], v. 42, p. 15, 2006.

DOTEN, C. O.; LETTENMAIER, D. P. **Prediction of sediment erosion and transport with the distributed hydrology-soil-vegetation model.** Seattle, Washington, 2004. 70 p. Water Resources Series Technical Report n°. 178.

DROOGERS, P.; ALLEN, R. G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage Systems**, [S.l.], v. 16, p. 33-45, 2002.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York, John Wiley and Sons, p 1-109, 1980.

DYMOND, S.; AUST, W. M.; PRISLEY, S.; EISENBIES, M.; VOSE, J.; DOLLOFF, A. **Forest Roads and Flooding.** COFE. IN: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> Annual Meeting of the WHITAKER, A.; ALILA, Y.; BECKERS J.; TOEWS, D. Application of the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model to Redfish Creek, British Columbia: model evaluation using internal catchment data. **Hydrological Processes**. v. 17, 199-224 p. 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGOPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo.** Rio de Janeiro, 1978. 161. (Boletim técnico, 45)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGOPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 6 ed. Rio de Janeiro, 412 p. 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Levantamento generalizado e semidetalhado de solos da Aracruz Celulose S. A. no Estado do Espírito Santo e no extremo sul do Estado da Bahia e sua aplicação aos plantios de eucalipto.** Rio de Janeiro: Embrapa, 2000.

EM-DAT. Produce a list of disasters and associated losses. Disponível em <<http://em-dat.net/disasters/list.php>>. Acesso em 02 abr. de 2012.

ESCELSA. Usinas do Espírito Santo. Disponível em: <http://www.edpescelsa.com.br/aescelsa/usinas.asp>. Acesso em: 20 jan. 2014.

ESPÍRITO SANTO (estado): Mapa de Solos do estado do Espírito Santo, Base Cartográfica IBGE. Espírito Santo. 1978. Escala: 1:400.000.

ESPÍRITO SANTO (Estado). **Relatório de impacto ambiental da pequena central hidrelétrica pedreira.** Domingos Martins, 2012. 101 p.

ESPÍRITO SANTO (Estado). **Portal Geo-Espacial para o Espírito Santo: Ferramenta de Informação Dinâmica para Suporte à Tomada de Decisões para Recursos Naturais.** Projeto Florestas para Vida. Jan./2013a.

ESPÍRITO SANTO (Estado). **Desenvolvimento do Quadro de Informação Dinâmica (QID) como um Mecanismo subjacente para gerar um portal Geoespacial para Espírito Santo.** Relatório 1. Projeto Florestas para Vida. Junho de 2013b.

ESRI. Classification trees of the interpolation methods offered in Geostatistical Analyst Disponível em: <[http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/#/Classification\\_trees\\_of\\_the\\_interpolation\\_methods\\_offered\\_in\\_Geostatistical\\_Analyst/003100000009000000/](http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/#/Classification_trees_of_the_interpolation_methods_offered_in_Geostatistical_Analyst/003100000009000000/)>. Acesso em: 07 fev. 2013.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G.; VILLA NOVA, N. A.; FAVARIN, M. G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37 n. 6 p. 769-773, jun. 2002.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. Características químicas do solo em diferentes distâncias do tronco do eucalipto e em diferentes profundidades. **Revista Árvore.** Viçosa, v. 33, n. 5, 799-810 p., 2009.

FERREIRA J. C.; DANIEL, L. A.; TOMAZELA, M. Parâmetros para equações mensais de estimativas de precipitação de intensidade máxima para o Estado de São Paulo - Fase I. **Ciência Agrotécnica,** Lavras, v. 29, n. 6, p. 1175-1187, 2005.

FLORINSKY, I. V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science,** v. 12, n.1, 47-61 p., 1998.

FLORINSKY, I. V.; EILERS, R. G.; MANNING, G. R.; FULLER, L. G. Prediction of

soil properties by digital terrain modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, 295-311 p., 2002.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando SWAT**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2012.

GALVÍNCIO, J. D.; CORRÊA, A. C. B.; ARAÚJO, M. do S. B.; Determinação do Albedo no município de Belém do São Francisco, com base em imagens Landsat 7. **Revista de Geografia**, Recife, vol. 23, n. 3, 2006.

GARRIGUES, S.; LACAZE, R.; BARET, F.; MORISETTE, J. T.; WEISS, M.; NICKESON, J. E.; FERNANDES, R.; PLUMMER, S.; SHABANOV, N. V.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; YANG, W. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, 2008.

GIAMBELLUCA TW. Tropical land cover change: Charactering the post forest land surface. In *Climate change: Developing southern hemisphere perspectives*, Giambelluca TW, Henderson-Sellers A (eds). John Wiley and Sons: UK, p. 293-318, 1996.

GRANT, J. C.; NICHOLS, J. D.; YAO, R. L.; SMITH, R. G. B.; BRENNAN, P. D.; VANCLAY, J. K. Depth Distribution of roots of *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* in different soil conditions. **Forest Ecology and Management**, 249-258 p., 2012.

GREENLEE, D. D. Raster and vector processing for scanned linework. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 10, p.1383–1387, 1987.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. **Water Resources Research**, v. 34, n. 4, 751-763 p., apr/1998.

HABTEC. **Diagnóstico e plano diretor das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu**. Plano Diretor. 2 v. Espírito Santo, nov./1997a.

HABTEC. **Diagnóstico e plano diretor das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu**. Plano Diretor. 7 v. Espírito Santo, dez./1997b.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambiente air temperature. **American society of agricultural engineers**, Chicago, 17-20 dez., 1985, 12 p.

HARTMANN, D.L. **Global Physical Climatology**. London: Academic Press, 1994. 408 p.

HUBER, A. M.; OYARZÚN, C. E. Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempre verde del sur de Chile. **Turrialbl**, v. 42, n. 2, p. 192-199, 1992.

HUTCHINSON, M. F.; XU, T.; STEIN, J. A. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. **Geomorphometry**, p. 19-22, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação Brasileira**. 2ª ed, n. 1. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, (Brasil). **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3 ed. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. ISBN 978-85-240-4307-9.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN. **Regionalizações do Espírito Santo: descrição das diferentes divisões regionais do Estado**. Nota técnica. Vitória. 2011.

INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN: Banco de dados. Disponível em: <<http://www.ijsn.es.gov.br/Mapas/Consulta/?module=Search&action=Results&lookfor=&type=AllFields&filter%5B%5D=format%3A%22Arquivo+Shapefile%22&view=list>>. Acesso em: 01 jul. 2014.

JENSON S. K., DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.

JOLLIFFE, I. T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 21, n. 2, 160-173 p, 1972.

JOLLIFFE, I. T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. II: Artificial Data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 22, n. 1, 21-31 p, 1973.

KAMPF, S. K.; S. J. BURGESS. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. **Water Resources Research**, [S.I.], v. 43. 2007.

KROHLING, C. A. **Efeito de inseticidas nos aspectos enzimáticos e fisiológicos em plantas de café Conilon (*Coffea canephora*) e na microbiota do solo**. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ecossistemas), Centro Universitário Vila Velha. Vila Velha. 2010.

KRUK, N. S.; VENDRAME, Í. F.; CHAN, C. S.; LADEIRA, F. S. B. Análise de Sensibilidade do Modelo Hidrológico Distribuído DHSVM aos Parâmetros de Vegetação. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 14, n. 1, p. 75-84, jan./mar. 2009.

LAMARCHE, J.; LETTENMAIER, D. P. Effects of forest roads on flood flows in the Deschutes River basin, Washington. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S.I.], v. 26, p. 115-134, 2001.

LAPOLA, D. M.; OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G. A new world natural vegetation map for global change studies. *Academia Brasileira de Ciências*, v. 80, n.



2, p. 397-408, 2008.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER – LP DAAC, 2011. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results.** 26 p. Available in: <[https://igskmncnwb001.cr.usgs.gov/aster/GDEM/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](https://igskmncnwb001.cr.usgs.gov/aster/GDEM/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)>. 5 Apr./2012. Acessado em: 03 Out. 2013.

LANGE FILHO, G.; VESTENA, L. R. Caracterização da pluviosidade na bacia hidrográfica do Ernesto – Pitanga/PR. In: SEMANA DE GEOGRAFIA DA UNICENTRO, 16., 2008, Guarapuava. **Anais...** Guarapuava: Unicentro, 2008. p. 89-100.

LEMOS FILHO, L. C. de A.; CARVALHO, L. G. de.; EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. M. T. de; DANTAS, A. A. A. Análise espaço-temporal da evapotranspiração de referência para Minas Gerais. **Ciência Agrotec.**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1462-1469, set./out., 2007.

LEONEL, C.; MATTOSO, A. Q. Plano de manejo parque estadual da Campina do Encantado. Núcleo de Planos de Manejo – Fundação Florestal, São Paulo. 2008. 314 p.

LEOPOLDO, P. R.; SOUSA, A. P.; TUACEK FILHO, S. Interceptação da água da chuva em cultura de cana-de-açúcar. **Brasil açucareiro**, v. 98, n. 6, p. 9-16, 1981.

LEUNG, L. R.; WIGMOSTA, M. S. Potential climate change impacts on mountain watersheds in the Pacific Northwest. **Journal of the American Water Resources Association**, [S.l.], v. 35, p. 1463-1471, 1999.

LIANG, L.; LI, L.; LIU, Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.l.], v. 150, n. 2, p. 298-306, 2009.

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas.** Piracicaba: Universidade de São Paulo. 1986. 241 p. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.** 2 ed. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba, SP. 253 p, 2008.

LLAMAS, J. **Hidrologia General.** Principio y Aplicaciones. Universidade Del Pais Basco. 190 p. 1993.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Piracicaba, SP, 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

MAGNATO, L. F. S.; MARTINS, S. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NERI, A. V.

Gradiente fitofisionômico-edáfico em formações florestais de Restinga no Sudeste do Brasil. **Acta Botânica Brasilica**, v. 24, n. 3, 734-746 p., 2010.

MAIDMENT, D.R. **Handbook of hydrology**. McGraw-Hill, Inc., 1993.

MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 476-481, Mar/Apr. 1991.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. B. **Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances**. International Journal of Remote Sensing, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MCCUNE, B.; DYLAN K. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load index. **Journal of Vegetation Science**, v. 13, p. 603-606, 2002.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa de evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. Piracicaba, SP, 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Federal de São Paulo.

MEIRELES, L. D.; SHEPHERD, G. J.; KINOSHITA, L. S. Variações na composição florística e na estrutura fitossociológica de uma floresta ombrófila densa altomontana na Serra da Mantiqueira, Monte Verde, MG. **Revista Brasileira**, Botucatu, v. 31, n. 4, p. 559-574, out.-dez. 2008.

MELLO, C. R. de; LIMA, J. M. de; SILVA, A. M. da; LOPES, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 7, n. 3, p. 494-500, 2003.

MENEZES-SILVA, S. A Floresta Atlântica no Paraná. In: FERNANDES, C. R. **Floresta Atlântica: Reserva da Biosfera**. 20.ed. Curitiba: Tempo Integral, 2003. p. 17-67.

MEYER P. D, ROCKHOLD M. L, GEE G. W. Uncertainty analyses of infiltration and subsurface flow and transport for SDMP sites, NUREG/CR-6565. Washington, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 1997.

MIELKE, M. S.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F.; PENCHEL, R. M.; MARTINEZ, C. A.; ALMEIDA, A. C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, v.13, n.3, p.152-160, 1999.

MOORE, I. D.; GRAUSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. 1991. In: BEVEN, K, J.; MOORE, I. D. Terrain analysis and distributed modelling in hydrology. J. Wiley & Sons, 1991.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades Físicas dos Solos na

Parametrização de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n.1, 61-70 p., jan/mar 2003.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantifications of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society Of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, 885-900 p., 2007.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. ISBN: 978 -85-7499-023-1.

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

NICOLSON, J. A.; THORUD, D. B.; SUCOFF, E. I. The interception-transpiration relationship of White Spruce and White Pine. **Journal of Soil and Water Conservation**, V. 23, N. 5, P. 181-184, 1968.

NOGUEIRA, M. de O. G. **Estoque de carbono na biomassa radicular e no solo em ecossistema florestal em processo de recuperação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2013.

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. 328-344, 1984.

OLIVEIRA, L. L. de; COSTA, R. F. da; COSTA, A. C. L. da; SOUSA, F. de A. S. de, BRAGA, A. P. Modelagem da Interceptação na Floresta Nacional de Caxiuanã, no Leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 318-326, 2008.

OLIVEIRA, M. M.; LOBO FERREIRA, J. P. C. **Proposta de uma metodologia para definição de áreas de infiltração máxima**. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 6., Porto: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. 2002.

OLIVEIRA, T. L. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2014.

OTTONI, M. V. **Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo *in situ* a partir de testes de infiltração**. 141 p. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M. Modelo hidrodinâmico 1d para redes de canais baseado no esquema numérico de MacCormack. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 16, n. 3, p. 151-161, jul./set. 2011.

PAIXÃO, F. J. R. da; ANDRADE, A. R. S.; AZEVEDO, C. A. V. de; COSTA, T. L.; GUERRA, O. C. Ajuste da curva de infiltração pro meio de diferentes modelos empíricos. **Pesquisa Aplicada e Agroecologia**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 107-112, jan./abr. 2009.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world mape of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, 1633-1644 p., 2007.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, U. Z.; RIBEIRO, L. F. Caracterização de comunidades de Orchidaceae em fragmentos de Floresta Ombrófila Densa Montana, em diferentes estágios de regeneração em Santa Teresa, Espírito Santo, Brasil. **Natureza on line**, Vitória-ES, p. 52-60, 2004. Disponível em: < <http://www.naturezaonline.com.br>>. Acesso em: 31 jul. 2013.

PÉRIE, C.; QUIMET, R. Organic Carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. **Canadian Journal Of Soil Science**, v. 88, 315-325 p., 2007.

PILZ, J.; SPÖCK, G. **Why Do We Need and How Should We Implement Bayesian Kriging Methods**. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. [S.L.], 2007.

PINEDA, L. A. **Estudo observacional e de modelagem hidrológica de uma micro-bacia em floresta não perturbada na Amazônia Central**. São José dos Campos: INPE, 17 de mar. 2008. 236 f. Tese (Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

PINTO, N. L. de S.; HOLTS, A. C. T.; MARTINS, J. A.; COMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

PLANCHON, O. DARBOUX, F. "A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models," **Catena**, v. 46, p. 159-176, 2001.

POLIDÓRIO, A. M.; FLORES, F. C.; FRANCO, C.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XII, 2005, Goiânia. **Deteção automática de sombras e nuvens em imagens CBERS e Landsat 7 ETM**. São Paulo: INPE, 2005. 4233-4240 p.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surfasse heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly wather**. v. 100 p. 81-92, 1972.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed., viciosa: UFV, 2009. 279 p.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. dos, S.; SILVA, D. D. da. **Escoamento superficial**. 2. ed., Viçosa: UFV, 2004. 87 p.

QUINN, P.; BEVEN, P.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrolog. Proc.**, v. 5, p. 59-80, 1991.

RAMOS, E.; TORRES, R. B.; VEIGA, R. F. A.; JOLY, C. A. Estudo do componente arbóreo de dois trechos da Floresta Ombrófila Densa Submontana em Ubatuba (SP). *Biota Neotropica*, [S.l.] v. 11, n. 2. Disponível em: <http://www.biotaneotropica.org.br/v11n2/pt/abstract?inventory+bn02411022011>. Acesso em: 20 jan. 2014.

REICHARDT, K. Água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REYS, C. D. R.; RIZZI, N. E.; ARAKI, H. Análise das características hidrológicas de três sub-bacias do rio Carapá (Canindeyú, Paraguai) em função das mudanças da cobertura vegetal. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 243-256, abr./jun. 2011.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis an introduction**. 4 ed. Edition. New York: Springer. 2013. ISBN-978-3-642-30061-5.

ROBERTS, J.; CABRAL, O.M.R.; AGUIAR, L.F. Stomatal and boundary-layer conductances in an Amazonian Terra firme rain forest. **Journal of Applied Ecology**, v. 27, p. 336-353, 1990.

ROBERTS, J.; CABRAL, O.M.R.; COSTA, J. P.; MCWILLIAM, A. L. C; SÁ, T. D. DE A. An overview of the leaf área index and physiological measurements during ABRACOS. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. (eds). **Amazonian Deforestation and Climate**. England: John Wiley & Sons Ltd, 1996. p. 287-306.

ROMANO, N.; CHIRICO, G. B. The role of Terrain Analysis in using and Developing Pedotransfer Functions. **Developments in Soil Science**, v. 30, 2004.

ROSS, J.; Radiative transfer in plant communities. In: Monteith, J. L. **Vegetation and the atmosphere**, London, v. 1, p. 13-15, 1975.

SANDERS, R. A. Urban vegetation impacts on the hydrology of Dayton, Ohio. **Urban Ecology**, New York, v. 9, p. 361-376, 1986.

SANTHI, C, J. G. ARNOLD, J. R. WILLIAMS, W. A. DUGAS, R. SRINIVASAN, L. M. HAUCK. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* v. 37(5): p. 1169-1188, 2001.

SANTIAGO, A. V. RICHARDS, J. A.; JIA, J. **Remote Sensing Digital Image Analysis an introduction**. 2005. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – ESALQ/USP, Piracicaba.

SANTOS, E. H. M.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.l.], v. 14, n. 8, p. 826–834, 2010.

SAVENIJE, H. H. G. Hess opinions: The art of hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S.I.], v. 13, p. 157-161, 2009.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America**, v. 70, 1569-1578 p., 2006.

SILVA, L. F. da; LIMA, A. M. L. P.; SILVA FILHO, D. F. da; COUTO, H. T. Z. do Interceptação da Chuva Pelas Copas das Espécies de *Caesalpinia pluviosa* DC. (Sibipiruna) e *Tipuana tipu* O. Kuntze (Tipuana) em Arborização Urbana. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 307-315, dez. 2008.

SILVA, B. B.; MENDONÇA, R. R. de O.; SILVA, S. T. A.; BEZERRA, B. G. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XIV, 2009, Natal. **Obtenção do albedo e IVDN em áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM - Landsat 5 e algoritmo SEBAL/METRIC**. São Paulo: INPE, 2009. 475-782 p.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed., Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. Cap. 2, p. 35-40.

SINGH, B.; SZEICZ, G. The effect of intercepted rainfall on the water balance of a hardwood forest. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n.1, p. 131-138, 1979.

SILVEIRA, A. L. L. da.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed., Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. Cap. 9, p. 335-365.

SPERLING, M. V. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Belo Horizonte: DESA, 2007. 588 p.

STORCK, P.; BOWLING, L.; WETHERBEE, P.; LETTENMAIER, D. Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest. **Hydrological Processes**, [S.I.], v. 12, p. 889-904, 1998.

SUN, N.; YEARSLEY, J.; VOISIN, N.; LETTENMAIER, D.P. A spatially distributed model for the assessment of land use impacts on stream temperature in small urban watersheds, **Hydrological Processes** (em revisão), 2013.

SURFLEET, C. G. **Uncertainty in forest road hydrologic modeling and catchment scale assessment of forest road sediment yield**. [S.I.], 2008. Dissertation (PhD. in Forest Engineering). Department of Forest Engineering, State University, OR.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.; ROCHA, F.; SANTOS, L. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis - BA. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

THANAPAKPAWIN, P.; RICHEY, J.; THOMAS, D.; RODDA, S.; CAMPBELL, B.; LOGSDON, M. Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. **Journal of Hydrology**, [S.l.], v. 334, p. 215- 230, 2006.

THE WORLD DATA CENTER FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE – WDC: Banco de dados: Leaf Area Index. Disponível em: [http://wdc.dlr.de/data\\_products/SURFACE/LAI/](http://wdc.dlr.de/data_products/SURFACE/LAI/)>. Acesso em: 01 Jul. 2013.

THORNTON, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, jan. 1948.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. **Climatology** Drexel Inst. of Technology, v. 8, n. 1, 1955.

THORNTON, C. W.; WILM, H. G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, DC, v. 25, n. 5, p. 686-693, 1944.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America**, v. 64, 327-338 p., 2000.

TRICART, J. As relações entre a morfogênese e a pedogênese. **Notícia Geomorfológica**, Campinas-SP, 8 (15) : p.5-18, jun. 1968.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed., Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. Cap. 7, p. 253-277.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

VALERIANO, M. de M.; PICINI, A. G. **Geoprocessamento de informações agroclimatológicas**. INPE: São José dos Campos. 2003.

VAN LIEW, M. W., J. G. ARNOLD, AND J. D. GARBRECHT. Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551, 2003.

VANSHAAR, J.; LETTENMAIER, D.P. Effects of land cover change on the hydrologic response of Pacific northwest forested catchments. **Water Resources Series, Technical Report**, n. 165, p. 187, 2001.

VELOSO, H. P.; RANGEL, A. L. R. F.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação Brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE. ISBN: 85-240-0384-7. 1991.

VESTENA, L. R. A importância da hidrologia na prevenção e mitigação de desastres naturais. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, Guarapuava, PR, v. 4, n. 1, p. 151-162, jan./abr. 2008.

VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise multivariada da teoria à prática**. Monografia (Especialização), Universidade Federal de Santa Maria. 2005.

WADT, P. G. S. **Construção de terraços para controle de erosão pluvial no Estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa, 2003.

WAICHLER, S. R.; WIGMOSTA, M.S. Simulation of hourly meteorology from daily data and significance to hydrology at H.J. Andrews Experimental Forest. **Journal of Hydrometeorology**, [S.l.], v. 4, n. 2, p. 251-263, 2003.

WAICHLER, S. R.; WIGMOSTA, M. S.; WEMPLE, B. C. Simulation of water balance and forest treatment effects at the H.J. Andrews experimental forest. Washington, [S.l.: s.n.], 2002.

WESTRICK, K. J.; STORCK, P.; MASS, C. F. Description and evaluation of a hydrometeorological forecast system for mountainous watersheds. **Weather and Forecasting**, [S.l.], v. 17, p. 250-262, 2002.

WHITAKER, A.; ALILA, Y.; BECKERS, J.; TOEWS, D. Application of the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model to Redfish Creek, British Columbia: model evaluation using internal catchment data. **Hydrologic Processes**, v. 17, p. 199-224, 2003. DOI: 10.1002/hyp.1119

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 applications**. [S.l.]: Water Resources Publications, LLC, 2002. p. 7-42.

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

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc. jan./2000. ISBN 0-471-32188-5.

WINK. C.; MONTEIRO, J.S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 057-067, mar. 2012.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Guide to Hydrological Practices**. 5 ed. WMO-N° 168. 1994.

WORLD SOIL PROFILES – WSP: banco de dados. Disponível em: <<http://worldsoilprofiles.org/pt-br/profile/search/#>>. Acesso em: 16 mai. 2013.



ZEVERBERGEN, L. W. THORNE, C. R. Quantitative analysis of land surface topography Earth surface processes and landforms. v. 12, p. 47-56, 1987.

ZIEGLER A. D. Toward modeling erosion on unpaved roads in mountainous Northern Thailand, Ph.D. dissertation, University of Hawaii at Manoa, Hawaii, USA, 2000.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – Metodologia para reclassificação das unidades fisiográficas e obtenção da densidade das estações pluviométricas

1. Tabulação dos dados obtidos da rede de estações hidro-climáticas e conversão para feição geométrica do tipo ponto;

2. Transformação para o sistema de coordenadas UTM, SIRGAS 2000, Fuso 24 Sul;

3. Definição das zonas de maior proximidade de cada ponto (estação), por meio da construção de um Diagrama de Voronoi (Polígonos de Thiessen), permitindo conhecer a área de influência limite de cada estação em cada zona fisiográfica;

4. Seleção das unidades fisiográficas – do Mapa de Geodiversidade do Espírito Santo, em formato shape (.shp), contendo as diferentes unidades de relevo do estado – por extração da área de interesse, com uso de feição geométrica delimitadora e posterior correção dos limites incompatíveis nas regiões marginais (comuns devido a diferentes fontes de dados geoespaciais) com ferramenta de edição, resultando em oito tipos de unidades fisiográficas, posteriormente submetidas a reclassificação para compatibilizar com aquelas definidas pela WMO (1994);

5. Uso do método de classificação “*geometrical interval*” identificado como melhor critério para definir os intervalos no MDE de forma análoga às unidades fisiográficas, reclassificadas no tópico anterior, e conversão dessas classes do formato matricial para feição poligonal;

6. Sobreposição, por união, entre o produto resultante do procedimento anterior, o Diagrama de Voronoi e a bacia do rio Jucu, possibilitando conhecer a área de influência limite de cada estação em cada zona fisiográfica na área interna e externa da bacia;

7. Aplicação de uma circunferência tamponante (*buffer*) para cada estação, com área designada pela Tabela 3. Mesclagem dos polígonos das circunferências por diferença simétrica, e consequente obtenção das porções das unidades fisiográficas não compreendidas por estação alguma e aquelas superadensadas.

## APÊNDICE B – Metodologia para ajuste dos atributos dos diferentes perfis para três camadas de solo adotadas para o modelo

1. Tabulação dos perfis de solo em planilha eletrônica, com informações ao nível de horizonte, contendo individualmente: o nome de cada horizonte e respectiva profundidade (cm), granulometria (%) composta por areia fina, areia grossa, silte e argila, densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ), porosidade (%), C orgânico (%), umidade equivalente, N (%), soma de bases (mE/100g),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%), C:N, argila dispersa em água (%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%), Ca+Mg (mE/100g), K (mE/100g) e  $\text{pH}_{\text{água}}$ . Tais variáveis foram destinadas à análise em FPTs, e parte desses à modelagem hidrológica;

2. Determinação do valor médio ponderado dos atributos do solo em função dos horizontes principais A, B e C, tendo como fator de ponderação a espessura de cada horizonte;

3. Uso de análise de agrupamento como critério auxiliar na classificação dos perfis com número de horizontes principais inferiores a três:

- ✓ Pela diferença no padrão de medidas e ausência de homogeneidade entre variáveis, realizou-se uma transformação dos dados por padronização, resultando em dados com média 0 e desvio padrão igual a 1;
- ✓ Com vista a suprimir o efeito do aumento da distância euclidiana pelo elevado número de variáveis para a AA, optou-se pelo cálculo da matriz de distância com uso da distância euclidiana média, e para o método de amalgamação o tipo *Compleat Linkage*. Esta análise foi adotada exclusivamente para os perfis que possuíam dois horizontes principais (A e B ou A e C), porém aplicada em primeira instância aos horizontes B ou C, visando subdividi-los para a totalização das três camadas, já que a grande maioria desses perfis apresentaram estes horizontes com uma proporção de camadas superior ao horizonte A. Todavia, quando o número de camadas do horizonte principal A era superior ao de B ou C, ou quando estes dois últimos apresentaram duas ou menos camadas cada, a AA foi adotada tanto para A e B ou A e C. Ressalta-se que a hierarquia pedogenética foi priorizada em detrimento da AA, subentendendo-se que se realizou apenas o agrupamento entre horizontes imediatos.

4. Uso do mapa de pedopaisagens obtido no tópico 4.3.4 para identificação dos perfis representativos de cada classe e cálculo do valor médio das variáveis de cada uma das três camadas do solo para os ditos perfis.

## APÊNDICE C – Reclassificação das classes de uso e cobertura do solo

1. Cálculo de superfícies matriciais contendo valores de latitude e altitude, e extração por quadrante delimitador da área de estudo, com definição da extensão de processamento por interseção das entradas;

2. Álgebra de mapa multicondicional, com definição dos limites latitudinais e altitudinais, para delimitação das fitofisionomias da Floresta Ombrófila Densa – FOD. Formações: Terras Baixas – FODFTB, Sub-Montana – FODFSM, Montana – FODFM e Alto Montana – FODFAM;

3. Menezes-Silva, (2003), afirma que a identificação das porções compostas por Formação Aluvial – FODFA podem ser separadas de formações como, por exemplo, FODFTB, adotando o tipo de solos para esse critério, pois a escassez de estudos científicos somados à similaridade na distribuição geográfica, fisionomia e florística, torna a distinção dessa formação incerta. Assim, o estabelecimento da fitofisionomia FODFA foi realizado como tendo domínio correspondente às classes associadas aos cursos d'água, as quais correspondem às classes 5 e 7 com forte afinidade aluvial, do mapa temático de pedopaisagens processado no tópico 4.3.4;

4. Processamento das cinco formações vegetais obtidas nos procedimentos 2 e 3, por conversão, análise espacial e gestão, para criação de cadeias multipoligonais, com limites suavizados, submetidas à dissolução, para identificação categórica de atributos;

5. Uso de ferramentas de corte, dissolução de atributos e mesclagem de polígonos, para redução de 25 para 11 classes do mapa de uso e cobertura do solo, sendo a mesclagem definida pela união de grupos com propriedades semelhantes, como a seguir:

✓ Reclassificação dos cultivos agrícolas como abacaxi, banana, café, cana de açúcar, coco da Bahia, mamão, outros cultivos temporários e outros cultivos permanentes, para a classe cultivo agrícola café por mesclagem, a qual apresenta uma proporção aproximadamente sete vezes superior ao cultivo de banana, que trata-se do segundo cultivo agrícola de maior cobertura espacial;

✓ Reclassificação dos reflorestamentos, como eucalipto, pinus e seringueira, apenas para reflorestamento eucalipto, o qual apresenta uma proporção acima de vinte e quatro vezes superior ao pinus, que trata-se

do segundo povoamento florestal de maior cobertura;

✓ Generalização das classes macega e brejo apenas para macega, por apresentarem composição predominantemente herbácea, com ocorrência de árvores esparsas;

✓ Reclassificação das florestas nativas, como mata nativa, mata nativa em estágio inicial de regeneração e campo rupestre/altitude para mata nativa, pois se tratam de vegetações nativas predominantemente arbóreas;

✓ As classes como afloramento rochoso, extração mineral, massa d'água, pastagem, solo exposto, área edificada e a classe outros (classe indiscriminada), não sofreram alterações neste procedimento.

6. A classe “outros” é composta basicamente de benfeitorias em imóvel rural, estradas, áreas industriais e outros setores urbano-administrativos. Por se tratar de uma classe indiscriminada e sem possibilidades de individualização em grupos distintos, esta foi segmentada em polígonos regulares com dimensão correspondente a mais fina resolução espacial da fonte de dados de representação matricial contínua adotada neste trabalho, correspondente ao MDE e Imagens Landsat TM com 30 m de grid de espaçamento. Após esta segmentação a classe “outros” foi submetida a um processo de eliminação de polígonos por mesclagem entre os polígonos de classes vizinhas de maior fronteira compartilhada, reduzindo assim de 11 para 10 classes do mapa de uso e cobertura do solo. Foram definidas como camadas de eliminação (exclusas do processo de mesclagem) as classes de massa d'água, extração mineral e afloramento rochoso por não apresentarem propriedade diretamente correspondente aos componentes da classe “outros”;

7. União entre os produtos gerados nos procedimentos 4 e 6 para reclassificação da classe mata nativa (estabelecida no quarto passo do procedimento 5) nas formações vegetais da FOD segundo os critérios estabelecidos por IBGE (2012). Pela adição dessa classe submetida à reclassificação, o mapa de uso e cobertura do solo passou, portanto, de 10 para 14 classes.

APÊNDICE D – Cálculo da variável “c” pelo produto MOD44B para cada classe de uso e cobertura do solo

1. Média por álgebra de mapa, das superfícies disponíveis para o período de simulação da modelagem hidrológica, com utilização dos produtos: MOD44B.A2009065.h14v11.005.2011230090521.hdf; MOD44B.A2010065.h14v11.005.2011239000716.hdf.

2. Os produtos selecionados correspondem respectivamente aos anos de 2009 e 2010, encontrando-se, ainda indisponíveis, os produtos para os anos seguintes;

3. Remoção dos valores de preenchimento (massa d’água, por exemplo), desnecessários e comprometedores à álgebra matricial, com uso de função de condicionamento de conjunto nulo;

4. Conversão do sistema de coordenada antecipadamente ao processo de extração do quadrante de estudo para evitar perda de informação nas regiões marginais durante a técnica de reamostragem, definida como interpolação bilinear;

5. Extração das superfícies matriciais do produto processado no tópico anterior, por um quadrante delimitador da área de estudo, com definição da extensão de processamento por interseção das entradas;

6. Correção do fator de escala para tornar os valores de unidades em valores fracionados;

7. Remoção dos polígonos, do mapa de uso e cobertura do solo, com área inferior à área correspondente a duas células do raster MOD44B, visando consequente aumento na representatividade da amostragem por classes;

8. Obtenção dos valores médios de “c” para cada classe, por uso de zoneamento estatístico para obtenção do valor médio do produto obtido no procedimento anterior.



## APÊNDICE E – Metodologia adotada para obtenção da variável albedo

### 1. Calibração radiométrica

Pela equação de Markham e Barker (1987) (Equação 27), pode-se realizar a calibração radiométrica de imagens para as bandas 1 a 5 e 7, pela razão entre a energia solar refletida por cada pixel e a unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, conhecida como radiância espectral. Já para a banda 6, essa radiância representa a energia emitida por cada pixel.

$$L_{\lambda,i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (27)$$

em que:

$\lambda$  = Banda da respectiva imagem;

$a_i, b_i$  = radiâncias espectrais mínima e máxima ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) do TM – Landsat 5 e 7 (Tabela 11);

ND = número digital do pixel (número inteiro de 0 a 255); e

$i$  = bandas das imagens do TM – Landsat 5 e 7.

### 2. Reflectância monocromática

A reflectividade da superfície é definida por Allen (2002) como a razão entre a integração hemisférica da radiância monocromática e o fluxo de irradiância solar monocromática incidente em cada pixel. A reflectância monocromática planetária de cada banda ( $\rho_\lambda$ ) pode ser calculada pela Equação 28, para as imagens Landsat.

$$\rho_\lambda = \frac{\pi L_\lambda}{ESUN_\lambda \cos\theta d_r} \quad (28)$$

em que:

$L_\lambda$  = radiância espectral de cada banda ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ );

$ESUN_\lambda$  = irradiância solar espectral no topo da atmosfera associada a cada banda TM – Landsat 5 e 7 ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ );

$\theta$  = ângulo zenital solar incidente;

$d_r$  = inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol em unidade astronômica para cada dia específico do ano.

O valor de  $\theta$  é obtido com referência ao cabeçalho do arquivo de cada imagem, especificamente no ângulo de elevação do sol ( $\beta$ ) onde  $\theta = (90^\circ - \beta)$ . O termo  $d_r$  é definido como  $1/d_{e-s}^2$ , onde  $d_{e-s}$  é a distância relativa entre a terra e o sol em unidade astronômica e  $d_r$  é calculado usando a equação de Duffie e Beckman (1980), também dado pela FAO 56 *Crop Evapotranspiration* (ALLEN; PEREIRA; RAES, 2006) (Equação 29):

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DSA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (29)$$

em que:

DAS: dia sequencial do ano.

A quantidade  $DAS2\pi/365$  é dada em radiano, e os valores adimensionais de  $d_r$  ocorrem no intervalo de 0,97 a 1,03.

### 3. Albedo planetário

O calculo do albedo no topo da atmosfera (albedo planetário)  $\alpha_{plan}$  é expresso pela soma dos produtos entre a combinação linear das refletâncias monocromáticas e seus respectivos pesos (Equação 30).

$$\alpha_{plan} = w_{\lambda 1} \rho_{\lambda 1} + w_{\lambda 2} \rho_{\lambda 2} + w_{\lambda 3} \rho_{\lambda 3} + w_{\lambda 4} \rho_{\lambda 4} + w_{\lambda 5} \rho_{\lambda 5} + w_{\lambda 7} \rho_{\lambda 7} \quad (30)$$

em que:

$\rho_{\lambda}$ : refletância planetária da banda  $i$ ;

$w_{\lambda}$ : peso de cada banda na composição do albedo planetário, correspondendo a razão entre o  $ESUN_{\lambda}$  e o somatório de todos os  $ESUN_{\lambda}$ .

#### 4. Albedo da superfície

O passo final para o cálculo do albedo da superfície foi realizado pelo computo da correção do  $\alpha_{\text{plan}}$  pelo uso da transmissividade atmosférica (Equação 31).

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{plan}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (31)$$

em que:

$\alpha_{\text{atm}}$ : proporção média da entrada de radiação solar refletida pela atmosfera, com valores variando no intervalo entre 0.025 a 0.04, sendo que para SEBAL recomenda-se o valor de 0.03, baseado em Bastiaanssen (2000).

A transmissividade atmosférica é definida como a fração da radiação incidente que é transmitida pela atmosfera e representa o efeito da absorção e reflexão que ocorrem em seu interior. Este parâmetro é calculado em função da elevação, assumindo-se céu claro e condições relativamente secas, e inclui a transmissividade tanto da radiação direta como difusa, adotando a equação proposta pela FAO – 56 (Equação 32).

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \text{MDE} \quad (32)$$

em que:

MDE: elevação sobre o nível do mar (m), obtida pelo modelo digital de elevação, com resolução representativa da menor área de interesse.

APÊNDICE F – Metodologia de obtenção das variáveis restantes de uso e cobertura do solo.

| Classes                                                                                                                                          | Fonte                                  | Método                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Altura da vegetação</b>                                                                                                                       |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Café                                                                                                                                             | Favarin et al. (2002)                  | Inversão de função das variáveis (dependente e independente) da equação de regressão linear desenvolvida para estimar IAF em função da altura.                                                                                                                  |
| FODFAM                                                                                                                                           | Meireles, Shepherd e Kinoshita, (2008) | Altura média obtida por levantamento fitossociológico.                                                                                                                                                                                                          |
| FODFM                                                                                                                                            | Pereira e Ribeiro, (2004)              | Altura média de fragmento florestal com tempo de regeneração e idade superior a 80 anos.                                                                                                                                                                        |
| FODFSM                                                                                                                                           | Ramos et al. (2011)                    | Altura do intervalo superior da copa do estrato superior da vegetação de dois fragmentos florestais.                                                                                                                                                            |
| FODFTB                                                                                                                                           | Leonel e Mattoso (2008)                | Altura média máxima do dossel da vegetação arbórea de um parque estadual.                                                                                                                                                                                       |
| FODFA                                                                                                                                            | Menezes-Silva (2003)                   | Intervalo superior de altura do dossel de uma FODFA.                                                                                                                                                                                                            |
| Pastagem                                                                                                                                         | Andrade et al. (2010)                  | Média das alturas médias da pastagem sob diferentes níveis de degradação em função do IAF.                                                                                                                                                                      |
| Refl. Eucalipto                                                                                                                                  | Stape (2002)                           | Estimativa com referência na relação entre IAF e altura da vegetação na respectiva idade. Este índice foi comparado a valores tabelados para os diferentes anos de produção, determinando dessa forma a idade média aproximada dessa espécie na área de estudo. |
| Área Edificada                                                                                                                                   | Caro et al. (2009)                     | Altura média da arborização urbana.                                                                                                                                                                                                                             |
| Macega                                                                                                                                           | Andrade et al. (2010)                  | Altura correspondente a classe pastagem.                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Distancia desde o solo até o inicio da copa das arvores (0 – 1, fração da altura total da vegetação, para o dossel superior e sub-bosque)</b> |                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| FODFAM                                                                                                                                           | Meireles et al. (2008)                 | Razão da altura média mínima entre blocos amostrais de formação florestal e altura média.                                                                                                                                                                       |
| FODFM                                                                                                                                            | Pereira; Ribeiro, (2004)               | Razão da altura de dois fragmentos florestais em diferentes estágios de regeneração, sendo o mais novo (média da camada mais baixa) com 30 anos, e o antigo (média da camada mais alta) com 80 anos de idade.                                                   |
| FODFSM                                                                                                                                           | Ramos et al. (2011)                    | Razão entre o intervalo inferior da altura das árvores, dos componentes arbóreos de trechos florestais, pelo seu intervalo superior.                                                                                                                            |
| FODFTB                                                                                                                                           | Leonel e Mattoso (2008)                | Razão da altura média mínima do dossel da vegetação de um parque estadual por sua altura máxima média.                                                                                                                                                          |
| FODFA                                                                                                                                            | Menezes-Silva (2003)                   | Razão entre o intervalo inferior de altura do dossel de uma FODFA por seu intervalo superior.                                                                                                                                                                   |

(continua)

APÊNDICE F – Metodologia de obtenção das variáveis restantes de uso e cobertura do solo.

(continuação)

| <b>Distancia desde o solo até o início da copa das arvores (0 – 1, fração da altura total da vegetação, para o dossel superior e sub-bosque)</b> |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Refl.<br>Eucalipto                                                                                                                               | Wink et al. (2012)                                                             | Proporção média entre a altura do fuste e a altura total das árvores mensuradas na idade de 44 meses. A idade escolhida foi definida com base na relação IAF/altura do dossel, obtidos no Apêndice F, tabela de altura da vegetação no método adotado para a mesma classe de uso do solo. |
| <b>Coefficiente de atenuação da radiação (coeficiente de extinção)</b>                                                                           |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| FOD                                                                                                                                              | Ross (1975)                                                                    | Valor médio do intervalo mais comum de ocorrência desse coeficiente para florestas, correspondente a 0,6 e 0,8.                                                                                                                                                                           |
| Refl.<br>Eucalipto                                                                                                                               | Almeida, Landsberg e Sands (2004)                                              | Valor genérico obtido da média de dois clones referente à lista de parâmetros utilizados na calibração do modelo 3-PG.                                                                                                                                                                    |
| <b>Máxima resistência dos estômatos para o dossel superior</b>                                                                                   |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Café<br>FOD<br>Refl.<br>Eucalipto                                                                                                                | Dickinson et al. (1986); Roberts Cabral e Aguiar (1990); Robests et al. (1996) | Máxima resistência cuticular das folhas.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Máxima resistência dos estômatos para o dossel inferior</b>                                                                                   |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| FOD                                                                                                                                              | Roberts Cabral e Aguiar (1990); Robests et al. (1996)                          | Valores obtidos diretamente dos trabalhos realizados por Roberts et al. (1990, 1996 citado por Pineda 2008).                                                                                                                                                                              |
| Pastagem<br>Área<br>Edificada<br>Macega                                                                                                          | Dickinson et al. (1986); Roberts Cabral e Aguiar (1990); Robests et al. (1996) | Máxima resistência cuticular das folhas.                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Mínima resistência dos estômatos para o dossel superior</b>                                                                                   |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Café                                                                                                                                             | Land Data Assimilation Systems (LDAS)                                          | Valor correspondente a <i>Closed Shrubland</i> (Arbustos Densos).                                                                                                                                                                                                                         |
| FOD                                                                                                                                              | Lapola et al. (2008)                                                           | Valor correspondente a <i>Tropical Seasonal Forest Biome</i> (Floresta Tropical Sazonal).                                                                                                                                                                                                 |
| Refl.<br>Eucalipto                                                                                                                               | Mielke et al. (1999)                                                           | Sendo a resistência estomática (rs) inversamente proporcional a condutância estomática (gs) ( $rs = gs^{-1}$ ), obteve-se a primeira em função da segunda.                                                                                                                                |
| <b>Mínima resistência dos estômatos para dossel inferior</b>                                                                                     |                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Café                                                                                                                                             | Land Data Assimilation Systems (LDAS)                                          | Valor correspondente a <i>Closed Shrubland</i> (Arbustos Densos).                                                                                                                                                                                                                         |
| FOD                                                                                                                                              | Lapola et al. (2008)                                                           | Valor correspondente a <i>Tropical Seasonal Forest Biome</i> (Floresta Tropical Sazonal).                                                                                                                                                                                                 |

(continua)

APÊNDICE F – Metodologia de obtenção das variáveis restantes de uso e cobertura do solo.

(continuação)

| <b>Mínima resistência dos estômatos para dossel inferior</b>                                                                                 |                                       |                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pastagem                                                                                                                                     | Land Data Assimilation Systems (LDAS) | Valor correspondente a <i>Grassland</i> (Cobertura de Grama).                                                                           |
| Área Edificada                                                                                                                               | Land Data Assimilation Systems (LDAS) | Valor correspondente a <i>Urban and Built-Up</i> (Área Urbana e em Desenvolvimento).                                                    |
| Macega                                                                                                                                       | Land Data Assimilation Systems (LDAS) | Valor correspondente a <i>Grassland</i> .                                                                                               |
| <b>Limiar de déficit de pressão de vapor acima do qual os estômatos fecham, para o dossel superior (para o dossel superior e sub-bosque)</b> |                                       |                                                                                                                                         |
| FOD                                                                                                                                          | Dorman e Sellers (1989)               | Valor correspondente a <i>Broadleaf evergreen trees</i> (Floresta Folhosa Perenifólia).                                                 |
| Refl. Eucalipto                                                                                                                              | Almeida, Landsbergb e Sands (2004)    | Valor genérico obtido da média entre os clones 15 e 22 referente à lista de parâmetros utilizados na calibração do modelo 3-PG.         |
| <b>Limiar de déficit de pressão de vapor acima do qual os estômatos fecham, para o dossel inferior (para o dossel superior e sub-bosque)</b> |                                       |                                                                                                                                         |
| Café                                                                                                                                         | Dorman e Sellers (1989)               | Valor correspondente a <i>Broadleaf Shrubs With Bare Soil</i> (Arbustos Folhosos com Solo Exposto).                                     |
| FOD                                                                                                                                          | Dorman e Sellers (1989)               | Valor obtido por consideração dessa classe como sendo correspondente a <i>Broadleaf evergreen trees</i> (Floresta Folhosa Perenifólia). |
| Pastagem                                                                                                                                     | Dorman e Sellers (1989)               | Valor obtido por consideração dessa classe como sendo correspondente a <i>Groundcover</i> (cobertura do solo ou gramíneas).             |
| Área Edificada                                                                                                                               | Land Data Assimilation Systems (LDAS) | Valor obtido por consideração dessa classe como sendo correspondente a <i>Urban and Built-Up</i> (área urbana e em desenvolvimento).    |
| Macega                                                                                                                                       | Land Data Assimilation Systems (LDAS) | Valor obtido por consideração dessa classe como sendo correspondente a <i>Groundcover</i> .                                             |

A altura do dossel inferior das formações vegetais da FOD foi obtida de Curto, (2011), considerando essa altura como proporcionalmente equivalente à relação entre a altura média do primeiro extrato (mais baixo, 2,98 m) e o último extrato (mais alto, 20,71 m), calculados pelo método de Souza et al. (2003 citado por Curto, 2011).

A obtenção da proporção da altura do tronco (*Trunk space*) de vegetações arbóreas em formações florestais heterogêneas foi obtida, quando possível, adotando-se a altura média da camada mais baixa do dossel.

O coeficiente de atenuação aerodinâmica do dossel, para as formações vegetais da FOD e da classe reflorestamento eucalipto, foi definido como 2,5, o que corresponde ao valor médio dos valores típicos ocorrentes no intervalo 2 a 3 (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994).

APÊNDICE G – Atributos topográficos primários e secundários do solo

| Atributo                        | Definição                                                                                                                                                                     | Processo físico ou variável ao qual se encontra correlacionado                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Altitude                        | Elevação acima o nível do mar.                                                                                                                                                | Gradiente climático local, padrões vegetacionais, potencial energético.                                                                                                                                                                                    |
| Declividade                     | Ângulo entre o plano horizontal e um plano tangencial para a superfície do terreno.                                                                                           | Velocidade do fluxo superficial, subsuperficial e lateral, taxa de escoamento, precipitação, vegetação, geomorfologia, conteúdo de água no solo, classe de aptidão do solo.                                                                                |
| Declive de Captação             | Inclinação média ao longo da bacia hidrográfica.                                                                                                                              | Tempo de concentração.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Área de Captação                | Área de drenagem para saída de captação.                                                                                                                                      | Volume de escoamento superficial.                                                                                                                                                                                                                          |
| Comprimento do Caminho de Fluxo | Distância máxima de fluxo de água para um ponto na área de captação.                                                                                                          | Taxa de erosão, produção de sedimento, tempo de concentração.                                                                                                                                                                                              |
| Curvatura do Perfil             | Curvatura da superfície do terreno na direção identificada pelo ângulo do aspecto.                                                                                            | Aceleração dos fluxos laterais a jusante, taxa de erosão e deposição, geomorfologia.                                                                                                                                                                       |
| Curvatura Plana                 | Contorno da curvatura.                                                                                                                                                        | Convergência/divergência do fluxo, conteúdo de água no solo, características do solo.                                                                                                                                                                      |
| Curvatura Tangencial            | Curvatura da superfície do terreno na direção ortogonal que é identificada pelo ângulo do aspecto                                                                             | Fornece medida alternativa de convergência e divergência do fluxo local lateral, taxa de acumulação lateral.                                                                                                                                               |
| Aspecto                         | Ângulo horário do norte da projeção do vetor normal à superfície do terreno no plano horizontal.                                                                              | Direção de fluxos laterais, intensidade relativa da radiação solar.                                                                                                                                                                                        |
| Índice Topográfico de Umidade   | $\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right)$                                                                                                                              | Descrição da distribuição espacial do índice de umidade e extensão das zonas de saturação para geração de escoamento como uma função do declive da área de contribuição. Previsão de zonas de saturação tipicamente em segmentos convergentes da paisagem. |
| Radiação Solar                  | Proporção da incidência de radiação solar extraterrestre sobre uma superfície local inclinada em relação a uma superfície horizontal de uma determinada latitude e longitude. | Variabilidade relativa da taxa de evapotranspiração, exposição do terreno, disponibilidade de energia.                                                                                                                                                     |

(continua)

## APÊNDICE G – Atributos topográficos primários e secundários do solo

(continuação)

| Atributo                   | Definição                                                                                                          | Processo físico ou variável ao qual se encontra correlacionado                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Índice de Energia do Fluxo | $\alpha \tan(\beta)$                                                                                               | Medida do poder erosivo da água que flui com base na suposição de que a descarga (q) é um índice proporcional à área de captação específica ( $\alpha$ ). Prevê erosão líquida em áreas de perfil que apresentam convexidade e concavidade tangencial (aceleração do fluxo e zonas de convergência) e deposição em áreas de perfil côncavo (zonas de diminuição da velocidade do fluxo). |
| Fator LS                   | $LS = 0,00984L^{0,63}D^{1,18}$ em que:<br>L = Comprimento de rampa<br>D = Declividade                              | Este índice de capacidade de transporte de sedimentos foi derivado da teoria de unidade “stream power” e é equivalente ao fator da EUPSR em determinadas circunstâncias. Utilizado também para prever os locais de erosão e áreas de deposição.                                                                                                                                          |
| Relevo Relativo            | Característica de drenagem da paisagem.                                                                            | A razão entre a diferença de altitudes em um determinado ponto na superfície do solo e o ponto mais baixo de um divisor de águas para a diferença de altitudes entre o mais alto e o mais baixo ponto de uma bacia hidrográfica.                                                                                                                                                         |
| Distância Euclidiana       | Descreve a relação de cada célula do raster com uma fonte específica, a qual foi definida como a rede de drenagem. | Associado com outros atributos permite inferir a influência da proximidade desses à fonte selecionada. Como exemplo cita-se a ocorrência de regiões com maior deficiência de drenagem quando próximas a fonte (rede de drenagem) ou menor disponibilidade hídrica, quando distante da fonte.                                                                                             |

$\alpha$ : Área de captação (m),  $\beta$ : Declividade (radiano)



## APÊNDICE H – Processamento para adequação do GDEM2.

1. Inserção das 16 cenas em uma armação de dados e importação para um geodatabase, sem especificações dos parâmetros de armazenamento;

2. Criação de um conjunto de dados de mosaico vazio para posterior gerenciamento, visualização e consulta a coleção dos rasters, sem alteração do sistema de projeção, tipo de pixel ou número de bandas;

3. Preenchimento do conjunto de dados de mosaico vazio pela adição da coleção de rasters, com definição do tipo de raster como *Digital Terrain Elevation Data (DTED)*, permitindo a identificação de metadados, georreferenciamento, data de aquisição, tipo de sensor, comprimento de onda da banda, armazenamento dos pixels, formato do raster e outros parâmetros específicos. Cálculo do tamanho do intervalo das células de cada conjunto de dados e geração do polígono limite do conjunto de dados mosaico;

4. Construção de pirâmides, por técnica de reamostragem do tipo bilinear, e cálculos estatísticos para aprimoramento do desempenho de exibição e correto simbolismo do conjunto de dados raster além do conjunto de dados mosaico. Uso de compressão do tipo LZ77 visando preservar os valores das células do raster, sem qualquer perda de informação ou alterações;

5. Construção de “*Seamlines*” para definição da linha ao longo da qual os rasters, no conjunto de dado de mosaico, foram mosaicados, e com vista a garantir a melhor construção possível do mesmo. O método de construção de “*Seamlines*” adotado foi do tipo radiometria, nos quais são examinados os valores e padrões das áreas de interseção das cenas e realizado o cálculo de percursos ao longo de pontos de interseção. Devido à correção de cores ao conjunto de dados mosaico não ter sido realizada, não houve necessidade de priorização desse procedimento sobre a construção de “*Seamlines*” quando do uso do método radiometria. O tamanho de célula do raster para a construção dessa feição matricial foi definida com o mesmo tamanho de célula dos dados de entrada. O método de classificação que define a ordem em que os rasters serão fundidos foi do tipo noroeste. A ordem de classificação dos rasters foi do tipo ascendente. A matização (harmonização) ao longo das “*Seamlines*” na região onde ocorreu sobreposição das cenas foi definida como “interna”, impedindo assim, o uso de valores externos à área sobreposta para tal procedimento, e teve-se como unidade de medição o próprio pixel;

6. Construção de “*Footprints*” (feição de dimensionamento dos dados válidos dos rasters) adotando o método “radiometria”, com vista à exclusão de áreas de fronteiras com dados inválidos. Os valores mínimos e máximos determinados pela profundidade dos bits, como valores válido, foram definidos com 0 e 65.535 ( $2^{16}$ ) respectivamente. Ressalta-se que esse intervalo de valores não excluiu os valores negativos de altitude dos dados de entrada. De forma a não haver suavização do polígono delimitador, adotou-se o valor de -1 (valor de configuração) para que o número de vértices, da feição de saída, fosse correspondente ao total dos vértices presentes nas regiões marginais no conjunto do mosaico. Optou-se pela atualização da feição de limite (*Boundary*), mesclando as feições “*Footprints*” para criação de um único polígono delimitador da extensão dos pixels válidos;

7. Mosaicagem das 16 cenas obedecendo à condição de que os rasters possuem o mesmo número de bandas e a mesma profundidade de bits. O sistema de referência espacial e tipo de pixels foram mantidos inalterados. Como a área de sobreposição dos rasters apresentou mesmos valores, o operado de mosaico foi determinado para manter os mesmos valores correspondentes aos dos rasters de imediata sobreposição. O modo de cores de mapa do mosaico foi determinado tomando como referência a primeira cena de entrada.

8. Extração do raster mosaico gerado no procedimento anterior com uso do limite (*Boundary*) desenvolvido no procedimento 6, obtendo assim uma MDE apenas com valores válidos e ausência das áreas de fronteira, que correspondem especificamente, a massa de água marítima;

9. Transformação do sistema de coordenadas do produto obtido no procedimento anterior para sistema de coordenadas projetadas Sirgas 2000 UTM Zona número 24 designador K hemisfério Sul, com transformação geográfica do tipo WGS 1984 para SIRGAS 2000 com técnica de reamostragem dos valores do tipo bilinear e conservação do grid de espaçamento (tamanho de célula) com mesma resolução.

## APÊNDICE I – Correção de possíveis valores atípicos presentes no MDE

1. Aplicação do *Laplacian Filter* (*Laplacian of Gaussian*). O método kernel foi definido com ajuste visual pela ponderação entre áreas selecionadas como de referência com presença e ausência de artefatos no MDE. Assim foi observado se o aumento da frequência local era razoável em ambas as extremidades. Os parâmetros ajustados, foram definidos como 100 para o desvio padrão (sigma), 8 para o raio de vizinhança e definição do modo de pesquisa como do tipo circular;

2. Reclassificação do raster, originário da filtragem, em duas classes, com quebra de valores relativos em 7%, definindo assim as áreas com mudanças bruscas de altitude;

3. Remoção dos dados de elevação, do GDEM2, nas áreas correspondentes à classe de valores máximos do raster obtido no passo anterior, anulando os valores dessas áreas;

4. Conversão da classe de valores atípicos em feição poligonal sem suavização de vértices;

5. Definição de uma área tamponante ao redor da feição poligonal dos valores atípicos, adotada como uma máscara de extração da área circunvizinha às áreas com células nulas no raster de elevação. O afastamento foi definido em 1 km (aproximadamente 33 células), esse valor correspondeu a um limite suficientemente representativo para uso em interpolação do algoritmo ANUDEM 5.3, como definido no procedimento 7, (HUTCHINSON, et al., 2011);

6. Conversão da área extraída no procedimento 5 em feição de ponto contendo os z-valores a serem interpolados em uma superfície raster;

7. Interpolação com o uso do algoritmo ANUDEM 5.3. O tamanho da célula foi definido para o mesmo tamanho do grid de espaçamento do raster de elevação (30m), já que este produto seria utilizado para reposição das regiões onde foram extraídos os valores atípicos no MDE. Para obter os melhores resultados de interpolação ao longo das bordas da quadrícula de saída, os limites de x e y foram menores do que a extensão dos dados de entrada em pelo menos 20 células em cada um dos lados. Optou-se apenas pela restrição do valor mínimo de altitude para interpolação (com base nos dados de entrada) uma vez que o valor máximo real era desconhecido. Como o objetivo da interpolação era independente de criar uma superfície sem descontinuidade no fluxo do terreno, foi estabelecida a não remoção

de depressões no terreno. Com vista a otimizar o método de pesquisa, utilizado durante a geração de fluxos e sulcos, especificou-se a feição dominante de entrada (ponto). O valor máximo definido como limite de interações foi igual a 20, já que o mesmo apresentou melhores resultados na espacialização da superfície quando comparados ao número de depressões espúrias restantes em cada valor de interações testado por variações desse limite. O fator de espacialização do erro – utilizado para o ajuste da suavização durante a conversão dos dados de entrada para uma superfície raster – foi de 1 em um intervalo de 0.25 a 4, em que menores valores resultam em menor suavização. Por padrão, pela feição do tipo ponto ser o dado de entrada dominante, definiu-se como 0 o valor de tolerância que reflete a precisão e a densidade dos pontos de elevação em relação à superfície de drenagem, e 200 como a tolerância de folga na drenagem através de barreiras irrealísticas;

8. Extração dos novos valores (obtidos por interpolação no procedimento anterior) pelo uso de uma feição com afastamento de 300m das regiões de valores atípicos definidas no procedimento 2;

9. Correção do MDE e sua área de influência, por substituição dos valores atípicos e sua área de influência, com o produto gerado no procedimento anterior.

## APÊNDICE J – Cálculo dos atributos topográficos primários e secundários do terreno

1. Preenchimento das depressões naturais do terreno e depressões espúrias com o método proposto por Planchon e Darboux (2001). O ângulo mínimo do declive preservado de uma célula para o outra foi de 0,01 graus;

2. Cálculo da Área de Captação realizado com base em uma *Área de Captação Modificada* (BOEHNER et al., 2002), diferindo da primeira por não trata o fluxo como uma fina película, mas como resultado, prevê que as células situadas em vales, com uma pequena distância vertical, apresentem um canal de uma forma mais realística, pela aplicação de um efeito de sucção, o qual, baseando-se em uma feição poligonal de massa d'água, foi definido igual a 10;

3. Cálculo da Declive de Captação (BOEHNER et al., 2002) definindo a mínima declividade como 0, o fator de ponderação para o cálculo do índice de inclinação como 1, e o fator de compensação igual a 0,1;

4. Cálculo do Índice Topográfico de Umidade (BOEHNER et al., 2002) obtido em função da Área de Captação Modificada e Declive de Captação, sendo o tipo de área definido como a raiz quadrada da área de captação;

5. Cálculo do Índice de Energia do Fluxo (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991) com efeito realístico da área de inundação promovido no Índice Topográfico de Umidade por uso da Área de Captação Modificada e Declive de Captação para o calculo desse índice;

6. Cálculo do Comprimento do Caminho de Fluxo (QUINN et al. 1991) adotando o método Determinístico 8 (D8) como algoritmo de roteamento (O'CALLAGHAN; MARK, 1984);

7. Cálculo da Curvatura Tangencial (WILSON; GALLANT, 2000), Curvatura do Perfil e Curvatura Plana (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991; ZEVEBERGEN; THORNE, 1987) com fator de conversão definido para 1, por serem idênticas as unidades verticais e horizontais do MDE;

8. Cálculo do Aspecto (BURROUGH; MCDONELL, 1998) pela identificação da direção da descida da taxa máxima de mudança do valor de cada célula e seus vizinhos;

9. Cálculo da Declividade (BURROUGH; MCDONELL, 1998) para obtenção do gradiente de inclinação de cada célula na superfície raster. A unidade de medida

foi definida para percentagem com o intervalo de valores variando de 0 a infinito;

10. Cálculo do Fator LS (BERTONI; LONBARD NETO, 2012) utilizado pela *Universal Soil Loss Equation (USLE)* para obtenção da combinação de comprimento de rampa e grau de declive;

11. Cálculo da Radiação Solar (MCCUNE; DYLAN, 2002) obtendo o potencial de radiação incidente direta anual e carga de calor para estimar o potencial de radiação solar. Para este cálculo foi utilizada uma superfície raster com as mesmas dimensões da área de estudo, contendo valores de latitude em graus decimais;

12. Cálculo do Relevo Relativo (FLORINSKY et al., 2002) para caracterização da drenagem da paisagem. Calculou-se inicialmente a direção de fluxo do terreno (GREENLEE, 1987) seguido pela acumulação do mesmo (JENSON; DOMINGUE, 1988.) no intuito de estabelecer a hidrografia numérica para uma determinada área de captação. Na definição da área de captação mínima do fluxo acumulado, constituinte de um segmento hidrográfico, tomou-se como referência uma hidrografia vetorizada na escala de 1:50.000. A identificação dos cursos d'água das bacias de cabeceira foi realizada pela conversão do ponto mais a montante, dos cursos d'água de primeira ordem, em feição de ponto (nascentes). Adotando-se o método espacial de seleção do tipo interseção, isolou-se o conjunto de feição linear, correspondente aos cursos d'água de primeira ordem, para o cálculo do valor médio de comprimento. Esse valor foi utilizado como diâmetro de uma circunferência média das menores áreas de captação dos cursos d'água de primeira ordem. Com o uso do raster de acumulação de fluxo, calculou-se a rede hidrográfica com limiar definido por um número de células referente à área deste círculo, o que correspondeu a 600 células (54 ha). Atribuíram-se valores exclusivos para as seções da rede linear rasterizada localizada entre as interseções. Criou-se uma grade em que cada célula, pertencente a uma determinada área de captação (sub-bacia), possuísse o valor correspondente da seção da rede linear rasterizada. Estas por sua vez, foram convertidas em feição poligonal, e acrescidas áreas de captação costeiras. Muitos pequenos polígonos são formados durante estes procedimentos, assim optou-se por mesclá-los com os polígonos vizinhos com a mais longa fronteira em comum. Este procedimento foi repetido até que não houvesse mais polígonos com áreas inferiores a pré-estabelecida. Por fim, o Relevo Relativo foi obtido calculando-se o intervalo entre os valores extremos do MDE dentro de cada uma das zonas correspondentes

as áreas de captação mínima;

13. Cálculo da Distância Euclidiana tomando como a fonte mais próxima a rede de drenagem em formato matricial, definida pelo número de células referentes à área mínima de captação obtida no procedimento anterior.

## ANEXO A – Parâmetros da Função de Pedotransferência para os níveis 1 e 2

| Variável**            | Nível 1*              |          |                                      |            | Nível 2*              |          |                                      |            |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------------------------------------|------------|-----------------------|----------|--------------------------------------|------------|
|                       | $\ln \alpha$          | n        | $\theta_s$                           | $\theta_r$ | $\ln \alpha$          | n        | $\theta_s$                           | $\theta_r$ |
|                       | 100 kPa <sup>-1</sup> | x 100    | 100 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> |            | 100 kPa <sup>-1</sup> | x 100    | 100 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> |            |
| $a_{i,1}$             | 264.466               | 219.095  | 82.193                               | -13.365    | -200.830              | 217.498  | 42.125                               | -1.022     |
| <b>CS</b>             | -                     | -        | -                                    | -          | -                     | -        | -                                    | -          |
| <b>FS</b>             | -                     | -        | -                                    | -          | -                     | -        | -                                    | -          |
| <b>S</b>              | -                     | -        | -0.018                               | 0.250      | -                     | -        | -                                    | 0.175      |
| <b>C</b>              | 1.212                 | -        | -                                    | 0.338      | -                     | -        | -                                    | 0.277      |
| $M_e$                 | -378.611              | -152.966 | 23.238                               | 39.914     | 184.947               | -147.452 | 57.907                               | 48.355     |
| $D_b$                 | -328.346              | -        | -28.674                              | 7.676      | -                     | -        | -                                    | -          |
| <b>OC</b>             | -                     | -        | -                                    | -          | -                     | -        | 1.559                                | -1.573     |
| <b>CS.FS</b>          | 0.005                 | -        | -                                    | -          | -0.028                | -        | -0.004                               | -          |
| <b>CS.S</b>           | 0.078                 | -0.030   | 0.005                                | -          | 0.038                 | -0.030   | 0.003                                | -          |
| <b>CS.C</b>           | -                     | -        | -0.003                               | -          | -                     | -        | -0.004                               | -          |
| <b>FS.S</b>           | -                     | -        | -                                    | -          | -                     | -        | -                                    | -          |
| <b>FS.C</b>           | 0.096                 | -0.035   | 0.003                                | -          | 0.063                 | -0.038   | -                                    | 0.001      |
| <b>S.C</b>            | -                     | -        | -                                    | -          | -0.063                | -        | -0.004                               | -          |
| <b>CS<sup>2</sup></b> | 0.062                 | -0.011   | -0.001                               | -          | 0.066                 | -0.010   | -                                    | -          |
| <b>FS<sup>2</sup></b> | -                     | 0.003    | -                                    | -          | -                     | 0.007    | -                                    | -          |
| <b>S<sup>2</sup></b>  | -                     | -        | -                                    | -0.005     | -                     | -        | -                                    | -0.005     |
| <b>C<sup>2</sup></b>  | -                     | -        | -                                    | -0.001     | -                     | -        | -                                    | -0.001     |

\* Nível 1 inclui todas as informações básicas; Nível 2 exclui densidade aparente;

\*\*  $D_b$  (g cm<sup>-3</sup>);  $M_e$  (g g<sup>-1</sup>); e CO (%)



## ANEXO B – Parâmetros da Função de Pedotransferência para os níveis 3 e 4

| Variável**            | Nível 3*              |         |                                      |            | Nível 4*              |         |                                      |            |
|-----------------------|-----------------------|---------|--------------------------------------|------------|-----------------------|---------|--------------------------------------|------------|
|                       | In $\alpha$           | $n$     | $\theta_s$                           | $\theta_r$ | In $\alpha$           | $n$     | $\theta_s$                           | $\theta_r$ |
|                       | 100 kPa <sup>-1</sup> | x 100   | 100 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> |            | 100 kPa <sup>-1</sup> | x 100   | 100 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> |            |
| $a_{i,1}$             | 205.655               | 168.862 | 91.620                               | 23.387     | -237.011              | 170.935 | 36.980                               | 15.757     |
| <b>CS</b>             | -                     | -       | -                                    | -          | 3.624                 | -       | -                                    | -          |
| <b>FS</b>             | -                     | -       | -                                    | -          | -                     | -       | -                                    | -          |
| <b>S</b>              | -2.556                | -       | -                                    | -          | -                     | -       | 0.376                                | -          |
| <b>C</b>              | -0.133                | -       | -                                    | 0.110      | -                     | -       | -                                    | 0.136      |
| $M_e$                 | -                     | -       | -                                    | -          | -                     | -       | -                                    | -          |
| $D_b$                 | -247.490              | -       | -30.005                              | -4.795     | -                     | -       | -                                    | -          |
| <b>OC</b>             | -                     | -       | 1.593                                | -          | -                     | -       | 3.258                                | -          |
| <b>CS.FS</b>          | -0.019                | -       | -                                    | -          | -                     | -       | -                                    | -          |
| <b>CS.S</b>           | 0.118                 | -0.026  | 0.002                                | -          | 0.004                 | -0.018  | -                                    | -          |
| <b>CS.C</b>           | -                     | -       | -0.004                               | -          | 0.001                 | -       | -0.003                               | -          |
| <b>FS.S</b>           | -                     | -       | -                                    | -          | -                     | -       | -                                    | -          |
| <b>FS.C</b>           | 0.052                 | -0.026  | -                                    | -          | 0.090                 | -0.031  | 0.003                                | -          |
| <b>S.C</b>            | -                     | -       | -                                    | 0.005      | -                     | -       | -0.003                               | 0.005      |
| <b>CS<sup>2</sup></b> | 0.062                 | -       | -0.002                               | -0.003     | -                     | -       | -                                    | -0.003     |
| <b>FS<sup>2</sup></b> | -                     | 0.009   | -0.001                               | -0.002     | -                     | 0.009   | -                                    | -0.002     |
| <b>S<sup>2</sup></b>  | -                     | -0.008  | -                                    | -0.005     | -                     | -0.008  | -                                    | -0.005     |
| <b>C<sup>2</sup></b>  | -                     | -       | -                                    | -          | 0.018                 | -       | 0.003                                | -          |

\* Nível 3 exclui umidade equivalente; Nível 4 exclui tanto umidade equivalente como densidade aparente

\*\*  $D_b$  (g cm<sup>-3</sup>);  $M_e$  (g g<sup>-1</sup>); e CO (%)