

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

HELDER DE AMORIM MENDES

METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DHSVM

JERÔNIMO MONTEIRO - ES
2016

HELDER DE AMORIM MENDES

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
HIDROLÓGICO DHSVM**

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

Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio
Coorientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti

JERÔNIMO MONTEIRO - ES
2016

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

Mendes, Helder de Amorim, 1969-
M538m Metodologia para calibração do modelo hidrológico DHSVM/ Helder de
Amorim Mendes. – 2016.
138f. : il.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Coorientadores: Sidney Sara Zanetti.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Modelagem hidrológica. 2. Calibração. 3. Heurística. I. Cecílio,
Roberto Avelino. II. Zanetti, Sidney Sara. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

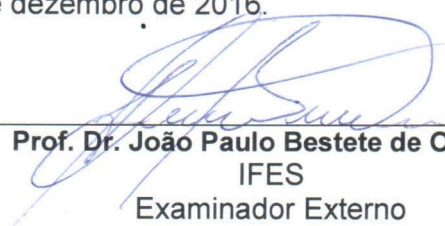
CDU: 630

METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DHSVM


Helder de Amorim Mendes

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


Aprovada em 19 de dezembro de 2016.



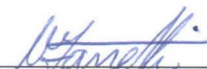
Prof. Dr. João Paulo Bestete de Oliveira
IFES
Examinador Externo



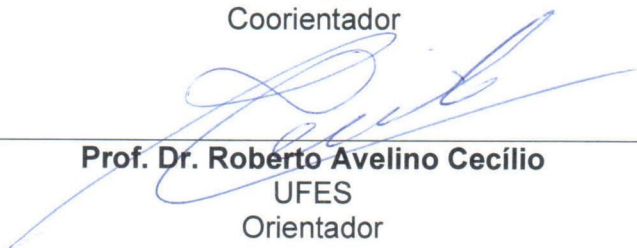
Profª. Drª. Larice Nogueira de Andrade
UFES
Examinadora Externa



Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
UFES
Examinador Externo



Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti
UFES
Coorientador



Prof. Dr. Roberto Avelino Cecilio
UFES
Orientador

Este trabalho é dedicado a minha amada esposa Letícia, meus queridos filhos Amanda e Victor e à minha querida mãe Inês.

Agradecimentos

Agradeço à minha esposa Leticia e aos meus filhos Amanda e Victor pelo apoio e compreensão por minhas ausências e momentos de mau-humor.

Aos meus pais Inês e Ruy (*in memoriam*) pela formação e o apoio dado em todas as etapas da minha vida.

A toda minha família por me incentivarem e me apoiarem.

Ao meu orientador, prof. Roberto, por ter acreditado que, mesmo sendo de uma outra área do conhecimento, eu teria capacidade de enfrenar este desafio e, também, por todo o seu conhecimento compartilhado comigo.

Ao meu co-orientador, prof. Sidney, pelo apoio na condução da pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho, prof. Alexandre e prof. Geraldo, pelos momentos de discussão sobre o trabalho.

A todos os colegas do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pela amizade e o apoio.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado.”

Roberto Shinyashiki

Resumo

Neste trabalho, foi proposta uma ferramenta de calibração automática para o modelo *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*. O princípio básico do calibrador implementado é a utilização da meta-heurística *Clustering Search* (CS), que permite a obtenção, além da solução calibrada, de um conjunto de soluções sub-ótimas resultantes do processo. Essas soluções são utilizadas para a verificação da possibilidade de melhoria da calibração de uma sub-bacia por meio da aplicação das soluções obtidas para um conjunto de outras sub-bacias. A ferramenta e a metodologia de combinação proposta foram aplicadas na calibração de uma bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil, formada por um conjunto de sub-bacias cujas vazões são monitoradas. Os resultados obtidos mostram que tanto a ferramenta quanto a metodologia de combinação propostas são eficientes, levando a uma melhoria considerável dos resultados da modelagem para a bacia.

Palavras-chave: modelagem hidrológica. calibração. heurísticas.

Abstract

In this work the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model was studied in order to propose an automatic calibration tool for the same. The basic principle of the implemented calibrator is the use of Clustering Search meta-heuristic (CS) that has the feature to produce a set of sub-optimal solutions, resulting from the calibration process. This solutions are used for verification of the possibility to improve the calibration of a given sub-basin by applying the solutions obtained for a number of other sub-basins. The tool and methodology of the proposed combination were applied to the calibration of a basin in southeastern Brazil formed by a set of sub-basins whose drains are monitored. The results show that both the tool and the methodology of combination proposed are effective, leading to a considerable improvement in the modeling resutaldos for the basin.

Keywords: hydrology modeling. model calibration. metaheuristics.

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Seções do arquivo principal de configuração do modelo DHSVM | 24 |
| Tabela 2 – Constantes do modelo DHSVM | 25 |
| Tabela 3 – Parâmetros de Solo do modelo DHSVM | 25 |
| Tabela 4 – Parâmetros da vegetação do modelo DHSVM | 26 |
| Tabela 5 – Parâmetros iniciais para as classes de solo presentes na área da sub-bacia do rio Pardo contida na bacia do rio Itapemirim (ES). | 44 |
| Tabela 6 – Parâmetros de Uso da terra, presentes na área da sub-bacia do rio Pardo contida na bacia do rio Itapemirim (ES). | 45 |
| Tabela 7 – Estações utilizadas como fonte de informações hidroclimatológicas. . . | 46 |
| Tabela 8 – Estatísticas referentes às modelagens para a bacia do rio Pardo, considerando as resoluções espaciais de 45, 100, 150 e 200 metros | 50 |
| Tabela 9 – Estatísticas referentes às modelagens para a bacia do rio Pardo, considerando as profundidades de 5, 20, 120 e 160 metros | 52 |
| Tabela 10 – Parâmetros da heurística híbrida CS. | 58 |
| Tabela 11 – Parâmetros da meta-heurística SA | 59 |
| Tabela 12 – Parâmetros de solo iniciais. | 63 |
| Tabela 13 – Parâmetros de uso da terra. | 64 |
| Tabela 14 – Estações utilizadas como fonte de informações hidroclimatológicas. . . | 66 |
| Tabela 15 – Parâmetros de entrada para a calibração | 66 |
| Tabela 16 – Estatísticas para a modelagem inicial da sub-bacia em estudo. | 73 |
| Tabela 17 – Parâmetros de entrada e valores calibrados para os parâmetros de solo referentes à bacia do rio Itapemirim. | 74 |
| Tabela 18 – Estatísticas para as modelagens inicial e após a calibração. | 76 |
| Tabela 19 – Dados de localização geográfica, altitude e área de drenagem referentes às estações fluviométricas situadas na área em estudo. | 82 |
| Tabela 20 – Parâmetros do modelo DHSVM referentes aos tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. | 83 |
| Tabela 21 – Parâmetros do modelo DHSVM referentes ao uso e ocupação do solo presentes na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. | 85 |
| Tabela 22 – Parâmetros de entrada para a calibração. Foram considerados três parâmetros: taxa de escoamento lateral do solo saturado K_{ls} , taxa de decaimento da K_{ls} , taxa máxima de infiltração e a porosidade do solo. . . | 86 |
| Tabela 23 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Castelo. | 89 |
| Tabela 24 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Fazenda Lajinha. | 89 |

| | |
|--|----|
| Tabela 25 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Itaici. | 90 |
| Tabela 26 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia de Iúna. | 90 |
| Tabela 27 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Paineiras. | 91 |
| Tabela 28 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Rive. | 91 |
| Tabela 29 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia São Miguel. | 92 |
| Tabela 30 – Parâmetros e índice NS para os cinco <i>clusters</i> obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Terra Corrida. | 92 |
| Tabela 31 – <i>Cluster</i> e respectivos coeficientes de Nash-Sutcliffe (entre parêntesis) pertinentes à aplicação de cada <i>cluster</i> de calibração nas outras sub-bacias. | 94 |

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Fluxograma das etapas para execução do modelo DHSVM. | 24 |
| Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo, sub-bacia do rio Pardo, contida na bacia do rio Itapemirim(ES). | 42 |
| Figura 3 – Mapas de classes de solo e de uso da terra referentes à bacia do rio Pardo | 42 |
| Figura 4 – Hidrógrafas comparativas para as modelagens com diferentes resoluções espaciais. | 49 |
| Figura 5 – Hidrógrafas comparativas para as modelagens com diferentes profundidades de solo e a vazão observada. | 51 |
| Figura 6 – Fluxograma da heurística híbrida CS. | 57 |
| Figura 7 – Localização geográfica da área de estudo. | 61 |
| Figura 8 – Mapas de classes de solo e de sso da terra referentes à bacia de Rive. . | 62 |
| Figura 9 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas. | 65 |
| Figura 10 – Tela principal do aplicativo de calibração. | 67 |
| Figura 11 – Tela exibida ao selecionar a opção "Criar novo projeto de calibração". O campo "Nome do projeto"é obrigatório. | 68 |
| Figura 12 – Tela de edição/inclusão das vazões observadas. Os valores devem ser inseridos em ordem crescente de data. | 68 |
| Figura 13 – Tela de Cadastro dos parâmetros de calibração. | 69 |
| Figura 14 – Tela de execução do aplicativo de calibração que apresenta ao usuário a lista de projetos cadastrados e os campos para preenchimento dos valores dos parâmetros de calibração. | 70 |
| Figura 15 – Tela de resultado referente à melhor solução obtida no processo de calibração onde são apresentados os valores das estatísticas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados. | 70 |
| Figura 16 – Tela de resultado das soluções finais para os <i>clusters</i> obtidos no processo de calibração. São apresentados os valores das estatísticas calculadas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados. | 71 |
| Figura 17 – Tela com os resultados de todas as soluções obtidas no processo de calibração. Para a solução selecionada são apresentados os valores das estatísticas calculadas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados. | 72 |
| Figura 18 – Hidrogramas e gráfico de dispersão resultantes da modelagem da sub-bacia de Rive a partir dos valores iniciais dos parâmetros. | 73 |
| Figura 19 – Hidrogramas e gráfico de dispersão resultantes da calibração da sub-bacia de Rive. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 20 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, das sub-bacias e das estações fluviométricas. | 81 |
| Figura 21 – Mapas de classes de tipos de solo e de tipos de Uso da terra referentes à bacia do rio Itapemirim. | 82 |
| Figura 22 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas. | 84 |
| Figura 23 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a bacia Castelo. | 105 |
| Figura 24 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Fazenda Lajinha. | 106 |
| Figura 25 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Itaici. | 106 |
| Figura 26 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Iúna. | 107 |
| Figura 27 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Paineiras. | 107 |
| Figura 28 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Rive. | 108 |
| Figura 29 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia São Miguel. | 108 |
| Figura 30 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Terra Corrida. | 109 |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.0.1 | Objetivo geral | 19 |
| 1.0.2 | Objetivos específicos | 19 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 | Vazão em cursos d'água | 20 |
| 2.2 | Modelos hidrológicos | 21 |
| 2.2.1 | Classificação quanto a funcionalidade | 21 |
| 2.2.2 | Classificação quanto à complexidade | 22 |
| 2.2.3 | Classificação quanto à aplicabilidade | 22 |
| 2.3 | DHSVM - <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i> | 22 |
| 2.3.1 | Parâmetros de entrada do modelo | 23 |
| 2.3.2 | Balço de radiação | 27 |
| 2.3.2.1 | Balço de ondas curtas | 27 |
| 2.3.2.2 | Balço de ondas longas | 28 |
| 2.3.3 | Interceptação da precipitação pela cobertura vegetal | 28 |
| 2.3.4 | Evapotranspiração | 29 |
| 2.3.5 | Infiltração | 31 |
| 2.3.6 | Movimentação vertical da água no solo não saturado | 32 |
| 2.3.7 | Escoamento sub-superficial | 32 |
| 2.3.8 | Deflúvio | 34 |
| 2.3.9 | Escoamento superficial | 35 |
| 2.4 | Calibração de modelos hidrológicos | 35 |
| 2.4.1 | <i>Shuffled complex evolution</i> (SCE-UA) | 37 |
| 2.4.2 | Algoritmos genéticos (AG) | 38 |
| 2.4.3 | Simulated annealing (SA) | 38 |
| 3 | INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO SOLO E DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA EFICIÊNCIA DO MODELO DHSVM | 39 |
| 3.1 | Resumo | 39 |
| 3.2 | Introdução | 39 |
| 3.3 | Material e métodos | 41 |
| 3.3.1 | Descrição da área em estudo | 41 |
| 3.3.2 | Descrição do modelo | 42 |
| 3.3.3 | Dados de entrada | 43 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.3.4 | Modelagem das diferentes resoluções espaciais e profundidades do solo | 46 |
| 3.3.5 | Avaliação da eficiência do modelo | 47 |
| 3.4 | Resultados e discussão | 48 |
| 3.4.1 | Resultados para diferentes resoluções espaciais | 48 |
| 3.4.2 | Resultados para diferentes profundidades do solo | 50 |
| 3.5 | Conclusões | 53 |
| | | |
| 4 | USO DA HEURÍSTICA HÍBRIDA <i>CLUSTERING SEARCH</i> PARA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO DHSVM | 54 |
| 4.1 | Resumo | 54 |
| 4.2 | Introdução | 54 |
| 4.3 | Material e métodos | 56 |
| 4.3.1 | Implementação da heurística híbrida Clustering Search | 56 |
| 4.3.1.1 | Função objetivo | 58 |
| 4.3.1.2 | Busca local | 58 |
| 4.3.1.3 | Geração de soluções vizinhas utilizando o <i>Simulated Annealing</i> | 59 |
| 4.3.1.4 | Implementação do conceito de viés | 59 |
| 4.3.1.5 | Escolha do <i>cluster</i> | 60 |
| 4.3.2 | Estudo de caso | 60 |
| 4.3.3 | Caracterização da área de estudo | 60 |
| 4.3.4 | Dados de entrada do DHSVM | 61 |
| 4.3.5 | Calibração dos parâmetros iniciais | 63 |
| 4.4 | Resultados e discussão | 65 |
| 4.4.1 | Aplicativo implementado | 67 |
| 4.4.2 | Estudo de caso | 72 |
| 4.5 | Conclusão | 77 |
| | | |
| 5 | ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO DHSVM PARA CONJUNTOS DE PARÂMETROS CALIBRADOS EM DIFERENTES SUB-BACIAS | 78 |
| 5.1 | Resumo | 78 |
| 5.2 | Introdução | 78 |
| 5.3 | Material e Métodos | 80 |
| 5.3.1 | Caracterização da área em estudo | 80 |
| 5.3.2 | Calibração das sub-bacias | 86 |
| 5.3.3 | Combinação dos sub-ótimos calibrados para as sub-bacias | 86 |
| 5.4 | Resultados e Discussão | 87 |
| 5.4.1 | Resultados da calibração dos parâmetros | 87 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.4.2 | Resultados da combinação dos parâmetros | 92 |
| 5.5 | Conclusão | 95 |
| 6 | CONCLUSÃO FINAL | 97 |
| | REFERÊNCIAS | 99 |
| | APÊNDICES | 104 |
| | APÊNDICE A – HIDROGRAMAS COMPARATIVOS ENTRE AS VAZÕES OBSERVADAS, CALIBRADAS E MELHORES COMBINADAS | 105 |
| | APÊNDICE B – ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO . . | 110 |

1 Introdução

A água é um recurso natural básico e de extrema importância para a sobrevivência humana. É utilizada para diferentes fins, como para o abastecimento urbano, na indústria e, principalmente, na agricultura. O crescimento constante da população humana tem levado a um aumento significativo da demanda por esse recurso, o que, muitas vezes, leva a disputas e conflitos entre usuários. Além disso, a disponibilidade de água de boa qualidade tem diminuído, uma vez que, tem-se aumentado a poluição dos rios e das águas subterrâneas. Outros fatores, como por exemplo o manejo inadequado do solo, o desmatamento e práticas de cultivo inadequadas têm levado a uma menor disponibilidade de água.

Em função desses problemas, faz-se necessário, cada vez mais, o uso de técnicas e recursos que permitam o melhor gerenciamento dos recursos hídricos, promovendo uma melhora na oferta de água para o atendimento às necessidades de uso, bem como para a manutenção das funções ecológicas dos rios.

O manejo adequado de bacias hidrográficas constitui um bom caminho para favorecer o aumento da disponibilidade de água nos rios, diminuir os eventos de cheia e manter maiores vazões nos períodos de seca, além de reduzir a degradação da qualidade da água. Em essência, o manejo de bacias consiste na utilização de práticas de conservação de solo e manejo agrícola que promovam uma melhoria na disponibilidade e qualidade da água em uma bacia hidrográfica.

Um aspecto importante do gerenciamento de recursos hídricos e do manejo de bacias hidrográficas é o estudo dos impactos causados ao sistema hídrico por parte das ações antrópicas que vêm transformando a paisagem e o ambiente.

Um dos principais recursos disponíveis para a gestão de recursos hídricos e o manejo de bacias é a simulação ou modelagem hidrológica. O uso de desse recurso permite o estudo e a predição do impacto de diferentes práticas de manejo, bem como de mudanças climáticas, no regime hidrológico das bacias.

Esses modelos utilizam equações matemáticas que simulam os processos que ocorrem durante o ciclo hidrológico, permitindo o seu estudo mais detalhado. Dentre os diversos modelos de simulação hidrológica existentes, o *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) se destaca por ser um modelo físico distribuído, no qual os processos do ciclo hidrológico são representados por equações detalhadas. O modelo simula o balanço de

massa e energia para cada pixel de um Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno, que é utilizado para determinar os controles topográficos da precipitação, da temperatura do ar, e do movimento da água na superfície e no sub-solo (WHITAKER et al., 2003).

Para a realização da modelagem, são necessários parâmetros de entrada que variam quanto ao tipo, a quantidade e a unidade, de modelo para modelo. Os parâmetros podem ser obtidos a partir de literatura na área, em trabalhos já realizados, ou por meio de ensaios em laboratório/campo. Esta última, por ser mais trabalhosa e dispendiosa, normalmente não é realizada ou é realizada apenas para pequenas áreas, ou em quantidade de pontos que não permitem uma representação ideal da área. Com relação a dados de literatura ou outros trabalhos realizados, esses nem sempre podem ser os mais indicados para todas regiões e/ou modelos diferentes.

Além da incerteza com relação aos parâmetros de entrada, a própria abstração do modelo, em que as equações em si não são fieis ao sistema real, são também fontes de incertezas nos resultados. Assim, são necessários ajustes nos parâmetros de entrada, de forma que os resultados da modelagem sejam o mais próximo possível dos resultados observados para a bacia modelada, em uma etapa denominada calibração.

A calibração de modelos hidrológicos pode ser realizada manualmente ou de forma automática (BOYLE; GUPTA; SOROOSHIAN, 2000). A calibração automática é feita por métodos estatísticos ou de otimização que buscam ajustar os valores dos parâmetros de entrada do modelo, de forma a aproximar os valores estimados das vazões o máximo possível dos valores observados (FRANCHINI; GALEATI; BERRA, 1998; BLASONE; MADSEN; ROSBJERG, 2007). Dentre as abordagens baseadas em otimização, técnicas heurísticas, como algoritmos genéticos (LIONG; CHAN; SHREERAM, 1995) e *simulate annealing* (THYER; KUCZERA; BATES, 1999), têm sido utilizadas com êxito no processo de calibração, indicando a viabilidade de estudo e utilização de outros métodos heurísticos.

O processo de calibração, embora de extrema importância no processo de modelagem hidrológica, é complexo e nem sempre atinge os objetivos esperados. O grande número de parâmetros e, às vezes, a interdependência entre parâmetros, caracterizam a calibração de modelos hidrológicos como problemas não lineares e descontínuos, o que pode levar à presença de um grande número de mínimos locais e, também, de mais de uma solução ótima. Para esse tipo de problema, a busca por uma solução ótima viável é um processo nem sempre possível a um tempo satisfatório, tornando os métodos heurísticos indicados.

Outro problema frequentemente observado é que os parâmetros de solo e de uso da terra, calibrados para uma bacia, nem sempre são adequados para a aplicação em outra bacia. Nesse caso, torna-se necessário o estudo e proposta de métodos que permitam minimizar os efeitos da transferência de parâmetros de entrada do modelo de uma área para outra.

Do exposto, considera-se que, a heurística híbrida *clustering search* (CS) (CHAVES, 2009) pode ser promissora, tanto na calibração de modelos hidrológicos, quanto na

verificação da viabilidade de extrapolação dos parâmetros calibrados para uma área diferente. O método é uma generalização do método *Evolutionary Clustering Search* (ECS), proposto por Oliveira e Lorena (2004), que implementa o conceito de *clusters* com o objetivo de detectar regiões promissoras no espaço de busca. O fato de o modelo obter, ao final do processo, um conjunto de soluções sub-ótimas viáveis para os *clusters* gerados permite sua utilização para viabilizar o estudo e a determinação de uma solução que seja adequada para diferentes pontos da bacia estudada.

1.0.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é implementar e aplicar a meta-heurística híbrida CS ao problema de calibração do modelo hidrológico DHSVM, além de verificar e apresentar uma metodologia para a escolha do conjunto de parâmetros que melhor se aplique a todos os pontos de uma bacia hidrográfica.

1.0.2 Objetivos específicos

Com a realização do presente trabalho, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Implementar e verificar a eficiência da meta-heurística *Clustering Search* (CS) no processo de calibração do modelo DHSVM;
- Investigar se algum ótimo local obtido durante a execução da meta-heurística CS no processo de calibração do modelo DHSVM pode levar a uma melhor calibração dos parâmetros do modelo;
- Aplicar e testar a metodologia de otimização com o uso da meta-heurística CS no processo de regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos.
- Testar a combinação dos resultados da calibração de sub-bacias, aplicando para cada sub-bacia os resultados da calibração das demais.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Vazão em cursos d'água

A determinação do regime de vazão de cursos d'água é de suma importância pois, além de permitir a previsão de eventos de cheia ou seca dos rios, permite também que um melhor gerenciamento dos recursos seja alcançado. Além disso, é um suporte fundamental para que ações possam ser tomadas no sentido de melhorar o atendimento às demandas pelo recurso como: abastecimento humano, melhoria da qualidade da água e aumento da capacidade de auto depuração dos rios.

As vazões podem se referir a medições instantâneas e, normalmente, o que se adota são as medidas de vazões máximas, mínimas ou médias de longa duração (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006). Segundo Tucci. (2001), entende-se por vazão máxima a maior vazão que ocorre numa seção de um rio num período definido, representando as condições de inundação de um dado local. Tucci. (2001) ainda define que a vazão média anual de um rio é a média diária de todos os valores do ano. A vazão média permite caracterizar a disponibilidade hídrica de uma bacia e o seu potencial energético, entre outros usos. Ainda de acordo com Tucci. (2001), dentro da série histórica de vazões, os menores valores da série são ditas mínimas ou de estiagem, sendo caracterizadas por dois fatores: a quantidade de água e a duração, sendo fundamentais para o cálculo da disponibilidade de água e concessão de outorga. Suas características podem ser estabelecidas pela análise de frequência, curvas de duração ou permanência e depleção. A curva de permanência ou de duração é obtida da frequência de ocorrência das vazões ou níveis de uma determinada bacia. Essa curva retrata a parcela do tempo em que uma determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado. A curva de permanência é utilizada quando se deseja conhecer a permanência no tempo de determinados valores de vazão (TUCCI., 2001).

As vazões de permanência empregadas como referência na legislação brasileira são a Q_{95} , que indica um valor igualado ou superado durante 95% do tempo (ou um risco de não acontecer em 5% do tempo), e a Q_{90} , de permanência durante 90% do tempo (ou um risco de não ocorrer em 10% do tempo), e a $Q_{7,10}$. Esta, de acordo com Mendes (2007), caracteriza-se pela média histórica das vazões mínimas de 7 dias de duração com período de retorno de 10 anos. Ono (2006) fixou a duração de 7 dias para análise, sendo a escolha deste intervalo de tempo se dar por conta das variações de consumo dos dias úteis

e dos finais de semana, possibilitando a operação dos reservatórios absorver o impacto das variações durante a semana. O período de retorno de 10 anos foi escolhido por ser considerado um risco adequado à localidade em estudo, ou seja, julgou-se aceitável que em todo ano houvesse 10% de chance da vazão ficar abaixo do valor mínimo exigido para o suprimento urbano.

2.2 Modelos hidrológicos

Um modelo tem por princípio a representação simplificada da realidade com o objetivo de auxiliar no entendimento e estudo dos processos que envolvem essa realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos hidrológicos, pois ajudam a fornecer uma estimativa do impacto das mudanças climáticas e do uso da terra no regime de vazão de uma bacia hidrográfica (DUNNE, 2001).

Atualmente existe um grande número de modelos hidrológicos disponíveis. Entretanto, o uso desses modelos é um desafio para pesquisadores e profissionais em função do desconhecimento dos pressupostos e limites de cada modelo, bem como da influência de cada parâmetro do modelo (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009). Nesse sentido, embora importante, a escolha do modelo ideal para um estudo hidrológico não é uma tarefa simples.

No intuito de auxiliar na escolha, Beckers, Smerdon e Wilson (2009) apresentam uma revisão aprofundada sobre modelos hidrológicos destinados ao manejo florestal e à simulação das influências das mudanças climáticas. Os modelos são classificados em função de cinco critérios principais, em que pode-se destacar: a funcionalidade, a complexidade e a aplicabilidade.

2.2.1 Classificação quanto a funcionalidade

A funcionalidade do modelo está relacionada com sua capacidade de simular os mais diversos cenários, produzindo resultados precisos. Essas características funcionais são influenciadas pela representação do processo do ciclo hidrológico implementado, pelas equações adotadas e pelo nível de discretização utilizado. Segundo Beckers, Smerdon e Wilson (2009), os principais processos representados são: transferência solo-vegetação-atmosfera, infiltração no solo, escoamento superficial e interceptação.

Com relação às equações, os modelos podem ser: empíricos, analíticos e físicos. Os modelos empíricos são baseados em equações simplificadas, normalmente obtidas de forma experimental utilizando, como por exemplo, equações de regressão. Como exemplos de equações empíricas, pode-se citar o método do número da curva, para o cálculo do escoamento, e o método de Hargreaves & Samani (HARGREAVES; SAMANI, 1982), para o cálculo da evapotranspiração. Os modelos físicos utilizam equações que procuram descrever os fenômenos de conservação de massa, momento e energia como, por exemplo,

o método Penman-Monteith, para o cálculo da evapotranspiração. Por fim, os modelos analíticos usam simplificações no intuito de derivar soluções para as equações físicas.

Quanto à discretização, considera-se dois aspectos. A discretização espacial está relacionada com a capacidade do modelo em dividir a bacia, o solo e a vegetação em unidades de tamanho o suficiente para capturar todas as suas variações e caminhos possíveis para o movimento da água sobre a superfície. Já a discretização temporal está relacionada com a capacidade do modelo em considerar intervalos de tempo suficientemente pequenos necessários.

2.2.2 Classificação quanto à complexidade

O conhecimento da complexidade é importante no sentido de permitir a escolha do modelo que simule todas as mudanças de cenários referentes ao uso do solo e ao clima, mesmo considerando fatores limitantes, como a disponibilidade de dados e os limites financeiros. As classificações foram definidas em função do volume de dados, dos recursos necessários, e do tempo necessário para parametrizar e calibrar o modelo. As classes definidas foram: baixa, média e alta complexidade. Os de baixa complexidade são considerados aqueles que necessitam de menos de 25 dados distintos de entrada e necessitam de apenas uma pessoa para, durante alguns dias ou poucas semanas, modelar uma bacia. Os modelos de média complexidade requerem entre 25 e 75 dados de entrada e necessitam de uma única pessoa e poucas semanas ou meses para modelar uma bacia. Já os de alta complexidade requerem mais de 75 dados de entrada e equipes de mais de uma pessoa para a modelagem.

2.2.3 Classificação quanto à aplicabilidade

A classificação quanto a aplicabilidade considera fatores como o regime hidrológico (úmido, seco, neve), quanto ao relevo (plano ou montanhoso), tamanho da bacia e a capacidade do modelo de simular processos particulares.

Os aspectos relativos à aplicabilidade de cada modelo podem ser obtidos a partir da documentação técnica do modelo na qual estão apresentadas em forma de orientações prévias sobre as características e possíveis condições necessárias para a sua utilização. Além da documentação técnica, artigos e publicações com resultados de aplicações dos modelos são boas fontes para o auxílio na verificação da aplicabilidade dos mesmos.

2.3 DHSVM - *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*

O modelo DHSVM é um modelo que procura representar os fenômenos do ciclo hidrológico com base em leis físicas e integrando a dinâmica entre os componentes do ciclo hidrológico, da vegetação e do solo (WIGMOSTA et al., 2002). O DHSVM é distribuído, sendo a área de estudo discretizada em uma matriz de *pixels* de tamanho fixo, descrito pelo

MDE. O modelo faz o balanço de energia e o balanço hídrico de cada *pixel* individualmente, sendo o excesso de água, superficial e sub-superficial, escoado para um *pixel* vizinho, seguindo a topografia do terreno ou a altura da coluna de umidade do solo, para o caso da água sub-superficial.

O modelo pode trabalhar em diferentes escalas temporais, como diária e sub-diária, sendo que para cada passo de tempo os balanços são calculados e então o excesso de água é transferido até atingir um curso d'água, seguindo a hierarquia dos cursos d'água, até atingir o exutório da bacia.

O escoamento em superfícies de estradas também é simulado. A água que atinge o leito de uma estrada é transferida até um ponto de saída onde, nesse caso, é acumulado em um *pixel* do terreno ou diretamente em um *pixel* que contenha um curso d'água.

A cobertura vegetal é tratada pelo modelo em dois níveis, dossel superior e de sub-bosque. Para cada *pixel*, são definidas informações relativas à cobertura vegetal, que podem ser ambas (floresta e sub-bosque), somente uma ou nenhuma cobertura. As informações relativas ao tipo de cobertura são utilizadas para a modelagem dos processos de interceptação e evapotranspiração, descritos nas Seções 2.3.3 e 2.3.4, respectivamente.

O solo pode ser modelado considerando qualquer quantidade de camadas. O mapa de solos fornece a definição das áreas de ocorrência de cada tipo de solo e, para cada *pixel* dessas áreas, são definidos os parâmetros de solo. Também, os parâmetros e equações que modelam os processos no solo serão tratados nas Seções 2.3.5, 2.3.6 e 2.3.7.

2.3.1 Parâmetros de entrada do modelo

Para a utilização do modelo DHSVM, são necessárias informações fluviométricas, pluviométricas, do solo, da vegetação, geometria dos cursos d'água e meteorológicas.

A Figura 1 apresenta as etapas necessários para realização da modelagem de uma bacia hidrográfica utilizando o DHSVM. Inicialmente, são necessárias imagens em formato *raster* referentes ao Modelo Digital de Elevação do terreno, aos limites da bacia (máscara), aos tipos de solo e aos tipos de uso da terra (vegetação).

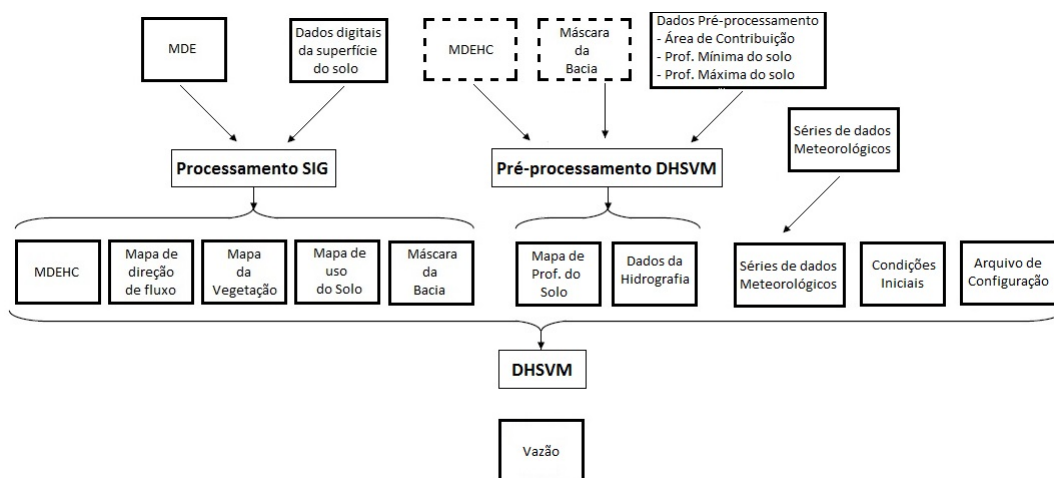
Por ser um modelo físico, o número de parâmetros de entrada é bastante elevado e, muitas vezes, não encontrado com facilidade na literatura. Os parâmetros do modelo são informados em um arquivo em formato texto, organizados em seções conforme Tabela 1.

Os principais parâmetros do modelo são os referentes às constantes, ao solo e à vegetação. Os nomes e as unidades das constantes utilizadas no modelo são apresentados na Tabela 2.

Na Tabela 3 são apresentados os nomes, as siglas definidas neste trabalho e as unidades para cada um dos parâmetros de solo. Esses parâmetros devem ser definidos para cada tipo de solo existente na área de estudo a ser modelada.

As informações referentes aos parâmetros da vegetação são apresentadas na Tabela 4. Da mesma forma, os parâmetros devem ser definidos para cada tipo de vegetação presente na área de estudo.

Figura 1 – Fluxograma das etapas para execução do modelo DHSVM.



Fonte: o autor

Tabela 1 – Seções do arquivo principal de configuração do modelo DHSVM

| Seção | Descrição |
|-------------|---|
| Options | Parâmetros gerais que permitem escolher os tipos de cálculos que serão utilizados em cada processo (quando existem mais de uma opção), tipos de arquivos e de dados de entrada e alguns parâmetros para os cálculos |
| Area | Parâmetros relativos ao sistema de coordenadas utilizado, à localização geográfica da área de estudo, o número de linhas e colunas da matriz de <i>pixels</i> e as dimensões dos <i>pixels</i> |
| Time | Parâmetros de tempo da simulação como a data de início, a data final e o passo de tempo da simulação |
| Constants | Valores de constantes utilizadas nas equações do modelo |
| Terrain | O caminho e o arquivo do modelo digital de elevação do terreno |
| Routing | Os nomes e localização dos arquivos com as informações referentes às redes de drenagem e de estradas, gerados no pré-processamento do modelo |
| Meteorology | Parâmetros referentes às informações meteorológicas utilizadas na simulação. Podem ser relativos a estações meteorológicas ou a mapas meteorológicos do projeto MM5 |
| Soils | Mapas de tipos de solo e de profundidade do solo. Parâmetros de solo para cada tipo de solo |
| Vegetation | Mapa de vegetação e parâmetros para cada tipo de vegetação |
| Outpup | Tipos de arquivos e mapas de saída que serão gerados |

Fonte: O autor

Os dados meteorológicos no modelo podem ser obtidos a partir de estações meteorológicas. A partir dos dados de entrada, os valores da temperatura do ar, da umidade relativa, do vento, da radiação de ondas curtas e da radiação de ondas longas, para cada *pixel*, são calculados de forma ponderada de acordo com os pesos interpolados de cada estação meteorológica. A pressão atmosférica é calculada por meio do ajuste da pressão do nível do mar em função da temperatura estimada para a altitude do *pixel*.

Os dados referentes à precipitação podem ser provenientes do modelo de simulação de

Tabela 2 – Constantes do modelo DHSVM

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|-----------|---|-----------------------------|
| R_a | Rugosidade aerodinâmica do solo descoberto | m |
| h_{ref} | Altura de referência para observações meteorológicas | m |
| LAIM | Multiplicador para o índice de área foliar para determinar a capacidade de interceptação da chuva | Adimens. |
| r_r | Taxa de decaimento da temperatura | $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ |
| p | Taxa de decaimento da precipitação | m/m |

Fonte: O autor

Tabela 3 – Parâmetros de Solo do modelo DHSVM

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|------------------|--|-------------------------------------|
| K_{ls} | Condutividade hidráulica lateral | m/s |
| EDR | Taxa de decaimento da cond. lateral | Adimens. |
| DTS | Limite de profundidade a partir da qual a transmissividade decai | |
| MIC | Taxa máxima de infiltração | m/s |
| CD | Pressão capilar da frente de umedecimento | |
| ALB _S | Albedo da superfície | m/s |
| NSL | Número de camadas do solo | |
| P | Porosidade de cada camada do solo (valor entre 0 e 1) | Adimens. |
| PSD | Índice de distribuição do tamanho dos poros (para cada camada) | Adimens. |
| h_b | Pressão de borbulhamento | m |
| F_c | Capacidade de campo com valor entre 0 e a porosidade (um valor para cada camada) | m^3/m^3 |
| w_p | Ponto de murcha com valor entre 0 e a porosidade (um valor para cada camada) | m^3/m^3 |
| BD | Densidade aparente (um valor para cada camada) | kg/m^3 |
| k_{vs} | Condutividade hidráulica vertical | m/s |
| T_{con} | Condutividade térmica do solo (um valor para cada camada) | $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ |
| T_{cap} | Capacidade térmica volumétrica do solo (um valor para cada camada) | $\text{J}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ |

Fonte: O autor

dados climáticos MM5 (*PSU/NCAR mesoscale model*), de estações de radar ou de estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Para o modelo MM5 e para a precipitação de radar, o valor considerado é o valor direto obtido dos mapas de precipitação. Para a precipitação de estações automáticas e convencionais, os dados da precipitação são ponderados de acordo com os pesos de cada estação informada. Os valores de precipitação de cada estação são ainda ajustados em função da taxa de variação que pode ser constante, baseada em um mapa de variação da precipitação, ou com base em um mapa de variação da

Tabela 4 – Parâmetros da vegetação do modelo DHSVM

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|-------------------|--|--------------------------------|
| FI | Fração impermeável para a vegetação | Adimens. |
| OVER | Floresta presente | TRUE/FALSE |
| UNDER | sub-bosque presente | TRUE/FALSE |
| FC _o | Fração de cobertura do solo pela floresta, valor entre 0 e 1 | Adimens. |
| TSpace | Distância do solo até o início da copa (0 a 1, fração da altura total) | Adimens. |
| COEFA | Coefficiente de atenuação aerodinâmica(valor entre 0 e 1) | Adimens. |
| COEFR | Coefficiente de atenuação da radiação (valor entre 0 e 1) | Adimens. |
| MSIC | Capacidade máxima de interceptação para a neve | mm |
| SIEff | Eficiência da interceptação para a neve | |
| MRRatio | Taxa de liberação da massa de neve na forma de gotejamento | |
| h _o | Altura da floresta | m |
| h _u | Altura do sub-bosque | m |
| LAI _o | Índice mensal de área foliar da floresta (12 valores) | m ² /m ² |
| LAI _u | Índice mensal de área foliar do sub-bosque (12 valores) | m ² /m ² |
| RMAX _o | Resistência máxima dos estômatos para floresta | s/m |
| RMAX _u | Resistência máxima dos estômatos para sub-bosque | s/m |
| RMIN _o | Resistência mínima dos estômatos para floresta | s/m |
| RMIN _u | Resistência mínima dos estômatos para sub-bosque | s/m |
| MT _o | Limiar de umidade do solo para floresta. Quando umidade acima do valor não ocorre restrição a transpiração | Adimens. |
| MT _u | Limiar de umidade do solo para sub-bosque. Quando umidade acima do valor não ocorre restrição a transpiração | Adimens. |
| VPD _o | Limiar para o déficit de pressão de vapor da floresta. Quando acima do valor os estômatos se fecham | Pa |
| VPD _u | Limiar para o déficit de pressão de vapor do sub-bosque. Quando acima do valor os estômatos se fecham | Pa |
| RPC _o | Fração da radiação de ondas curtas fotossinteticamente ativa para floresta | Adimens. |
| RPC _u | Fração da radiação de ondas curtas fotossinteticamente ativa para o sub-bosque | Adimens. |
| ALB _o | Albedo mensal para a floresta (12 valores) | Adimens. |
| ALB _u | Albedo mensal para o sub-bosque (12 valores) | Adimens. |
| RZD | Profundidade das zonas de raízes (um valor para cada zona) | m |
| RZF _o | Fração de raízes da floresta em cada zona de raízes (um valor para cada zona) | Adimens. |
| RZF _u | Fração de raízes do sub-bosque em cada zona de raízes (um valor para cada zona) | Adimens. |

Fonte: O autor

precipitação disponibilizado pelo projeto PRISM (*high-resolution spatial climate data for the United States*). Ao final do cálculo do total precipitado, o valor é dividido em precipitação em forma de chuva e neve, com base na temperatura do ar e nas constantes que definem a temperatura mínima que ainda pode ocorrer chuva e a temperatura máxima em que pode

ocorrer neve. Entre as duas temperaturas podem ocorrer simultaneamente chuva e neve, abaixo da temperatura mínima da chuva somente neve e acima da temperatura máxima da neve somente chuva.

Após o processamento dos dados das estações meteorológicas ainda são calculados: a temperatura de vaporização, a constante psicrométrica, a pressão de saturação de vapor, a taxa de variação da curva de pressão de vapor, a pressão de vapor atual, o deficit de pressão de vapor e a densidade do ar.

2.3.2 Balanço de radiação

Para o cálculo do balanço de radiação, inicialmente é calculada a transmissividade da radiação, a qual pode ser fixa ou variável (parâmetro da cobertura vegetal). O modo de cálculo fixo considera apenas o coeficiente de atenuação e o índice de área foliar. O modo variável considera a radiação de ondas curtas total, a direta, a difusa, o ângulo das folhas e o fator de aglutinação, parâmetros de entrada do modelo definidos para cada tipo de cobertura. Após o cálculo da atenuação, são realizados o balanço de ondas curtas e a determinação da temperatura da superfície, que pode ser a da neve, caso ocorra, a do solo, caso o parâmetro de fluxo de calor sensível esteja habilitado, ou a temperatura do ar, caso contrário. Por fim, é calculado o balanço de ondas longas.

2.3.2.1 Balanço de ondas curtas

O balanço de ondas curtas é realizado em separado para a cobertura vegetal superior (R_{so}), inferior (R_{su}) e a superfície do solo. A cobertura vegetal superior recebe a radiação de ondas curtas diretamente e propaga radiação de onda longa para o céu e para a cobertura vegetal, a neve ou o solo abaixo. A parte absorvida pela cobertura vegetal superior é calculada pela Equação 2.1,

$$R_{so} = R_s [(1 - \alpha_o) - \tau_o(1 - \alpha_u)] \quad (2.1)$$

em que, R_s é a radiação de ondas curtas incidente (W/m^2), α_o é o albedo da vegetação superior, τ_o é o índice de transmissividade da camada superior, α_u é o albedo da vegetação inferior e F é a fração de cobertura do solo pela vegetação superior.

A radiação de ondas curtas absorvida pela cobertura vegetal inferior é calculada pela Equação 2.2,

$$R_{su} = R_s (1 - \alpha_u) ([1 - F] + \tau_o F) \quad (2.2)$$

em que, F é a fração do solo coberta pela cobertura vegetal superior.

A radiação incidente no solo é considerada o restante não absorvido pelas coberturas vegetais superior e inferior.

2.3.2.2 Balanço de ondas longas

A radiação de ondas longas incidente na cobertura vegetal superior é calculada pela Equação 2.3,

$$R_{lo} = (L_d + L_u - 2L_o) F \quad (2.3)$$

em que, L_d , L_u e L_o (W/m^2) são os fluxos de radiação de ondas longas direta, da camada de vegetação inferior e da camada de vegetação superior.

A radiação de ondas longas incidente na cobertura vegetal inferior é calculada pela Equação 2.4,

$$R_{lu} = (1 - F) L_d + FL_o - L_u \quad (2.4)$$

em que, $L_o = \alpha(T_o + 273)^4$ e $L_u = \alpha(T_u + 273)^4$, α ($Wm^{-2}K^{-4}$) é a constante de Stefan-Boltzmann e T_o e T_u ($^{\circ}C$) são as temperaturas da vegetação superior e inferior respectivamente, determinadas no cálculo dos dados meteorológicos. Caso não exista cobertura vegetal superior, a radiação de ondas curtas incidente na cobertura vegetal inferior é somente a radiação direta L_d .

2.3.3 Interceptação da precipitação pela cobertura vegetal

O modelo DHSVM considera a precipitação sob a forma de chuva ou neve. A interceptação, quando da ocorrência de neve, é calculada com base no modelo proposto por (STORCK; LETTENMAIER; BOLTON, 2002; STORCK, 2000). O modelo estima o volume total de água e neve interceptados, bem como o volume que passa e atinge o solo ou a cobertura vegetal inferior. Quando não existe a presença de neve, depende do índice de área foliar da cobertura vegetal, que varia mensalmente, da fração do solo que a cobertura encobre e da constante multiplicadora de quantidade de água interceptada por índice de área foliar, Equação 2.5,

$$I_{cj} = (LAI_j \cdot F \cdot r_j) \quad (2.5)$$

em que, I_{cj} é a capacidade máxima de interceptação, LAI_j é o índice de área foliar da camada j de vegetação, F é a fração de solo coberta pela cobertura vegetal e r_j (m^2) é o volume de água interceptado por unidade de índice de área foliar. Em cada passo de tempo, o sistema calcula o volume que pode ser interceptado pela diferença do máximo interceptável menos o volume atual interceptado. Caso a precipitação seja menor do que a diferença, toda a precipitação é interceptada, caso contrário, a capacidade máxima de

interceptação é atingida e o restante da precipitação passa para a camada inferior ou o solo.

Esse é um modelo empírico, podendo ter grande variabilidade no volume máximo interceptado, em função do tipo de cobertura vegetal, de variações no índice de área foliar durante os anos, em função de variações climáticas e também de ações antrópicas relativas ao manejo das culturas. Por exemplo, nem sempre uma mesma cultura apresenta índice de área foliar sempre igual para regiões e épocas diferentes. Outro aspecto negativo é o valor constante do volume interceptado por índice de área foliar.

2.3.4 Evapotranspiração

O modelo DHSVM considera a evapotranspiração das duas camadas de vegetação e também a evaporação do solo quando não existe a presença da camada vegetal inferior nem neve. A evapotranspiração potencial é calculada para cada camada da vegetação pela Equação 2.6. Essa equação é uma adaptação baseada na equação de Penman-Monteith, proposta por Wigmosta, Vail e Lettenmaier (1994).

$$E_{po} = \frac{\Delta R_{no} + \rho C_p (e_s - e) / r_{ao}}{\lambda_v [\Delta + \gamma]} \quad (2.6)$$

em que, E_{po} (mm/passos de tempo) é a evapotranspiração potencial na camada i da vegetação, Δ é a taxa de variação da pressão de vapor saturado, R_{no} é a densidade de radiação incidente na camada de vegetação (W/m^2), ρ é a densidade do ar (kg/m^3), C_p é o calor específico do ar a pressão constante ($cal/(g \cdot ^\circ C)$), e_s é a pressão de saturação do vapor (mmHg), e é a pressão de vapor atual (mmHg), r_{ao} é a resistência aerodinâmica a transferência do vapor, λ_v é o calor latente de vaporização da água (cal/g) e γ é a constante psicrométrica ($kPa/^\circ C$). A evapotranspiração potencial é calculada inicialmente para a camada de vegetação superior e, para cada camada abaixo, o valor é diminuído da evapotranspiração das camadas superiores.

Para o cálculo da evapotranspiração na cobertura vegetal, o modelo considera separadamente as áreas molhada e seca. A separação é feita de acordo com a equação 2.7:

$$A_{wj} = \left(\frac{S_I^t + P_j}{I_{cj}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

em que, A_{wj} é a área molhada e $(1 - A_{wj})$ a área seca, S_I^t é altura da coluna d'água interceptada e armazenada no início do cálculo, P_j é a precipitação no período e I_{cj} é a capacidade máxima de interceptação, calculada utilizando a equação 2.5.

A transpiração da área molhada é calculada pela equação 2.8,

$$E_{Ij} = E_{pj} A_{wj} \Delta t_w \quad (2.8)$$

em que, E_{ij} é a quantidade de água interceptada que foi evaporada e Δt_w é o tempo necessário para evaporar o volume E_{ij} .

A transpiração potencial para a área molhada é calculada para cada camada de vegetação com base nas equações 2.9 e 2.10,

$$E_{tj} = E_{pj} \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma (1 + r_{cj}/r_{aj})} \quad (2.9)$$

$$E_{tj} = E_{tj} (1 - A_{wj}) \Delta t + E_{tj} A_{wt} (\Delta t - \Delta t_w) \quad (2.10)$$

em que, E_{tj} é a transpiração potencial, E_{pj} é evapotranspiração potencial, r_{aj} é a resistência do dossel da cobertura vegetal ao transporte de vapor d'água e Δt é o passo de tempo do modelo. A Equação 2.10 representa o volume potencial durante todo o intervalo de tempo Δt na área seca da cobertura vegetal, mais o volume potencial da área molhada que se torna seca e ainda pode transpirar durante o intervalo de tempo $\Delta t - \Delta t_w$.

Para cada nível do solo, o modelo ajusta a transpiração potencial, equação 2.8, em função da fração de raízes da cobertura vegetal e calcula a transpiração máxima da camada de solo no passo de tempo, equação 2.9. Em seguida, o modelo determina o volume de água disponível no nível do solo e, caso seja menor do que o potencial, considera o volume disponível como o total transpirado no nível. Caso o volume disponível seja maior, o volume transpirado no nível é o volume potencial.

Quando não existe cobertura vegetal inferior e a ocorrência de neve, a evaporação potencial do solo é calculada pela equação 2.11, em função da evapotranspiração potencial ao nível do solo (E_{ps}), que é a evapotranspiração potencial, equação 2.6, menos a evapotranspiração da camada vegetal superior, e da taxa de dessorção (F_e) da água armazenada na camada superficial do solo, calculada pela equação 2.12,

$$E_s = \min(E_{ps}, F_e) \quad (2.11)$$

$$F_e = S_e \Delta t^{1/2} \quad (2.12)$$

em que, S_e é calculado usando o método apresentado por Entekhabi D. Eagleson (1989) e Δt é o passo de tempo da modelagem. Caso a umidade do solo seja inferior a evaporação potencial do solo (E_s), toda a umidade da camada superior do solo é evaporada e a umidade da camada zerada. Caso seja superior, somente o volume estimado para a evaporação potencial é evaporado e a umidade do solo é ajustada.

A modelagem da evapotranspiração é bastante completa e praticamente baseada apenas em princípios físicos. Somente com relação à evaporação da superfície molhada, como o cálculo da interceptação ainda é empírico, novos métodos de estimativa da interceptação podem ser incorporados ao modelo. Um outro ponto interessante a ser considerado é o de

uma nova revisão na literatura em busca de métodos mais modernos e atualizados para a estimativa do processo da evapotranspiração efetiva.

2.3.5 Infiltração

A infiltração no modelo DHSVM é calculada com base em uma taxa máxima de infiltração que pode ocorrer de acordo com o estado atual da camada superior do solo, e da disponibilidade de água em sua superfície permeável. Caso o volume de água disponível seja menor do que a capacidade máxima de infiltração, toda a água disponível na área permeável é infiltrada, caso contrário algum excesso de água na área permeável irá ocorrer. O excesso de água na área permeável, caso ocorra, mais a água disponível na área impermeável do *pixel*, tornam-se disponíveis para o escoamento superficial, apresentado na Seção 2.3.9.

O modelo considera que a água disponível na superfície de um *pixel* é proveniente da chuva e/ou da neve que caem diretamente sobre o solo, fora de estradas e/ou cursos d'água, mais a água escoada de *pixels* vizinhos. A água que cai sobre estradas é escoada até que atinja um bueiro e então é acumulada em um *pixel* fora da estrada, ou atinja um *pixel* que contenha um curso d'água. A água que cai sobre estradas ou cursos d'água são escoadas segundo modelo específico discutido na Seção 2.3.8.

Para a precipitação que cai sobre a superfície de estradas, o modelo calcula a capacidade máxima de infiltração e o volume de precipitação na área da estrada. Todo o volume precipitado é infiltrado caso seja menor que a capacidade máxima de infiltração. Caso seja maior, parte é infiltrada e parte fica disponível para escoamento ao longo da rede de estrada até atingir um bueiro ou um curso d'água.

Para estimar a taxa máxima de infiltração em áreas fora de estradas e cursos d'água, existem dois modelos: o estático e o dinâmico. O modelo estático simplesmente considera o valor do parâmetro da taxa máxima de infiltração no solo, ajustado para a área permeável e para a área do *pixel* sem estrada ou curso d'água e o passo de tempo da modelagem.

O modelo dinâmico considera a capacidade de infiltração variável. No início da precipitação e antes do acúmulo de água na superfície do solo, a taxa de infiltração é limitada e igual à taxa de precipitação. A partir do momento em que a água fica em excesso na superfície do solo, a taxa de infiltração é calculada de acordo com a Equação 2.13:

$$f(t) = K_s \left[\frac{e^{F(t)/[(G+h)(\theta_s-\theta_i)]}}{(e^{F(t)/[(G+h)(\theta_s-\theta_i)]} - 1)} \right] \quad (2.13)$$

em que, K_s (m/s) é a condutividade vertical do solo saturado, $F(t)$ (mm) é a infiltração acumulada desde o início da precipitação, θ_s é porosidade do solo, θ_i é a umidade do solo antes do início da precipitação, G é o potencial matricial na frente de umedecimento.

A capacidade máxima de infiltração para o modelo dinâmico é calculada pelo ajuste da taxa variável de infiltração $f(t)$ em função da área permeável, sem considerar as estradas e

os cursos d'água, e do passo de tempo da modelagem.

2.3.6 Movimentação vertical da água no solo não saturado

A água que infiltra na camada superior do solo é percolada, passando por todas as camadas intermediárias até atingir a camada mais profunda do solo. Em cada camada, a taxa de movimento descendente é calculada pela equação 2.14:

$$q_v(\theta) = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\hat{\theta} - \theta_r} \right]^{(2/m)+3} \quad (2.14)$$

em que, K_s é a condutividade hidráulica saturada vertical (m/s), m é o índice de distribuição da porosidade do solo, φ é a porosidade do solo e θ_r é a umidade do solo. O volume percolado para o nível abaixo é calculado pela equação 2.15:

$$Q_{vk} = \frac{1}{2} [q_v(\theta_k^t) + q_v(\hat{\theta})] \Delta t \quad (2.15)$$

em que, $\hat{\theta}$ é a umidade do solo acrescida do volume percolado da camada acima da camada k . Após o cálculo do volume percolado em cada camada, a profundidade da coluna d'água é calculada por meio da equação 2.16:

$$z = D \left[1 - \sum_1^{ns} (\theta_k^{t+\Delta t} - \theta_{fck}) d_k / \sum_1^{ns} (\hat{\theta}_k - \theta_{fck}) d_k \right] \quad (2.16)$$

em que, D (m) é a espessura total do solo, d_k (m) é a espessura da camada k , ns é o número de camadas do solo. Caso a profundidade da coluna d'água seja negativa, o volume excedente (acima da superfície) é considerado disponível para o escoamento superficial e a profundidade da coluna d'água é zerada.

2.3.7 Escoamento sub-superficial

A cada passo de tempo da simulação, o escoamento sub-superficial no modelo DHSVM considera que o volume de água da região saturada em cada *pixel* pode escoar para os *pixels* vizinhos que encontram-se dentro da bacia, para *pixels* vizinhos, para uma estrada, caso o *pixel* tenha um trecho de estrada, ou para um trecho de curso d'água, caso exista no *pixel*.

Para o escoamento em *pixels* onde não exista estrada ou curso d'água, a direção de escoamento e o gradiente de escoamento podem ser calculados com base na altitude do *pixel* ou na altura da coluna saturada do solo, sendo que em ambos, a altitude do terreno ou da coluna saturada são consideradas no centro do *pixel*. A direção e o gradiente de escoamento são calculados em função da altitude ou da altura da coluna saturada do *pixel* em relação às altitudes ou alturas das colunas saturadas dos *pixels* vizinhos. Assim, para cada *pixel* vizinho, um gradiente diferente é calculado, o que leva a um volume de escoamento diferenciado para cada *pixel* vizinho. Embora Wigmosta et al. (2002) cite

que o escoamento sub-superficial possa ocorrer em oito direções, o código implementado considera apenas quatro direções possíveis para o escoamento sub-superficial.

Segundo Wigmosta et al. (2002), a taxa de escoamento lateral para cada *pixel* vizinho é calculada segundo a Equação 2.17:

$$q_{S_{i,j,k}} = w_{i,j,k} \beta_{i,j,k} T_{i,j}(z, D) \quad (2.17)$$

em que, $w_{i,j,k}$ é o volume escoado na direção k , $\beta_{i,j,k}$ é a inclinação do escoamento (pela topografia ou pela altura das colunas saturadas) e $T_{i,j}(z, D)$ é a transmissividade calculada por meio da Equação 2.18:

$$T_{i,j}(z, D) = \frac{K_{i,j}}{f_{i,j}} \left(e^{-f_{i,j} z_{i,j}} - e^{-f_{i,j} D_{i,j}} \right) \quad (2.18)$$

em que, $K_{i,j}$ (m/s) é a condutividade hidráulica lateral na superfície do solo, $f_{i,j}$ é a taxa de decaimento da condutividade e $D_{i,j}$ (m) é a espessura do solo para o *pixel* i,j . Entretanto, o código implementado considera outras duas formas de cálculo da transmissividade. Se a taxa de decaimento da condutividade for igual a zero, a transmissividade é calculada por meio da Equação 2.19:

$$T_{i,j} = K_{i,j} (D_{i,j} - z_{i,j}) \quad (2.19)$$

A terceira forma de cálculo da transmissividade considera um limite de profundidade para o decaimento exponencial, calculado por meio da Equação 2.19. Abaixo deste limite, o decaimento passa a ser linear até atingir o valor zero.

O volume de água escoado para cada *pixel* vizinho é calculado segundo a Equação 2.20, sendo o volume total escoado do *pixel* igual à soma dos k componentes da equação

$$V_{i,j,k} = q_{S_{i,j,k}} \Delta t \quad (2.20)$$

O escoamento em *pixels* que possuem estrada considera que parte da água acumulada no solo pode escoar para a superfície da estrada. Wigmosta et al. (2002) apresenta a Equação 2.21 para o cálculo do escoamento para a superfície de estradas:

$$Q_{R_{i,j}} = w_{R_{i,j}} \beta_{i,j} T_{i,j}(z, z_R) \quad (2.21)$$

em que, $w_{R_{i,j}}$ é o comprimento do segmento de estrada no *pixel*, $\beta_{i,j}$ é a inclinação do *pixel* e $T_{i,j}(z, z_r)$ é a transmissividade do solo da porção acima do nível da estrada.

Em *pixels* referentes a trechos de cursos d'água, todo o escoamento sub-superficial, para camadas acima do nível do leito, flui para o curso d'água. O volume escoado é calculado por meio da Equação 2.22,

$$Q_{C_{i,j}} = 2L_{C_{i,j}} \beta_{C_{i,j}} T_{i,j}(z, z_c) \quad (2.22)$$

$$\beta_{C_{i,j}} = \frac{z_{C_{i,j}} - z_{i,j}}{0,5w_{C_{i,j}}} \quad (2.23)$$

em que z_c (m) é a altura do fundo do curso d'água, L_c (m) é o comprimento do canal atravessando o *pixel*, $T_{i,j}(z,z_c)$ é a transmissividade da zona saturada acima do nível do fundo do curso d'água e 2.23, e $w_{C_{i,j}}$ (m) é a largura do curso d'água.

É importante salientar que o modelo de escoamento sub-superficial adotado considera que todo o volume calculado é escoado para os *pixels* vizinhos durante um passo de tempo da simulação. Essa abordagem torna o modelo dependente de uma boa calibração do tamanho do *pixel* pois, dependendo do tamanho, o tempo de escoamento sub-superficial até um curso d'água pode não ser o mais correto. Por exemplo, em regiões íngremes, se o *pixel* tiver um tamanho pequeno e o passo de tempo da simulação for relativamente alto, a velocidade de escoamento sub-superficial é subestimada.

2.3.8 Deflúvio

Os cursos d'água e estradas são modelados como uma sequência de reservatórios lineares (trechos lineares), cada um com suas próprias propriedades hidráulicas. Os segmentos recebem fluxo lateral proveniente dos *pixels* por onde passam, tanto por escoamento sub-subterrâneo quanto por escoamento superficial, e retêm parte desse fluxo e escoam parte para o segmento seguinte. O volume retido por um segmento é calculado com base na Equação 2.24:

$$V_C^{t+1} = \frac{Q_{in}}{k} + \left(V_C^t - \frac{Q_{in}}{k} \right) \exp(-k\Delta t) \quad (2.24)$$

em que, Q_{in} é a taxa média de fluxo lateral proveniente do segmento anterior que chega ao segmento durante o passo de tempo atual e, k , é o parâmetro de retenção, calculado por meio da Equação 2.25,

$$k = \frac{R_r^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_o}}{n\Delta L} \quad (2.25)$$

em que, R_r (m) é o raio hidráulico, S_o , ΔL e n são a inclinação do canal, o comprimento do canal e a rugosidade hidráulica do canal, respectivamente. O volume a ser escoado para o segmento seguinte é calculado usando a equação 2.26, que é propagado para o segmento seguinte ou é considerado como escoado para fora da bacia quando o segmento contém o exutório da bacia em sua extremidade ou a saída de uma estrada. O volume escoado em estradas pode retornar para um *pixel* da bacia quando da presença de um bueiro onde, nesse caso, é adicionada ao volume de água na superfície do *pixel* onde se encontra o bueiro. A cada passo de tempo, os segmentos de cursos d'água e estradas são processados

a partir dos de mais baixa ordem (ordem própria determinada pelo modelo) até atingir os de mais alta ordem que são os segmentos exutórios da bacia.

$$Q_{out} = Q_{\epsilon} - \frac{(V_C^{t+1} - V_C^t)}{\Delta t} \quad (2.26)$$

2.3.9 Escoamento superficial

Segundo Wigmosta et al. (2002), existem dois modelos para o escoamento superficial. Um que considera o escoamento do volume de água sobre o solo *pixel a pixel*, ou seja, o volume de água disponível é escoado para os *pixels* vizinhos a cada passo de tempo. O segundo é baseado na abordagem por hidrógrafa unitária. Obrigatoriamente, quando a modelagem considera a presença de estradas e/ou cursos d'água, o método utilizado deve ser o escoamento *pixel a pixel*.

O método *pixel a pixel* apresentado por Wigmosta et al. (2002) é similar ao método utilizado para o escoamento sub-superficial, no qual o escoamento, a partir de um *pixel*, pode ocorrer em quatro direções, calculado por meio da Equação 2.27,

$$q_{O_{i,j,k}} = w_{i,j,k} v_{i,j} y_{i,j} \quad (2.27)$$

em que, $v_{i,j}$ é a velocidade de fluxo no *pixel* (m/s), $y_{i,j}$ (m) é a distância do fluxo no *pixel* e $w_{i,j,k}$ é o volume escoado na direção k (mm). Até o momento o modelo considera a velocidade de fluxo constante e igual a $\Delta x/\Delta t$ onde x é a largura do *pixel*. Isto significa que o volume de água escoado no passo de tempo é igual ao volume de água disponível na superfície do solo (*pixel*). Esse volume disponível é igual a soma de todos os k componentes calculados na Equação 2.27 e pode ser expresso também pela na Equação 2.28,

$$S_{O_{i,j}}^{t+\Delta t} = S_{O_{i,j}}^t + V_{exl_{i,j}} + I_{ex_{i,j}} + (Q_{O_{\epsilon_{i,j}}} + Q_{cvt_{i,j}} - Q_{O_{i,j}}) \Delta t \quad (2.28)$$

em que, $Q_{O_{\epsilon_{i,j}}}$ é o total escoado superficialmente para o *pixel* i,j a partir dos *pixels* de gradiente mais elevado, $I_{mitex_{i,j}}$ é o excesso de infiltração que aflora do solo e $Q_{cvt_{i,j}}$ é o fluxo proveniente de bueiros.

Ainda, segundo Wigmosta et al. (2002), no método da hidrógrafa unitária, o tempo estimado para que o escoamento superficial gerado em um *pixel* chegue ao exutório da bacia é calculado para cada *pixel* individualmente.

2.4 Calibração de modelos hidrológicos

Na modelagem hidrológica baseada em modelos conceituais, uma das etapas importantes do processo é a calibração dos parâmetros do modelo. Por mais que se investigue e busque na literatura, nem sempre se consegue parâmetros que, após a modelagem inicial, levem os resultados das vazões a valores satisfatórios. Matematicamente, a calibração é um

problema de infinitas soluções em que existem mais equações do que incógnitas, o que torna o problema de difícil solução. O processo de calibração dos parâmetros pode ser realizado de forma manual ou de forma automática (MORADKHANI; SOROOSHIAN, 2009).

A calibração manual foi a primeira forma de calibração de modelos hidrológicos. Por meio de tentativa e erro, os profissionais envolvidos fazem a modelagem inúmeras vezes e, com base nos resultados obtidos, promovem ajustes nos valores dos parâmetros. Esse processo, além de trabalhoso, depende sobremaneira da experiência do profissional com o comportamento do modelo, com os valores e limites comuns dos parâmetros do modelo e com as características da área de estudo. Ao final de cada execução do modelo, o profissional analisa os dados comparando-os com os valores observados por meio de gráficos ou com a utilização de algumas funções objetivo, como por exemplo: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado (NS') (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e o percentual de viés do valor estimado (PBIAS).

Como alternativa à técnica manual, foram desenvolvidas técnicas de calibração automática, baseadas em métodos de otimização. Os primeiros métodos utilizados eram baseados em técnicas iterativas como o método univariacional, rotação das coordenadas (ROSENBROCK, 1960), do gradiente mínimo, entre outros. O principal problema da utilização de métodos de otimização para o processo de calibração de modelos hidrológicos está relacionado às características e à complexidade dos modelos em que, em função da existência de múltiplas soluções viáveis, nem sempre se consegue chegar em um resultado satisfatório. A própria incerteza quanto ao valor dos parâmetros e ao modelo dificultam o processo, o que pode levar a um resultado da calibração que seja um absurdo do ponto de vista físico.

O espaço de soluções das funções objetivo, normalmente utilizadas para a calibração, são não lineares e descontínuos. Com isso, a utilização de métodos de mínimos locais tende a ser pouco confiável, pois o método pode chegar a resultados semelhantes para conjuntos diferentes de parâmetros iniciais. Recentemente, importantes desenvolvimentos têm sido atingidos com a utilização de funções multi-objetivo e heurísticas de otimização de busca global (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1998).

No decorrer do tempo, diversas técnicas e algoritmos de otimização têm sido empregados para a solução dos problemas de calibração de modelos hidrológicos. Como exemplo, a utilização do método simplex (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995), a utilização de heurísticas, como algoritmos genéticos (LIONG; CHAN; SHREERAM, 1995) e *simulated annealing* (THYER; KUCZERA; BATES, 1999). A seguir são apresentados de forma detalhada algumas técnicas utilizadas na calibração de modelos hidrológicos.

2.4.1 *Shuffled complex evolution* (SCE-UA)

O método *Shuffled Complex Evolution* (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992) é um dos mais utilizados para a calibração automática de modelos hidrológicos. O algoritmo SCE-UA utiliza três métodos de otimização combinados: um método de busca global (ASR), um método de busca local (simplex) e a técnica de múltiplas execuções de busca local.

Duan, Sorooshian e Gupta (1992) apresentam um estudo da complexidade do problema de otimização de parâmetros de modelos hidrológicos utilizando duas metodologias computacionais para gerar a visualização do espaço de soluções válidas para os parâmetros do modelo estudado (modelo SIXPAR). As metodologias utilizadas foram: amostragem randômica uniforme e geração exaustiva de soluções do espaço de parâmetros. No estudo, são apresentados resultados que mostram claramente a complexidade do problema e a inviabilidade do uso de métodos exatos como o método simplex, o método de Rosembrocks, o método de Newton-Raphson, entre outros. O estudo conclui ainda que os algoritmos de otimização de parâmetros de modelos devem ser globais, devem ser capazes de fugir das “armadilhas” dos mínimos locais e não devem ter a necessidade de que a função objetivo seja explícita em termos dos parâmetros. Também, devem ser capazes de tratar da inter-relação entre os parâmetros. Essas características indicam que a utilização de métodos não determinísticos devem ser priorizadas.

No estudo, três técnicas de otimização global são testadas para o problema de calibração, o de busca randômica adaptativa (ASR), o de busca randômica adaptativa combinado com o método simplex (ASR/Simplex) e a combinação dos dois com a múltipla inicialização do método simplex. O método de busca randômica adaptativa é um método primitivo de otimização probabilística que utiliza estratégias para guiar a busca randômica adaptativa na direção da região de um ótimo global. Para o método combinado ASR/Simplex, o estudo apresenta três combinações que variaram o número de execuções do método ASR e o número de avaliações da função objetivo. Em cada estudo, após a 1.000.^a, 2.000.^a e 3.000.^a avaliação, respectivamente, da função objetivo, uma busca local, com solução inicial igual a solução obtida pelo método ASR, é realizada utilizando o método simplex. O terceiro método estudado é uma variação do ASR/Simplex em que, ao invés de se executar o Simplex apenas para a solução final obtida no método ASR, um conjunto de soluções geradas pelo método ASR é escolhido e, para cada solução, o método Simplex é executado (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992).

O algoritmo SCE-UA utiliza a combinação do algoritmo ASR e a múltipla chamada do método Simplex para resolver o problema da calibração de parâmetros de modelos hidrológicos. Duan, Sorooshian e Gupta (1992) apresenta um estudo de caso onde o algoritmo foi aplicado sobre um conjunto de dados sintéticos de vazão estimada e observada. O resultado da aplicação do modelo é comparado com o resultado dos modelos ASR, ASR/Simplex e o método MSX de múltiplas execuções do método simplex, mostrando

que o SCE-UA possui melhor desempenho do que os outros algoritmos.

2.4.2 Algoritmos genéticos (AG)

Liong, Chan e ShreeRam (1995) apresentam um estudo da aplicação da meta-heurística Algoritmos Genéticos (AG) na calibração dos parâmetros do modelo *Storm Water Management Model* (SWMM). O SWMM é um modelo voltado para o estudo de vazões de pico para bacias hidrográficas.

O algoritmo genético implementado representa cada um dos parâmetros do modelo como um gene com comprimento de 10 bits. Essa representação garante uma resolução de 1024 pontos para cobrir o intervalo de valores de cada parâmetro. A função objetivo considerada é a da soma dos quadrados dos erros entre os valores observados e estimados, sendo o objetivo do algoritmo minimizar tal função.

A metodologia foi testada na calibração dos parâmetros de uma bacia hidrográfica de 6,11 km² em Singapura. A bacia possui 35% de sua área ocupada por regiões agrícolas e urbanas e uma área de floresta com solo permeável e com 6% a 10% da área constituída de encostas íngremes. Seis eventos de chuva forte foram selecionados, sendo utilizados três para calibração e três para validação.

O resultado do estudo mostra que, para o estudo de caso realizado, o erro na previsão das vazões máximas simuladas variou entre 0,045% e 7,265%. Os valores mostram que é viável a utilização de AG ao problema de calibração de parâmetros de modelos hidrológicos.

2.4.3 Simulated annealing (SA)

Sumner, Fleming e Bates (1997) propõem um algoritmo baseado na meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para calibrar o modelo SFB modificado. O método proposto, SA-SX, combina o *Simulated Annealing* com o método Simplex de Nelder e Mead (1965).

Originalmente, o algoritmo é um método de busca em profundidade que, com as alterações propostas, aceita algum movimento de piora no caminho da busca mantendo ainda o viés de busca em profundidade. Durante a busca em profundidade pelo método Simplex, uma função de penalidade é avaliada e, caso satisfeita, retorna um valor para o *Simulated Annealing*. A cada penalidade, o valor retornado é reduzido, diminuindo o esforço de busca pelo SA fora do espaço de busca do Simplex. Quando o valor retornado é igual a zero, nenhum movimento de piora é computado, e o método converge para um mínimo local. O estudo apresenta ainda os resultados da calibração da vazão de vinte e cinco estações fluviométricas.

3 Influência da profundidade do solo e da resolução espacial na eficiência do modelo DHSVM

3.1 Resumo

O modelo DHSVM vem sendo aplicado em diversas regiões e com diversos objetivos como, por exemplo, para simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, no estudo do impacto das mudanças climáticas e do uso e ocupação do solo no volume de água disponível. A eficiência da modelagem requer a utilização de dados consistentes acerca da topografia, tipos de solo, tipos de vegetação e meteorológicos. O modelo utiliza um conjunto de mapas no formato *raster* que, a princípio, quanto mais detalhados e de melhor resolução espacial, melhor. Neste trabalho são apresentados estudos da influência do tamanho do *pixel* (45, 100, 150 e 200 m) e da profundidade máxima do solo (5, 20, 120 e 160 m) do solo na eficiência do modelo DHSVM. O estudo foi elaborado considerando a sub-bacia hidrográfica do Rio Pardo, na bacia do rio Itapemirim, estado do Espírito Santo, Brasil, com área de 432 km². A modelagem considerou dados com resolução temporal diária, compreendendo o período de 01/01/2007 a 31/12/2011. Os resultados mostram que tanto o tamanho do *pixel* quanto a profundidade do solo têm grande influência na eficiência do modelo DHSVM sendo, portanto, importante o ajuste prévio da resolução inicial dos mesmos.

3.2 Introdução

A modelagem do comportamento das vazões em cursos d'água é de extrema importância para fins como a previsão de eventos extremos como secas e enchentes, o estudo dos impactos das mudanças climáticas no volume dos rios, o dimensionamento e manejo de estruturas hidráulicas e a gestão de recursos hídricos. Essa abordagem vem ganhando espaço no meio técnico-científico, uma vez que, a cada dia, tanto os modelos quanto a capacidade computacional apresentam grandes avanços (MORAES et al., 2003).

Em estudos relativos à simulação da vazão de cursos d'água por meio da modelagem hidrológica, normalmente parte-se de um conjunto de parâmetros de entrada do modelo,

obtidos de fontes em literatura ou de medidas de campo. Como nem sempre há disponibilidade de dados confiáveis sobre esses parâmetros no Brasil, e principalmente no estado do Espírito Santo, é comum os resultados iniciais da modelagem não apresentarem boas estimativas, quando comparadas com as vazões observadas. Portanto, torna-se necessária a calibração dos parâmetros de entrada do modelo, experimentando valores e combinações variadas dos parâmetros de entrada, no intuito de se obter um melhor ajuste da vazão estimada. Normalmente, esse processo de calibração é realizado por meio da execução da modelagem para cada novo conjunto de parâmetros, o que frequentemente demanda uma grande quantidade de tempo.

Existem diversos modelos hidrológicos, dentre os quais, o *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) (WIGMOSTA et al., 2002) se destaca por ser um modelo físico no qual os processos do ciclo hidrológico são representados por equações detalhadas. Além disso, por ser distribuído, o modelo trabalha com resolução espacial específica, definida pelo usuário no Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno. Por essas características, o modelo realiza todos os cálculos do balanço hídrico por passo de tempo e para cada *pixel* do MDE, o que demanda um grande esforço computacional.

Segundo Wigmosta et al. (2002), o modelo disponibiliza duas alternativas para a modelagem do escoamento superficial, denominadas método dinâmico e método estático. O método dinâmico baseia-se na determinação do hidrograma unitário para estimar a vazão. No método estático, o balanço hídrico é calculado para cada *pixel* separadamente, considerando, entre outros parâmetros, a taxa máxima de infiltração definida para cada tipo de solo. O volume precipitado menos o volume interceptado, que excede a taxa máxima de infiltração, é considerado excedente e, portanto, disponível para escoamento para um *pixel* vizinho, até que chegue a algum curso d'água. A velocidade de escoamento é definida como $\Delta x / \Delta t$, sendo Δx o tamanho do *pixel* e Δt a resolução temporal, o que torna a velocidade de escoamento dependente das resoluções espacial e temporal utilizadas na modelagem.

O modelo de fluxo horizontal da região saturada do solo é praticamente igual ao modelo de escoamento superficial, ou seja, a velocidade de escoamento é estimada por $\Delta x / \Delta t$. Neste caso, a partir do volume saturado em cada camada do solo, são calculados os volumes escoados para cada *pixel* vizinho que depende, ainda, da declividade entre o *pixel* de origem e o *pixel* de destino. A profundidade do solo e, conseqüentemente, de suas camadas, determina a capacidade do solo em armazenar o volume infiltrado. Quanto mais profundo, maior a capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, maior o volume de água disponível para escoamento sub-superficial (WIGMOSTA et al., 2002).

Em trabalhos de modelagem utilizando o modelo DHSVM, como os apresentados por Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011) e Du et al. (2014), normalmente são utilizadas resoluções temporais horárias e resoluções espaciais com tamanho de *pixel* inferior a 100 metros. Para resoluções temporais superiores a uma hora, como nos trabalhos realizados por

Thanapakpawin et al. (2007) e Ottenbreit (2011), normalmente são utilizadas resoluções espaciais com *pixel* de tamanho superior a 100 metros.

Com relação à profundidade do solo, Thanapakpawin et al. (2007), Alvarenga (2015) e Cuo et al. (2006) mencionam que esta foi ajustada durante a etapa de calibração dos parâmetros do modelo. No entanto, não são apresentados resultados que mostrem a efetiva influência da profundidade do solo na eficiência do modelo.

Conforme pode ser visto, a maioria dos trabalhos que envolvem a utilização do modelo DHSVM citam apenas a resolução final utilizada, bem como não mencionam, ou apenas informam que a profundidade do solo foi ajustada. Em sua maioria não são apresentados de forma clara resultados que mostrem a influência desses parâmetros na eficiência do modelo DHSVM. Assim, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da profundidade do solo e da resolução espacial na eficiência do modelo DHSVM.

3.3 Material e métodos

Estudos de vazão de cursos d'água por meio da modelagem hidrológica normalmente são realizados com a escolha de uma área de estudo que possua um conjunto de dados referentes às vazões e aos parâmetros do modelo suficientemente conhecidos. Além da existência de informações necessárias ao processo de modelagem, é importante também que se conheça bem as características da bacia, de forma que os parâmetros do modelo possam ser analisados e ajustados de forma consistente. Nesta seção, são apresentados a bacia escolhida, os dados e parâmetros necessários para a modelagem, bem como toda a metodologia utilizada no trabalho.

3.3.1 Descrição da área em estudo

A área em estudo escolhida foi a bacia do Rio Pardo, visualizada na Figura 2, na qual encontra-se no município de Iúna uma estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas. Está localizada na região Sudeste do Brasil, situada quase em sua totalidade no estado do Espírito Santo, sendo uma das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do Rio Itapemirim. Possui área de drenagem de aproximadamente 432 km² e altitude que varia de 420 a 1575 m, caracterizando, portanto, uma região montanhosa e adequada para utilização do modelo DHSVM (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; SURFLEET; SKAUGSET; MCDONNELL, 2010). A região possui clima "Aw", de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013), temperatura média anual em torno de 23 °C, estação chuvosa com precipitação média anual em torno de 1200 mm, concentrada no verão, e uma estação seca no inverno.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2014), os tipos de solo predominantes na bacia são o Latossolo e o Cambissolo, conforme Figura 3a. O uso e ocupação do solo na bacia, conforme Figura 3b, está distribuído entre

Figura 2 – Localização geográfica da área de estudo, sub-bacia do rio Pardo, contida na bacia do rio Itapemirim(ES).

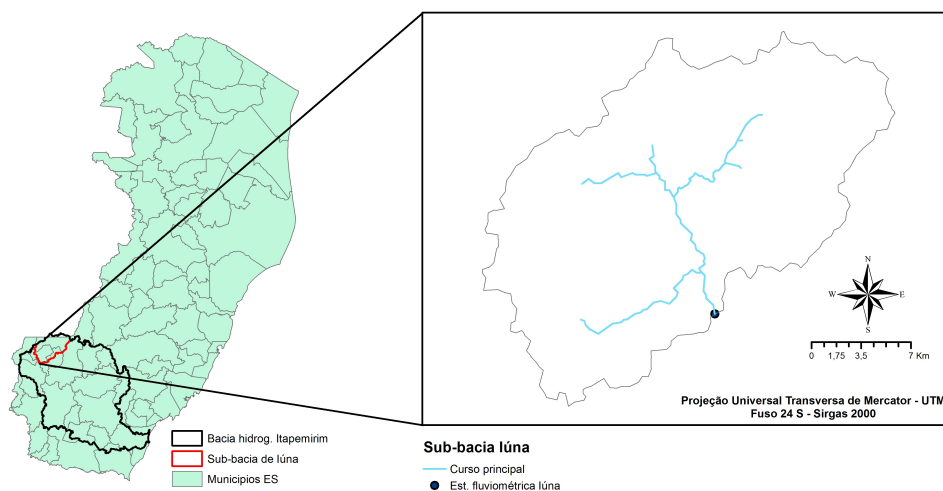
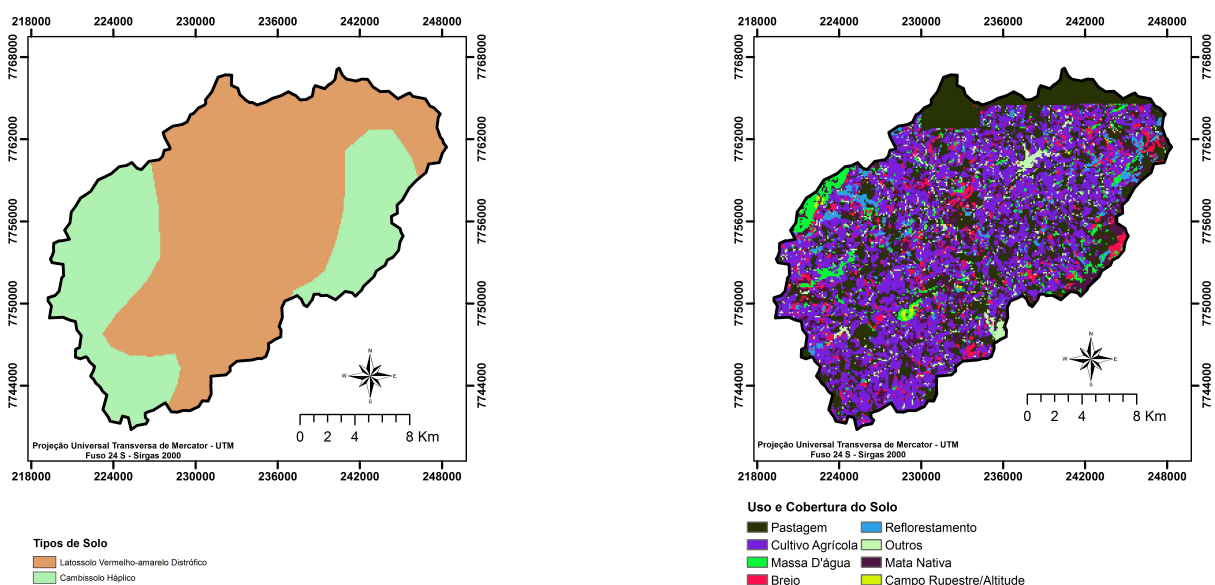


Figura 3 – Mapas de classes de solo e de uso da terra referentes à bacia do rio Pardo



(a) Classes de Solo

(b) Classes de Uso e Ocupação do Solo

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2014).

cultivos agrícolas, com predominância da cultura do café, pastagens, mata nativa, áreas de reflorestamento, massa d’água, brejos, campos rupestres/altitude e áreas edificadas.

3.3.2 Descrição do modelo

O DHSVM é um modelo físico, distribuído, que simula o balanço de energia e o balanço hídrico para cada *pixel*, de acordo com a resolução espacial do MDE e a resolução temporal dos dados hidroclimatológicos.

Para cada passo de tempo, definido de acordo com os dados climatológicos, o modelo calcula o balanço de massa e energia para cada *pixel* da bacia. Após o cálculo do balanço de energia, o modelo determina o volume interceptado pelo dossel superior, e a evapotranspiração para cada camada de cobertura vegetal, baseada na equação de Penman-Monteith. A partir do volume que atinge a superfície do solo, precipitado menos interceptado e evaporado, o modelo determina o volume máximo que pode infiltrar no solo.

O solo é modelado em camadas que são consideradas como compartimentos, para os quais é simulada a movimentação vertical e horizontal da água no solo. Para cada camada, exceto a primeira, é estimado o volume infiltrado, o qual torna-se disponível como entrada da camada imediatamente inferior. Além da movimentação vertical, parte da água em cada camada pode escoar lateralmente para os *pixels* vizinhos. O volume potencialmente escoado é calculado e, de acordo com a altura da coluna de água nos *pixels* vizinhos, o sistema determina a porção escoada para cada um. O volume escoado superficialmente é determinado com base no excesso de água do solo saturado e no volume excedente não infiltrado. O volume total calculado é distribuído e escoado para cada *pixel* vizinho, baseado na declividade do terreno (método estático). O volume que atinge um *pixel* contendo um curso d'água é propagado até atingir o exutório da bacia.

3.3.3 Dados de entrada

O modelo DHSVM considera um total de 16 parâmetros de solo. Segundo Oliveira (2014), devido a dificuldades e elevados custos, poucos estudos detalhados de hidrologia dos solos são realizados no Brasil, o que dificulta sobremaneira a obtenção dos parâmetros do modelo. Para cada tipo de solo, os parâmetros, apresentados na Tabela 5, foram baseados nos valores obtidos por Oliveira (2014), a partir da utilização de funções de pedotransferência aplicadas para a bacia do rio Jucu, localizada em região próxima à área de estudo. Da mesma forma, os parâmetros referentes às 8 classes de uso da terra, apresentados na Tabela 6, também foram baseados no trabalho elaborado por Oliveira (2014).

Os parâmetros climáticos e de vazão utilizados foram obtidos a partir das bases de dados diários do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA). A série de dados compreendeu o período de primeiro de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2011, com resolução temporal diária. Conforme a Tabela 7, foram consideradas duas estações automáticas do INMET, uma estação fluviométrica e vinte e duas estações pluviométricas. Os dados meteorológicos considerados foram: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação de ondas curtas incidente, radiação de ondas longas incidente e precipitação. Como a radiação de ondas longas incidente não é disponibilizada, para cálculo do valor foi utilizada a Equação 3.1 (AGUIAR et al., 2011),

Tabela 5 – Parâmetros iniciais para as classes de solo presentes na área da sub-bacia do rio Pardo contida na bacia do rio Itapemirim (ES).

| Parametro | Classes de Solo | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|
| | Cambissolo | Latossolo |
| K_{ls} ($\times 10^{-5}$) (m/s) | 2,17 | 2,71 |
| EDR | 0,23 | 0,14 |
| DTS | 0,5 | 0,5 |
| MIC ($\times 10^{-7}$) (m/s) | 4,00 | 5,00 |
| CD | 0,09 | 0,09 |
| ALB_S (m/s) | 0,16 | 0,17 |
| NSL | 3 | 3 |
| | 0,52 | 0,54 |
| P | 0,54 | 0,53 |
| | 0,55 | 0,51 |
| | 0,46 | 0,35 |
| PSD | 0,49 | 0,38 |
| | 0,49 | 0,35 |
| | 0,53 | 1,01 |
| h_b | 0,40 | 0,62 |
| | 0,37 | 0,63 |
| | 0,31 | 0,31 |
| F_c | 0,36 | 0,33 |
| | 0,37 | 0,31 |
| | 0,25 | 0,23 |
| w_p | 0,30 | 0,25 |
| | 0,31 | 0,21 |
| | 1227 | 1133 |
| BD | 1211 | 1210 |
| | 1199 | 1275 |
| | 2,80 | 3,20 |
| k_{vs} ($\times 10^{-5}$) | 1,50 | 1,99 |
| | 1,38 | 2,32 |
| | 7,114 | 7,114 |
| TCon | 6,923 | 6,923 |
| | 6,923 | 7,000 |
| | 1,40 | 1,40 |
| Tcap ($\times 10^6$) | 1,40 | 1,40 |
| | 1,40 | 1,40 |

Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

$$L_{in} = [0, 7 + 5, 95 \cdot 10^{-5} (e \cdot \exp(1500/T))] \sigma T^4 \quad (3.1)$$

em que e é a pressão atual do vapor d'água no ar (hPa), T a temperatura do ar (K) e σ a constante de Stefan-Boltzmann. Os dados climáticos, não disponíveis para as estações pluviométricas, foram obtidos a partir das estações automáticas, sendo atribuído para cada estação pluviométrica os valores da estação automática mais próxima. Para escolha da estação foi utilizada o método dos polígonos de Thiessen (TUCCI, 2005).

Além dos dados citados, o DHSVM também tem como entrada um conjunto de mapas em formato *raster*, referentes a: modelo digital de elevação (MDE), direções de escoamento, máscara da bacia hidrográfica e o mapa de profundidade do solo; sendo que todos devem ter a mesma resolução espacial e coordenadas geográficas.

Tabela 6 – Parâmetros de Uso da terra, presentes na área da sub-bacia do rio Pardo contida na bacia do rio Itapemirim (ES).

| Parâmetro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FI | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 |
| OVER | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | FALSE | FALSE | FALSE |
| UNDER | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE |
| FC _o | - | 0,84 | 0,61 | - | 0,44 | - | - | - |
| TSPace | - | 0,50 | 0,60 | - | 0,70 | - | - | - |
| COEFA | - | 2,50 | 2,50 | - | 2,50 | - | - | - |
| COEFR | - | 0,70 | 0,70 | - | 0,50 | - | - | - |
| MSIC | - | 0,03 | 0,03 | - | 0,03 | - | - | - |
| SIEF | - | 0,60 | 0,60 | - | 0,60 | - | - | - |
| MRRatio | - | 0,40 | 0,40 | - | 0,40 | - | - | - |
| h _o | - | 6,33 | 20,00 | - | 22,00 | - | - | - |
| h _u | 2,70 | 0,91 | 2,59 | 0,21 | - | - | - | - |
| LAI _o JAN | - | 3,18 | 2,94 | - | 3,84 | - | - | - |
| LAI _o FEV | - | 3,26 | 3,13 | - | 4,14 | - | - | - |
| LAI _o MAR | - | 3,04 | 3,12 | - | 3,86 | - | - | - |
| LAI _o ABR | - | 4,00 | 3,60 | - | 4,51 | - | - | - |
| LAI _o MAI | - | 3,64 | 3,54 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o JUN | - | 3,84 | 3,43 | - | 4,39 | - | - | - |
| LAI _o JUL | - | 4,04 | 3,33 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o AGO | - | 3,98 | 2,98 | - | 3,97 | - | - | - |
| LAI _o SET | - | 3,75 | 3,06 | - | 3,88 | - | - | - |
| LAI _o OUT | - | 2,47 | 2,38 | - | 2,73 | - | - | - |
| LAI _o NOV | - | 2,31 | 2,17 | - | 2,61 | - | - | - |
| LAI _o DEZ | - | 2,91 | 2,92 | - | 3,32 | - | - | - |
| LAI _u JAN | 1,69 | 0,0046 | 0,0042 | 1,59 | - | 0,96 | 1,67 | - |
| LAI _u FEV | 1,69 | 0,0047 | 0,0045 | 1,51 | - | 0,96 | 1,95 | - |
| LAI _u MAR | 1,67 | 0,0044 | 0,0045 | 1,56 | - | 1,01 | 1,78 | - |
| LAI _u ABR | 2,03 | 0,0058 | 0,0052 | 1,78 | - | 1,09 | 2,01 | - |
| LAI _u MAI | 2,10 | 0,0053 | 0,0051 | 1,83 | - | 1,08 | 2,01 | - |
| LAI _u JUN | 1,97 | 0,0055 | 0,0049 | 1,65 | - | 0,97 | 1,92 | - |
| LAI _u JUL | 1,88 | 0,0058 | 0,0048 | 1,51 | - | 0,91 | 1,87 | - |
| LAI _u AGO | 1,67 | 0,0057 | 0,0043 | 1,35 | - | 0,78 | 1,68 | - |
| LAI _u SET | 1,62 | 0,0054 | 0,0044 | 1,29 | - | 0,80 | 1,71 | - |
| LAI _u OUT | 1,18 | 0,0036 | 0,0034 | 1,09 | - | 0,70 | 1,42 | - |
| LAI _u NOV | 1,18 | 0,0033 | 0,0031 | 1,17 | - | 0,78 | 1,31 | - |
| LAI _u DEZ | 1,59 | 0,0042 | 0,0042 | 1,52 | - | 0,91 | 1,62 | - |
| RMAX _o | - | 5000 | 5000 | - | 5000 | - | - | - |
| RMAX _u | 5000 | 2788 | 2788 | 5000 | - | 3000 | 5000 | - |
| RMIN _o | - | 153 | 153 | - | 125 | - | - | - |
| RMIN _u | 175 | 153 | 153 | 125 | - | 340 | 165 | - |
| MT _o | - | 0,27 | 0,20 | - | 0,19 | - | - | - |
| MT _u | - | 0,28 | 0,21 | 0,18 | - | 0,19 | 0,20 | - |
| VPD _o | - | 3663 | 3663 | - | 2128 | - | - | - |
| VPD _u | 3636 | 3663 | 3663 | 4202 | - | 4000 | 4202 | - |
| RPC _o | - | 0,63 | 0,64 | - | 0,70 | - | - | - |
| RPC _u | 0,53 | 0,00091 | 0,00093 | 0,51 | - | - | 0,53 | - |
| ALB _o JAN | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o FEV | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAR | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o ABR | - | 0,11 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAI | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o JUN | - | 0,10 | 0,11 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o JUL | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o AGO | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o SET | - | 0,10 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,15 | - |
| ALB _o OUT | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o NOV | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o DEZ | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,13 | - |
| ALB _u JAN | 0,15 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u FEV | 0,15 | 0,00016 | 0,00018 | 0,17 | - | 0,20 | 0,14 | - |
| ALB _u MAR | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u ABR | 0,14 | 0,00015 | 0,00018 | 0,15 | - | 0,16 | 0,14 | - |
| ALB _u MAI | 0,14 | 0,00013 | 0,00016 | 0,15 | - | 0,17 | 0,13 | - |
| ALB _u JUN | 0,14 | 0,00014 | 0,00016 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u JUL | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u AGO | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,15 | - | 0,18 | 0,13 | - |
| ALB _u SET | 0,15 | 0,00014 | 0,00019 | 0,18 | - | 0,21 | 0,15 | - |
| ALB _u OUT | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u NOV | 0,16 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u DEZ | 0,15 | 0,00016 | 0,00019 | 0,16 | - | 0,19 | 0,13 | - |
| RZD ₁ | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,33 | 0,25 |
| RZD ₂ | 0,80 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 1,00 | 0,33 | 0,90 |
| RZD ₃ | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,40 | 1,00 | 0,01 | 0,70 |
| RZF _{o1} | - | 0,55 | 0,58 | - | 0,58 | - | - | - |
| RZF _{o2} | - | 0,40 | 0,38 | - | 0,42 | - | - | - |
| RZF _{o3} | - | 0,04 | 0,04 | - | 0,00 | - | - | - |
| RZF _{u1} | 0,43 | 0,40 | 0,40 | 0,99 | - | 0,44 | 0,99 | - |
| RZF _{u2} | 0,57 | 0,60 | 0,60 | 0,00 | - | 0,30 | 0,00 | - |
| RZF _{u3} | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,02 | 0,00 | - |

Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

Tabela 7 – Estações utilizadas como fonte de informações hidroclimatológicas.

| Estação | Código | Tipo |
|----------------------|----------|---------------|
| Iuna | 57360000 | Fluviométrica |
| Alegre | A617 | Meteorológica |
| Alfredo Chaves | A615 | Meteorológica |
| Atílio Vivácqua | 2041000 | Pluviométrica |
| Burarama | 2041021 | Pluviométrica |
| Castelo | 2041002 | Pluviométrica |
| Conceição de Castelo | 2041011 | Pluviométrica |
| Dores do Rio Preto | 2041014 | Pluviométrica |
| Dores do Manhumirim | 2041008 | Pluviométrica |
| Duas Barras | 2041017 | Pluviométrica |
| Faz. Monte Alegre | 2041015 | Pluviométrica |
| Faz. Vargem Alegre | 2041048 | Pluviométrica |
| Guaçu | 2041001 | Pluviométrica |
| Ibitirama | 2041016 | Pluviométrica |
| Iconha | 2050005 | Pluviométrica |
| Itaici | 2041019 | Pluviométrica |
| Iúna | 2041013 | Pluviométrica |
| Jaciguá | 2041010 | Pluviométrica |
| Mimoso | 2141015 | Pluviométrica |
| São José das Torres | 2141017 | Pluviométrica |
| São Rafael | 2040023 | Pluviométrica |
| Sta. Cruz do Caparaó | 2041017 | Pluviométrica |
| Usina Fortaleza | 2041018 | Pluviométrica |
| Usina Paineiras | 2040006 | Pluviométrica |
| Vila Nova Maravilha | 2040020 | Pluviométrica |

3.3.4 Modelagem das diferentes resoluções espaciais e profundidades do solo

Para a modelagem de diferentes resoluções espaciais, foram gerados mapas de entrada do modelo com tamanhos de *pixel* de 45, 100, 150 e 200 metros. Inicialmente, foi elaborado o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) da área por meio do interpolador “topo to raster” (HUTCHINSON, 1989) do ArcGIS[®], tendo como entrada o MDE *Global Digital Elevation Model* (GDEM2), oriundo do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), disponível gratuitamente na internet, e que foi desenvolvido em conjunto pela *U.S. National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *Japan’s Ministry of Economy, Trade, and Industry* (METI), do mapa da rede hidrográfica e do mapa de curvas de nível do terreno, ambos em formato vetorial e disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A partir do MDE interpolado, fez-se o preenchimento de depressões espúrias por meio da ferramenta *Fill*, obtendo-se um MDEHC para cada resolução. Os demais mapas foram gerados na mesma resolução espacial do MDEHC, também utilizando o programa ArcGIS[®], versão

10.1.

Para geração dos mapas de profundidade do solo, foi executado o comando: **Arc: *Érun createstreamnetwork dem mask soild streams MASK pixelCount mindepth maxdepth***, considerando o tamanho de *pixel* igual a 100 metros. Foram gerados mapas para profundidades máximas (*maxdepth*) de 5, 20, 120 e 160 metros, todos com profundidade mínima (*mindepth*) de 1,5 metros. O comando executa um *script* do modelo, implementado na linguagem AML (*Arc Macro Language*), que tem como parâmetros de entrada o MDEHC, o mapa contendo o máscara da bacia, o nome do arquivo de saída para o mapa de profundidade do solo, o nome do arquivo de saída para o arquivo contendo o mapa da rede hidrográfica, o número de *pixels* mínimo acumulado para que o *pixel* seja considerado pertencente a um curso d'água, a profundidade mínima e a profundidade máxima do solo. No *script*, o cálculo da profundidade do solo para cada *pixel* é realizado por meio da Equação

$$sd = mindep + (maxdep - mindep)(wtslope(1 - (tmpslope/maxslope)^{powslope})) + \cap(wtsource(tmpsrc/maxsource)^{powsource}) + \cap(wtelev(1 - (tmpelev/maxelev)^{povelev})) \quad (3.2)$$

em que, *mindep* e *maxdep* são a profundidade mínima e máxima do solo, respectivamente, *wtslope* é o peso da declividade, *tmpslope* a declividade do *pixel*, *maxslope* a declividade máxima do *pixel*, *powslope* o ganho da inclinação, *wtsource* o peso da área de contribuição do *pixel*, *tmpsrc* a área de contribuição do *pixel*, *maxsource* a máxima área de contribuição, *powsource* o ganho da área de contribuição, *wtelev* o peso da elevação do *pixel*, *tmpelev* a elevação do *pixel*, *maxelev* a elevação máxima do *pixel*, e *povelev* o ganho da elevação do *pixel*. Os valores de *tmpslope*, *tmpsource* e *tmpelev* são sempre ajustados para no máximo os valores de *maxslope*, *maxsource* e *maxelev*, respectivamente.

3.3.5 Avaliação da eficiência do modelo

A avaliação da eficiência do modelo foi realizada por meio de índices estatísticos e da análise dos hidrogramas obtidos para cada caso modelado, comparando-se os mesmos com o hidrograma referente à vazão observada no exutório da bacia. Os índices estatísticos utilizados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), Equação 3.3, o coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado (NS') (LEGATES; MCCABE, 1999), Equação 3.4, e o percentual de viés (PBIAS) (MORIASI et al., 2007), Equação 3.5.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{média}^{obs})^2} \quad (3.3)$$

$$NS' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^{obs} - Q_i^{sim}|}{\sum_1^n |Q_i^{obs} - Q_{média}^{obs}|} \quad (3.4)$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})}{\sum_1^n (Q_i^{obs})} \quad (3.5)$$

em que, Q_i^{obs} é a i -ésima vazão observada; Q_i^{sim} a i -ésima vazão simulada; n é o número de observações; e $Q_i^{média}$ a média das vazões observadas. Os índices NS e NS' variam de menos infinito até 1, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de melhores resultados da modelagem. O índice PBIAS indica, em média, se os valores estimados estão sub ou superestimados com relação aos valores observados. Segundo Moriasi et al. (2007), o modelo é considerado aceitável se $NS > 0,50$ e $-25 < PBIAS < 25$.

3.4 Resultados e discussão

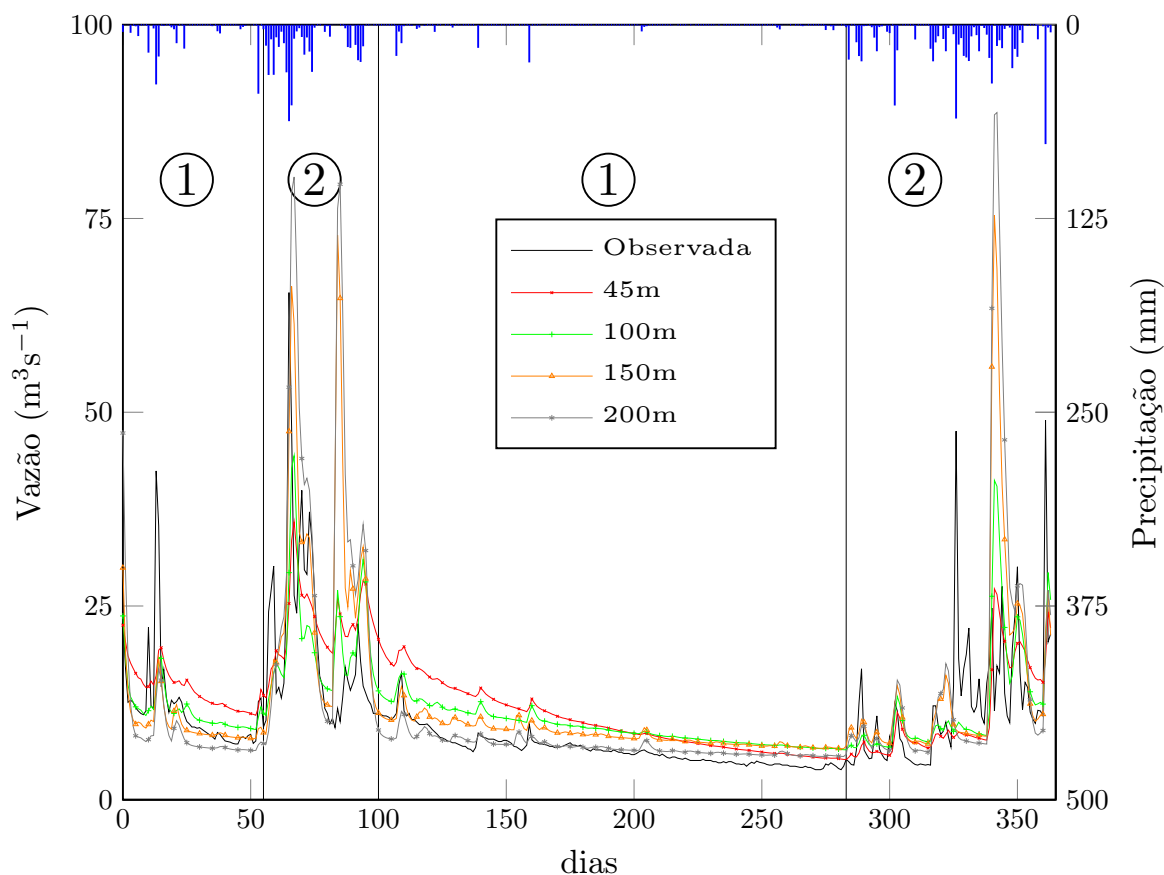
Embora as modelagens realizadas tenham considerado o período de 01/01/2007 a 31/12/2011, para uma melhor visualização, optou-se por apresentar os hidrogramas apenas para o ano de 2011. Para os demais anos, o comportamento foi semelhante ao observado para o ano de 2011. Nas seções seguintes, são apresentados os resultados comparativos da modelagem para diferentes resoluções espaciais e, na seqüência, os resultados comparativos para as diferentes profundidades do solo.

3.4.1 Resultados para diferentes resoluções espaciais

Na Figura 4 são apresentados os hidrogramas resultantes da modelagem considerando tamanhos de *pixel* de 45, 100, 150 e 200 metros. Para melhor visualização e análise, foram considerados dois casos: o primeiro, referente a períodos de menor precipitação e o segundo referente a períodos de maior precipitação. Nos períodos de menor precipitação, identificados pelo número 1 na Figura 4, o modelo apresentou tendência a super-estimar as vazões tanto quanto menor foi o tamanho do *pixel*. Já para os períodos chuvosos, identificados pelo número 2, nos quais o regime de vazão é regido diretamente pela precipitação, quanto maior o tamanho do *pixel* maiores foram os valores estimados para as vazões máximas.

Esses comportamentos podem ser explicados em função do modelo de escoamento utilizado no DHSVM. Nesse caso, a velocidade de escoamento superficial é definida como $v = \Delta x / \Delta t$, em que Δx é o tamanho do *pixel* e Δt é o passo de tempo considerado na modelagem (WIGMOSTA et al., 2002). Assim, a velocidade de escoamento superficial torna-se ajustável em função do tamanho do *pixel* considerado e, neste caso, quanto maior o *pixel*, maior é a velocidade de escoamento. Conseqüentemente, o excedente de água na

Figura 4 – Hidrógrafas comparativas para as modelagens com diferentes resoluções espaciais.



superfície do solo chega a um curso d'água mais rapidamente, fazendo com que o volume atinja picos maiores e de menor duração.

Da mesma forma, o modelo de escoamento pode ser considerado na justificativa do comportamento durante os períodos secos. Para resoluções menores, a lâmina disponível na superfície do solo demora um tempo maior para chegar aos cursos d'água. Com isso, no início do período seco os volumes são mais elevados em função da parcela de escoamento superficial que chega de forma mais lenta. A partir do momento em que diminui a contribuição do escoamento superficial, o regime de vazão passa a ser determinado apenas por meio do escoamento subterrâneo o que leva a valores de vazão próximos para todas as resoluções.

De acordo com o modelo, outra forma de se influenciar na velocidade de escoamento é por meio do passo de tempo da simulação o qual, quanto menor, maior a velocidade de escoamento. Beckers, Smerdon e Wilson (2009) destacam que o modelo apresenta melhores resultados quando são utilizados dados horários. Neste caso, com um passo de tempo menor (com relação a dados diários), a velocidade de escoamento também é maior, mesmo utilizando-se resoluções espaciais maiores. Em trabalhos recentes de modelagem

utilizando o DHSVM, nos quais o passo de tempo é superior a uma hora, normalmente o tamanho do *pixel* considerado é superior a 100 metros, como por exemplo os trabalhos elaborados por Thanapakpawin et al. (2007) e Ottenbreit (2011). Por outro lado, nos estudos elaborados por Cuartas et al. (2012) e Alvarenga (2015), nos quais o passo de tempo é inferior a uma hora, os tamanhos de *pixel* considerados foram inferiores a 100 metros. Cuartas et al. (2012) também mostra resultados que indicam que a resolução espacial utilizada pode induzir a erros que influenciam no resultado final da modelagem, principalmente nos componentes que influenciam na profundidade da água no solo. Uma vez que as modelagens realizadas neste trabalho consideraram dados diários, os resultados obtidos para menores resoluções espaciais, ou seja, *pixel* de 100, 150 e 200 metros, foram melhores do que os obtidos para a resolução maior, com *pixel* de 45 metros.

A análise dos índices estatísticos apresentados na Tabela 8 mostra que, para a área de estudo, a resolução com *pixel* de 100 metros apresentou a maior eficiência. Para resoluções menores, como 45 metros, o índice NS foi de -0,41, o que indica que o modelo não foi eficiente em estimar as vazões de pico, o mesmo observado para o índice NS' que foi de -0,04. Com relação ao índice PBIAS, que foi de 16,58%, este pode ser considerado aceitável. Esses índices corroboram com o que pode ser visualizado na Figura 4, na qual as vazões máximas foram sub-estimadas e as vazões mínimas super-estimadas. Para as resoluções de 150 e 200 metros, os índices NS e NS' iguais a -0,01 e 0,04, respectivamente, indicam que o modelo apresentou eficiência superior à resolução de 45 metros mas, nesse caso, com tendência a super-estimar as vazões máximas e, embora em menor intensidade, também as vazões mínimas.

Tabela 8 – Estatísticas referentes às modelagens para a bacia do rio Pardo, considerando as resoluções espaciais de 45, 100, 150 e 200 metros

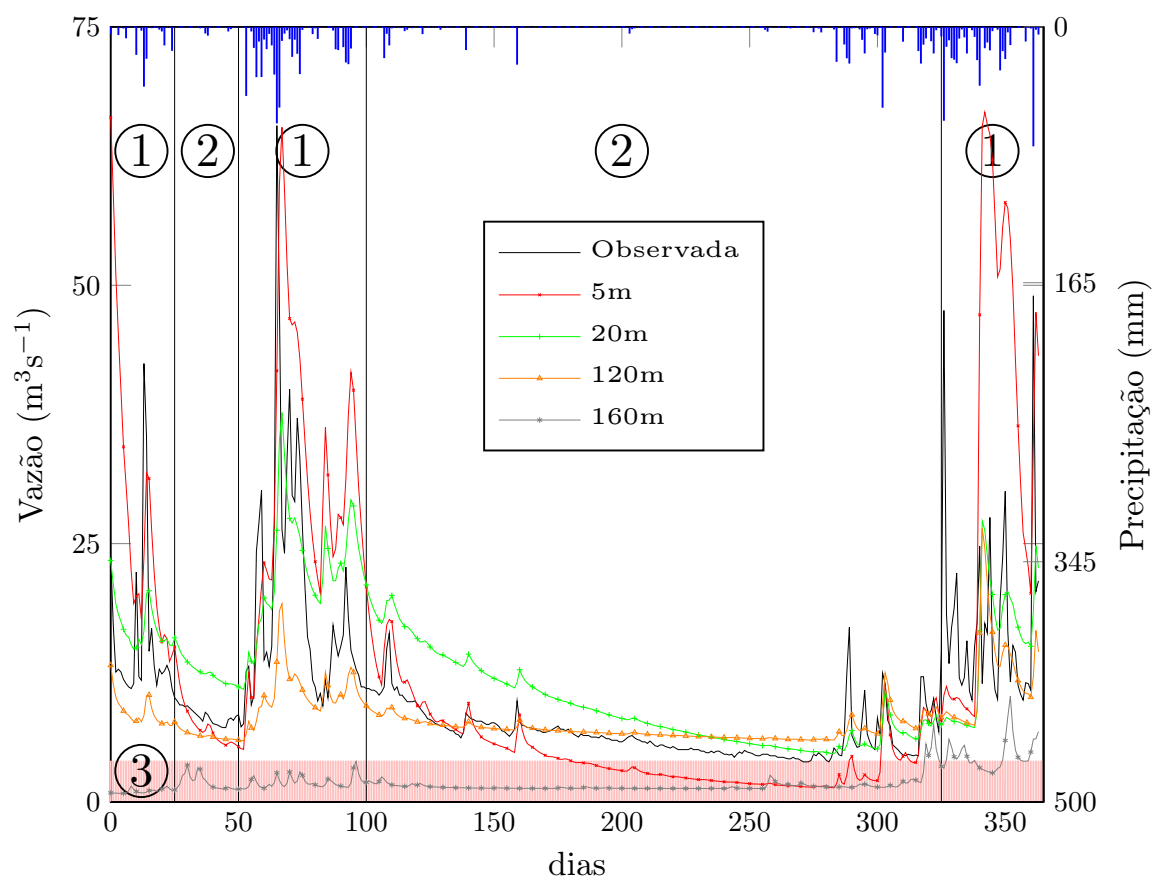
| Resolução espacial (m) | NS | NS' | PBIAS(%) |
|------------------------|-------|-------|----------|
| 45 | -0,41 | -0,04 | 16,58 |
| 100 | 0,13 | 0,21 | 10,65 |
| 150 | -0,01 | 0,08 | -43,26 |
| 200 | 0,04 | 0,12 | -39,06 |

3.4.2 Resultados para diferentes profundidades do solo

As vazões diárias modeladas, considerando cada profundidade do solo, estão apresentadas na Figura 5, juntamente com a vazão observada. Nessa figura são destacados três comportamentos observados: 1 - períodos chuvosos; 2 - períodos secos; e 3 - para ambos os períodos, mas considerando profundidades do solo, para o caso da área estudada, muito grandes.

Em períodos chuvosos (comportamento 1), fica evidente que, para profundidades de solo maiores, a vazão tende a ser menor e, para profundidades menores, a vazão tende a ser maior. Esse comportamento pode ser explicado em função da maneira como o modelo calcula a lâmina escoada. Segundo Wigmosta et al. (2002), o modelo de infiltração estático, escolhido para este trabalho, considera uma taxa máxima de infiltração (MIC) para cada tipo de solo. Nesse caso, quando a lâmina de água disponível na superfície do solo é inferior ao valor de MIC, toda ela é infiltrada. Já para lâminas maiores, o excedente é escoado. Além disso, quando a lâmina infiltrada mais o montante já armazenado no solo é superior à capacidade de campo, o excedente também fica disponível para escoamento superficial. Assim, como a profundidade do solo influencia na lâmina máxima que o solo pode armazenar, em solos mais rasos uma maior fração da precipitação é convertida em escoamento superficial, o qual concentra mais rapidamente no rio, elevando rapidamente a vazão de pico.

Figura 5 – Hidrógrafas comparativas para as modelagens com diferentes profundidades de solo e a vazão observada.



Para os períodos secos (comportamento 2), não se observa o mesmo padrão apresentado para os períodos chuvosos. Para a profundidade de 5 metros, as vazões mínimas foram inferiores aos valores obtidos para as profundidades de 20 e 120 metros, chegando a ser

praticamente a mesma obtida para a profundidade de 160 metros, no final do período seco e início do período chuvoso. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o volume dos cursos d'água, durante o período seco, depende basicamente do fluxo de água proveniente do sistema subterrâneo. Nesse caso, ainda segundo Wigmosta et al. (2002), o escoamento subterrâneo é determinado em função do volume de água armazenado nas camadas do solo, da condutividade hidráulica lateral do solo saturado e do gradiente do volume armazenado com relação aos *pixels* vizinhos. Para o cálculo, o modelo determina a altura das colunas de água para os *pixels* e, em seguida, o gradiente entre o *pixel* atual e cada *pixel* vizinho. Caso a altura da coluna d'água no solo seja maior que a altura da coluna d'água dos *pixels* vizinhos, o modelo calcula a lâmina que pode ser escoada lateralmente. Quando o *pixel* vizinho contém um curso d'água, o montante escoado lateralmente é adicionado ao volume do curso d'água. Para a profundidade de 5 metros, como foram menores as lâminas infiltradas (capacidade volumétrica do solo menor), menor também foi o escoamento lateral subterrâneo e, conseqüentemente, menores as vazões durante o período seco.

Para a profundidade de 160 metros (comportamento 3), observa-se que as vazões modeladas são muito inferiores às vazões observadas. Nesse caso, como o solo possui maior capacidade volumétrica disponível para armazenamento, muito superior às demais profundidades, praticamente toda a lâmina disponível na superfície é infiltrada, o que diminui consideravelmente os picos de vazão máxima pois, praticamente, somente tem-se a vazão sub-superficial. No entanto, como a lâmina infiltrada foi praticamente toda a disponível na superfície, esperava-se que as vazões durante o período seco fossem mais elevadas, o que não se observa. Esse fato pode ser explicado em função da profundidade ser demasiadamente grande e a coluna de água armazenada no solo ficar abaixo do nível dos cursos d'água, não contribuindo portanto para o aumento do volume dos mesmos.

Quanto às estatísticas de avaliação da eficiência do modelo, apresentadas na Tabela 9, pode-se observar que o modelo mostrou-se mais eficiente para profundidades menores do solo, com destaque para a profundidade de 20 metros na qual, mesmo com valores próximos de valores considerados satisfatórios, o modelo apresentou tendência a sub-estimar as vazões máximas e super-estimar as vazões mínimas.

Tabela 9 – Estatísticas referentes às modelagens para a bacia do rio Pardo, considerando as profundidades de 5, 20, 120 e 160 metros

| Profundidade (m) | NS | NS' | PBIAS (%) |
|------------------|-------|------|-----------|
| 5 | 0,31 | 0,18 | 12,66 |
| 20 | 0,40 | 0,30 | 4,80 |
| 120 | 0,12 | 0,11 | 25,37 |
| 160 | -0,15 | 0,15 | 17,54 |

3.5 Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo da influência da resolução espacial e da profundidade do solo na precisão do modelo DHSVM. Foram calibradas a profundidade do solo e a resolução espacial do modelo para uma bacia hidrográfica montanhosa localizada na região Sudeste do Brasil, com área de 432 km². Os resultados mostram que a profundidade do solo tem influência na amplitude das vazões estimadas por influenciar na capacidade de infiltração da água no solo, o que influencia tanto as vazões máximas quanto as mínimas. Já a resolução espacial influencia na velocidade de deslocamento da água na superfície do solo e, conseqüentemente, na velocidade de cheia e esvaziamento dos cursos d'água.

Os resultados indicam que, para regiões com pouca disponibilidade de dados referentes aos parâmetros do modelo, um bom ajuste da profundidade do solo e da resolução espacial adotada podem melhorar sensivelmente a eficiência da modelagem. Em particular, para a sub-bacia do Rio Pardo, os resultados mostram que a profundidade do solo deve ser próxima de 20 metros e o tamanho do *pixel*, considerando passo de tempo diário, deve ser próxima de 100 metros.

4 Uso da heurística híbrida *Clustering Search* para calibração automática do modelo DHSVM

4.1 Resumo

Na modelagem hidrológica, a calibração dos parâmetros de entrada do modelo é de extrema importância para que o resultado final seja satisfatório. Embora importante, o modelo hidrológico *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM) não dispõe de uma ferramenta automática para calibração dos seus parâmetros de entrada dificultando assim sua utilização de maneira mais frequente em estudos hidrológicos. Atualmente, com o aumento do poder computacional, o processo de calibração automática de modelos tem se tornado o padrão. Por ser um problema de otimização global, diferentes heurísticas têm sido utilizadas, como por exemplo: algoritmos genéticos e *simulated annealing*, o que torna importante a investigação da possibilidade de aplicação de novas heurísticas para a solução do problema de calibração de parâmetros de entrada de modelos hidrológicos. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma ferramenta de calibração dos parâmetros de entrada do modelo DHSVM que aplica a heurística híbrida *Clustering Search* (CS) ao processo de calibração. Os resultados mostram que a ferramenta e o CS atendem de maneira satisfatória ao processo de calibração dos parâmetros de entrada do modelo DHSVM.

4.2 Introdução

O sucesso da modelagem hidrológica depende da quantificação dos valores dos parâmetros de entrada do modelo que melhor se ajustem, de acordo com as equações do modelo, às características da bacia estudada. Entretanto, nem sempre se tem disponível um conjunto de valores de parâmetros que, quando utilizados, levam a uma modelagem de boa qualidade. Nesses casos, torna-se importante a realização da calibração dos parâmetros de entrada de forma a se obter melhores resultados para a modelagem (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). Isso se deve ao fato de que, nem sempre, os valores disponíveis correspondem à

bacia estudada, sendo obtidos de outros trabalhos ou da literatura, ou utiliza-se os valores padrão do modelo.

O processo de calibração consiste em variar os valores dos parâmetros de entrada do modelo visando obter melhores ajustes na modelagem, podendo ser realizada de forma manual ou automática. O processo manual requer experiência do pesquisador e tende a ser muito trabalhoso. O processo automático tem se tornado mais usual graças aos avanços da computação onde são utilizadas variadas técnicas de otimização como, por exemplo, Algoritmos Genéticos (YAO; YANG, 2009) e *Simulated Annealing* (SUMNER; FLEMING; BATES, 1997).

O modelo DHSVM, proposto por Wigmosta, Vail e Lettenmaier (1994), é um modelo hidrológico distribuído que subdivide a área de estudo em unidades sobre as quais são realizadas as simulações dos processos climáticos, vegetacionais e hidrológicos por meio de equações físicas. O modelo tem sido aplicado com sucesso em simulação hidrológica (OLIVEIRA, 2014; ALVARENGA, 2015; WESTRICK; STORCK; MASS, 2002) e no estudo do impacto de mudanças climáticas (SHOURONG et al., 2002; CUO et al., 2011).

Devido à indisponibilidade de uma ferramenta automatizada, na maioria dos trabalhos a calibração do DHSVM é realizada de forma manual, o que é bastante trabalhoso em função do grande número de parâmetros de entrada do modelo. Outro aspecto que torna complexa a calibração do modelo DHSVM é o alto custo computacional demandado para a simulação. A depender da extensão da área a ser modelada, uma única execução do modelo pode levar até horas para processamento, mesmo utilizando computadores modernos.

Como alternativa para a calibração de modelos hidrológicos, em particular o modelo DHSVM, outros métodos de otimização devem ser investigados. Em função do custo computacional para execução da modelagem e do grande número de soluções viáveis para o problema, métodos exatos não são recomendados pois a execução do modelo para todas as soluções torna-se inviável. Nesse sentido, métodos heurísticos tendem a ser mais indicados para o problema, por permitirem a busca dentro do espaço de soluções sem que necessariamente todas as soluções sejam verificadas.

Um método alternativo ainda não testado para o problema de calibração de modelos hidrológicos é a heurística híbrida *Clustering Search* (CS). O método é uma generalização do método *evolutionary clustering search*, proposto por Oliveira e Lorena (2004), que explora o conceito de clusterização de soluções para detecção de regiões promissoras. Ao se tornar promissor, um *cluster* é submetido a uma busca local mais intensa.

Este trabalho tem por objetivo implementar um método para calibração automática dos parâmetros do modelo DHSVM, utilizando a meta-heurística híbrida *Clustering Search*. Além do calibrador propriamente dito, uma interface gráfica é proposta com o intuito de tornar mais amigável o processo de entrada de dados para a calibração. Posteriormente, fez-se a aplicação da ferramenta na calibração dos parâmetros de solo do modelo para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, para a qual há poucos dados de solo disponíveis.

4.3 Material e métodos

Na elaboração deste trabalho, inicialmente foram implementados os algoritmos das meta-heurísticas *Simulated Annealing* (SA) (KIRKPATRICK et al., 1983) e *Clustering Search* (CS) (CHAVES; CORREA; LORENA, 2007). A linguagem e o compilador utilizados foram, respectivamente, C e *GNU Compiler Collection* (GOUGH; STALLMAN, 2004), todos *softwares* livres disponíveis nas distribuições Linux. Para a implementação da interface gráfica foi utilizada a linguagem Java (DEITEL, 2010) e o ambiente integrado de desenvolvimento Netbeans (DANTAS, 2011). Posteriormente, fez-se a aplicação do calibrador para a bacia do rio Itapemirim, considerando as vazões observadas na estação de Rive, localizada no município de Alegre-ES, descrita na Seção 4.3.3. Nas seções a seguir são apresentadas as etapas utilizadas na implementação.

4.3.1 Implementação da heurística híbrida *Clustering Search*

A heurística híbrida CS é um método híbrido que tem como conceito principal a ideia de que a busca local, embora eficiente, é sempre muito custosa do ponto de vista computacional. Assim, o método utiliza uma heurística para a identificação de regiões promissoras, nas quais a busca local tem grandes chances de obter uma melhoria na solução. No CS, essas regiões são denominadas *clusters* (C_i), que são definidos por três atributos (oi , vi , ri). O centro (oi) é uma solução que representa o *cluster* i . O volume (vi) expressa a quantidade de soluções agrupadas no *cluster* C_i . O índice de eficácia (ri) identifica se a busca local no *cluster* está melhorando a solução (centro do *cluster*), indicando o número de vezes consecutivas que a busca local foi aplicada sem que ocorra melhoria na solução (CHAVES, 2009).

No fluxograma do método, apresentado na Figura 6, durante cada iteração principal, uma nova solução S_k é gerada utilizando a meta-heurística SA. Em seguida, são determinadas as distâncias $d(k, j)$ entre a solução obtida (S_k) e cada um dos j centros de *cluster*. A solução S_k é inserida dentro do *cluster* ao qual mais se aproxima (que possui a menor distância). Várias métricas de distância podem ser utilizadas, tais como, a distância euclidiana, distância de Manhattan, distância de Hamming, distância de Levenshtein, entre outras. Quando uma nova solução é inserida no *cluster* mais próximo, o centro é recalculado, em um processo chamado assimilação, fazendo com que o centro se desloque dentro do espaço de busca. Com a inserção, o volume do *cluster* aumenta e, caso ultrapasse um valor limite (λ), definido como parâmetro de entrada, o *cluster* passa a ser considerado uma região promissora. Quando um *cluster* torna-se promissor, a heurística verifica se as últimas buscas locais no *cluster* promoveram melhorias no centro do *cluster*, comparando o índice de ineficácia, raio (r_j) do *cluster*, com o limite estabelecido por meio de um parâmetro de entrada (r_{max}). Caso o índice de ineficácia não seja atingido, uma nova busca local é aplicada ao *cluster* com o objetivo de melhorar a solução do centro. Caso

Os parâmetros apresentados na Tabela 10 têm influência tanto na eficiência quanto no tempo de execução da heurística híbrida CS, sendo importante e comum realizar a calibração desses parâmetros de forma a obter resultados satisfatórios, com um tempo de execução também satisfatório. No caso do presente trabalho, devido ao custo computacional de execução do modelo, optou-se por ajustar os parâmetros do modelo de forma manual, considerando apenas o tempo de execução da ferramenta de calibração, cujos valores estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros da heurística híbrida CS.

| Parâmetro | Descrição | Valor |
|-----------|----------------------------------|-------|
| NC | Número de clusters | 5 |
| λ | Limite de volume para um cluster | 5 |
| r_{max} | Raio máximo para um cluster | 5 |

4.3.1.1 Função objetivo

Para verificação da convergência do método, optou-se por utilizar o índice de Nash-Sutcliff (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), apresentado por meio da Equação 4.1. O índice NS pode variar entre $-\infty$ e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste das vazões estimadas em relação às vazões observadas. Neste trabalho, a função objetivo implementada calcula o valor do NS a partir da vazão diária observada e da vazão diária estimada pelo modelo DHSVM para cada conjunto de valores de parâmetros de entrada. A cada iteração, o objetivo é maximizar o valor do índice NS:

$$NS = 1 - \frac{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{média}^{obs})^2} \quad (4.1)$$

em que, Q_i^{obs} é a i -ésima vazão observada; Q_i^{sim} a i -ésima vazão simulada; n é o número de observações e $Q_{média}^{obs}$ a média das vazões observadas.

4.3.1.2 Busca local

O método de busca local utilizado foi o *Random Uphill Method* (SELMAN; KAUTZ; COHEN, 1994). A partir da solução do centro do *cluster*, o algoritmo executa um número pré-determinado de iterações que, para o presente trabalho, foi considerado 5 iterações por questões de desempenho computacional. A cada nova iteração uma solução é gerada e, então, verificada a melhora ou não em relação à melhor solução corrente (centro do *cluster*). Caso a nova solução seja melhor, essa passa a ser o novo centro do *cluster*, caso contrário o centro é mantido inalterado.

4.3.1.3 Geração de soluções vizinhas utilizando o *Simulated Annealing*

O *Simulated Annealing* (SA) é uma meta-heurística que se fundamenta em uma analogia com a termodinâmica. É uma metáfora para um processo térmico dito recozimento, usado na metalurgia para obtenção de estados de baixa energia em um sólido. A partir de uma temperatura inicial T estipulada, o sistema promove o resfriamento da temperatura a uma taxa constante (α), até que atinja uma temperatura mínima pré-definida (T_f). A cada temperatura, o método obtém uma nova solução vizinha, determina seu custo (temperatura) e então calcula a diferença do custo entre a nova solução e a solução anterior (ΔT). Caso a nova solução seja melhor (temperatura mais baixa), o sistema aceita e verifica se é a melhor solução até o momento. Caso a nova solução seja pior do que a solução corrente, o sistema determina uma probabilidade de aceitação da nova solução, o que pode levar à saída de uma região do espaço de soluções onde há a ocorrência de um ótimo local. Para cada temperatura, o sistema limita o número de soluções geradas a um valor definido pelo parâmetro SA_{max} . Os valores dos parâmetros do método, citados anteriormente e utilizados neste trabalho, são apresentados na Tabela 11. Da mesma forma, os parâmetros não foram calibrados em função do custo computacional de execução do modelo DHSVM.

Tabela 11 – Parâmetros da meta-heurística SA

| Parâmetro | Descrição | Valor |
|------------|----------------------------|--------|
| T | Temperatura inicial | 0,0002 |
| T_f | Temperatura final | 0,0001 |
| α | Taxa de resfriamento | 0,95 |
| SA_{max} | Num. soluções por iteração | 5 |

Neste trabalho, a solução inicial utilizada no algoritmo SA foi obtida a partir da modelagem inicial da bacia utilizando os parâmetros definidos pelo usuário e obtidos a partir de literaturas na área. A partir da solução inicial, o algoritmo SA gera uma nova solução para o problema por meio da seleção randômica de um dos parâmetros a serem calibrados e também da determinação randômica para o incremento ou decremento. Após a obtenção da nova solução, o algoritmo executa o modelo DHSVM e a partir do resultado calcula o custo da função objetivo e, caso seja melhor, descarta a solução anterior.

4.3.1.4 Implementação do conceito de viés

Na realização da modelagem hidrológica de uma bacia, parte-se de valores iniciais para os parâmetros que podem, em alguns casos, estarem sub-estimados ou super-estimados, com relação aos valores mais próximos do ideal para a bacia estudada. Em função dessa particularidade, ao realizar os primeiros testes do calibrador, verificou-se que, em alguns casos, os parâmetros modificados para cada nova solução vizinha ora eram incrementados

ora decrementados, não promovendo uma melhora significativa quando o valor do parâmetro encontrava-se sub-estimado ou super-estimado. Essa característica é intrínseca aos métodos de otimização sendo que, na maioria das vezes, não inviabilizam os métodos pois, por verificar um grande número de soluções viáveis, o método acaba por convergir para uma solução melhor. No entanto, para o caso específico do DHSVM, o tempo gasto para a execução do modelo e, com isso, o custo para o cálculo da função objetivo, é demasiadamente elevado, o que inviabiliza a busca por um conjunto muito grande de soluções. Assim, a adoção de parâmetros da heurística SA que levem a um grande número de iterações não pode ser adotada, sendo necessária a implementação de uma alternativa que acelere a busca para os casos de valores de parâmetros sub ou super-estimados.

Para contornar este problema, foi implementado o conceito de viés para a determinação de uma nova solução. Para cada parâmetro do modelo foi estabelecida uma variável denominada viés, que indica a tendência a ser considerada quando um novo valor do parâmetro for determinado. Após a modificação de um parâmetro, caso a nova solução obtida promova uma melhora do custo da função objetivo, o valor do viés do parâmetro é alterado, indicando que a última alteração (incremento ou decremento) deve ser mantida em uma próxima alteração no valor do parâmetro. Caso o custo da função objetivo piore ou se mantenha, o valor do viés é mantido. Nesse caso, valores de viés negativos indicam que o parâmetro deve ter seu valor decrementado e, para valores positivos, o parâmetro deve ser incrementado.

4.3.1.5 Escolha do *cluster*

Após a obtenção de uma nova solução vizinha, a cada temperatura do método SA, o algoritmo CS passa para a fase de clusterização. Caso ainda existam *clusters* não inicializados, a nova solução é inserida nos mesmos, até que não se tenha mais *clusters* não inicializados. Caso todos já tenham sido inicializados, são calculadas as distâncias euclidianas entre a nova solução e os centros de todos os *clusters*, sendo a nova solução inserida no *cluster* que apresentar a menor distância.

4.3.2 Estudo de caso

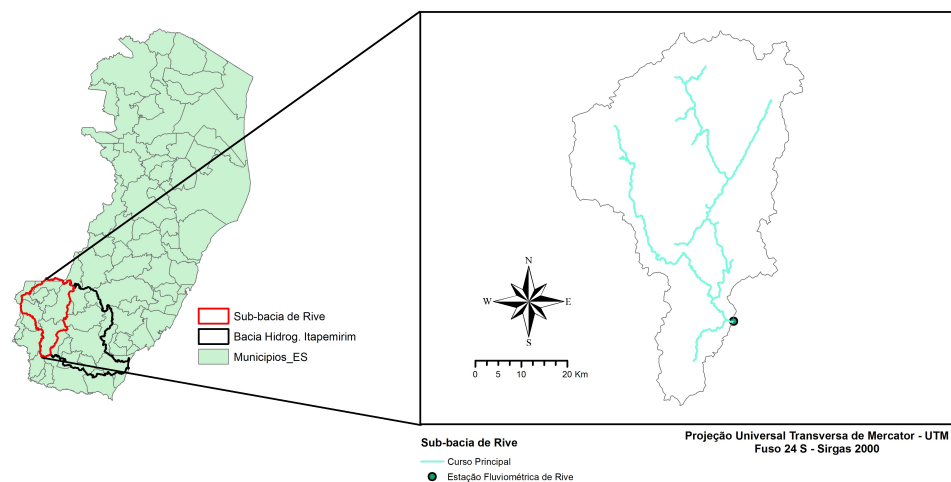
Foi realizado um estudo de caso em uma bacia hidrográfica localizada no sul do estado do Espírito Santo, a fim de testar e verificar a ferramenta implementada em um caso prático de calibração. Nas seções a seguir são apresentados os dados e informações pertinentes.

4.3.3 Caracterização da área de estudo

Para teste da ferramenta de calibração, foi escolhida uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, à montante da estação fluviométrica de Rive, localizada no município de Alegre, sul do Espírito Santo. A área de drenagem da sub-bacia é de aproximadamente

2.220 km², altitude máxima de 2.840 m e mínima de 100 m. A topografia é acidentada, com a ocorrência das cerras de maiores elevações nas proximidades dos limites norte e oeste. A Figura 7 apresenta a localização da bacia e da estação fluviométrica.

Figura 7 – Localização geográfica da área de estudo.



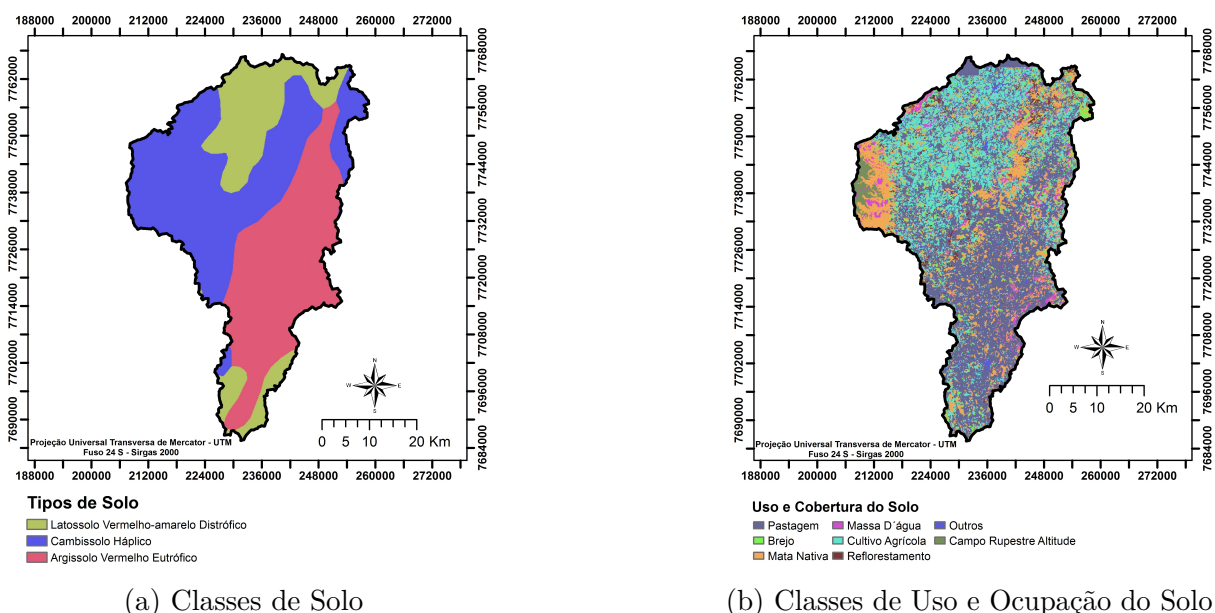
Os tipos de solo da sub-bacia foram obtidos do Mapa de Solos do Brasil, na escala 1:5.000.000, atualizado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 2006 (SANTOS et al., 2011), verificando-se a existência de três tipos de solo: Latossolo, Cambissolo e Argissolo. A Figura 8a apresenta o mapa contendo a representação das áreas de ocorrência dos tipos de solo.

O Instituto Estadual do Meio Ambiente – IEMA disponibiliza o mapa de uso da terra utilizado no presente trabalho, que fora obtido por meio de fotointerpretação em imagens aéreas ortorretificadas com grade de espaçamento de 1 m², obtidas de um aerolevante ocorrido entre os anos de 2007 e 2008. Para a área da bacia estudada, o mapa apresenta um conjunto de classes de uso que foram reorganizadas e agrupadas gerando um total de 8 classes, que podem ser visualizadas no mapa da Figura 8b, na qual verifica-se a predominância de áreas de pastagem e cultivos agrícolas.

4.3.4 Dados de entrada do DHSVM

Para a obtenção dos parâmetros de solo foram realizados levantamentos das informações em trabalhos referentes a estudos utilizando o modelo DHSVM em outras regiões do Brasil (OLIVEIRA, 2014; KRUK et al., 2009). Após o estudo, optou-se por utilizar os parâmetros apresentados por Oliveira (2014), que realizou a modelagem da bacia do rio Jucu utilizando o modelo DHSVM. Essa escolha foi baseada no fato de que a região de estudo é próxima à bacia do rio Itapemirim possuindo, portanto, características de solo e topografia semelhantes à área de estudo escolhida. Na Tabela 12 são apresentados os

Figura 8 – Mapas de classes de solo e de uso da terra referentes à bacia de Rive.



Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2014).

valores dos parâmetros de solo que foram mapeados e ajustados para os tipos de solo presentes na bacia estudada.

Os parâmetros de uso da terra também foram obtidos a partir do trabalho de modelagem da bacia do rio Jucu e estão apresentados na Tabela 13.

As informações meteorológicas, necessárias para a modelagem, foram obtidas, em escala diária, de estações automáticas e convencionais localizadas tanto internamente na bacia quanto nas proximidades do contorno da mesma, conforme o mapa de localização das estações apresentado na Figura 9, e Tabela 14. As estações Alfredo Chaves e Rive fazem parte do Sistema de Informação Meteorológica Automática de Superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As demais são estações pluviométricas pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas (ANA). A opção por utilizar estações com dados apenas de precipitação deve-se ao fato de não existirem estações automáticas em quantidade satisfatória nas proximidades da bacia estudada. As informações meteorológicas não disponíveis nas estações pluviométricas, necessárias para a modelagem, foram atribuídas em cada estação pluviométrica a partir da estação automática mais próxima. Para a determinação da estação mais próxima foram determinados os Polígonos de Thiessen, onde a estação automática escolhida como fonte de dados foi a que se encontrava no mesmo polígono que a estação pluviométrica.

A série de dados meteorológicos e fluviométricos considerada foi diária, compreendendo o período de 01/01/2007 a 31/12/2011. A série foi dividida em duas partes, sendo a primeira do dia 01/01/2007 a 31/12/2007, utilizada para a fase de aquecimento do modelo e, a segunda, com o restante da série, utilizada para a calibração da bacia. Por se tratar

Tabela 12 – Parâmetros de solo iniciais.

| Parametro | Classes de Solo | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
| | Cambissolo | Latossolo | Argissolo |
| K_{ls} ($\times 10^{-5}$) (m/s) | 2,17 | 2,71 | 2,46 |
| EDR | 0,23 | 0,14 | 0,33 |
| DTS | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| MIC ($\times 10^{-7}$) (m/s) | 4,00 | 5,00 | 5,00 |
| CD | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| ALB_S (m/s) | 0,16 | 0,17 | 0,19 |
| NSL | 3 | 3 | 3 |
| P | 0,52 | 0,54 | 0,48 |
| | 0,54 | 0,53 | 0,47 |
| | 0,55 | 0,51 | 0,47 |
| PSD | 0,46 | 0,35 | 0,46 |
| | 0,49 | 0,38 | 0,43 |
| | 0,49 | 0,35 | 0,40 |
| h_b | 0,53 | 1,01 | 0,63 |
| | 0,40 | 0,62 | 0,35 |
| | 0,37 | 0,63 | 0,45 |
| F_c | 0,31 | 0,31 | 0,25 |
| | 0,36 | 0,33 | 0,33 |
| | 0,37 | 0,31 | 0,32 |
| w_p | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| | 0,30 | 0,25 | 0,27 |
| | 0,31 | 0,21 | 0,25 |
| BD | 1227 | 1133 | 1293 |
| | 1211 | 1210 | 1332 |
| | 1199 | 1275 | 1361 |
| k_{vs} ($\times 10^{-5}$) | 2,80 | 3,20 | 2,90 |
| | 1,50 | 1,99 | 1,07 |
| | 1,38 | 2,32 | 1,40 |
| TCon | 7,114 | 7,114 | 7,114 |
| | 6,923 | 6,923 | 6,923 |
| | 6,923 | 7,000 | 6,923 |
| Tcap ($\times 10^6$) | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| | 1,40 | 1,40 | 1,40 |

Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

de uma série pequena, optou-se por não realizar a etapa de validação.

4.3.5 Calibração dos parâmetros iniciais

O principal fator que influenciou a escolha dos parâmetros a serem calibrados foi a escassez de estudos que apresentassem valores mais precisos para os valores dos parâmetros de solo referentes à região estudada. Além disso, no estudo elaborado por Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011), os resultados mostram que os parâmetros de solo apresentam grande sensibilidade. No trabalho elaborado por Du et al. (2014), os resultados indicam que o parâmetro referente a Taxa Máxima de Infiltração apresenta grande sensibilidade. Neste trabalho, foram calibrados somente os parâmetros: condutividade lateral (K_{ls}), taxa de decaimento exponencial (EDR), taxa máxima de infiltração (MIC) e a porosidade (P), todos referentes ao solo. Segundo Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011), esses estão dentro do grupo de parâmetros mais sensíveis do DHSVM. Os parâmetros referentes ao uso da

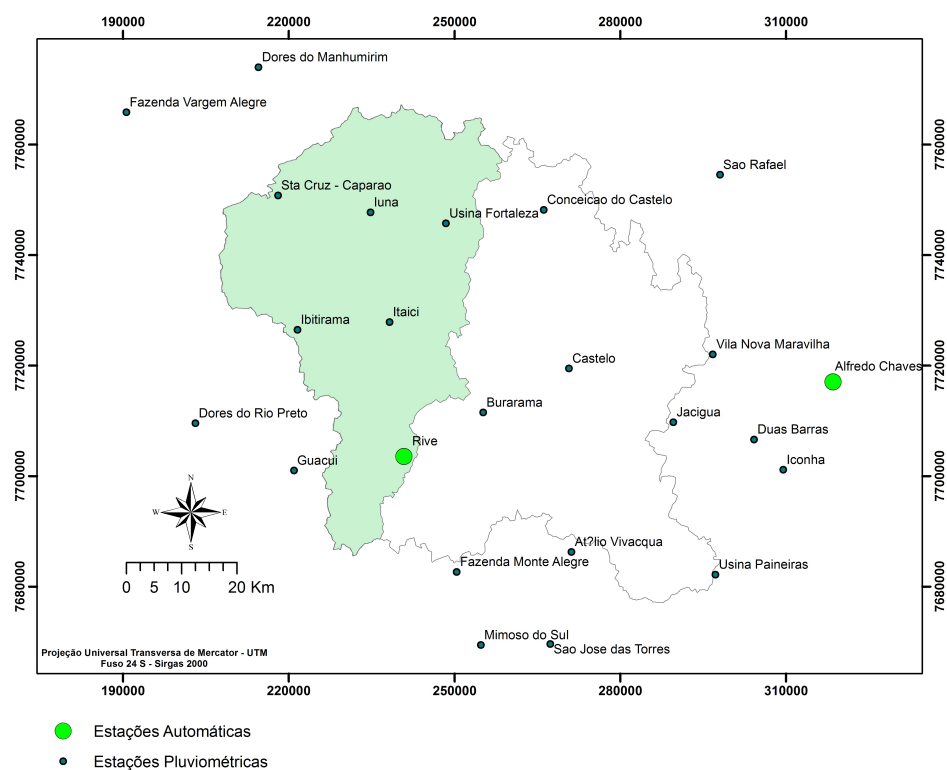
Tabela 13 – Parâmetros de uso da terra.

| Parâmetro | C. Agr. | C. Rupestre | Mata Nativa | Pastagem | Reflorestamento | Outros | Brejo | Massa D'água |
|----------------------|---------|-------------|-------------|----------|-----------------|--------|-------|--------------|
| FI | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 |
| OVER | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | FALSE | FALSE | FALSE |
| UNDER | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE |
| FC _o | - | 0,84 | 0,61 | - | 0,44 | - | - | - |
| TSPace | - | 0,50 | 0,60 | - | 0,70 | - | - | - |
| COEFA | - | 2,50 | 2,50 | - | 2,50 | - | - | - |
| COEFR | - | 0,70 | 0,70 | - | 0,50 | - | - | - |
| MSIC | - | 0,03 | 0,03 | - | 0,03 | - | - | - |
| SIEff | - | 0,60 | 0,60 | - | 0,60 | - | - | - |
| MRRatio | - | 0,40 | 0,40 | - | 0,40 | - | - | - |
| h _o | - | 6,33 | 20,00 | - | 22,00 | - | - | - |
| h _u | 2,70 | 0,91 | 2,59 | 0,21 | - | - | - | - |
| LAI _o JAN | - | 3,18 | 2,94 | - | 3,84 | - | - | - |
| LAI _o FEV | - | 3,26 | 3,13 | - | 4,14 | - | - | - |
| LAI _o MAR | - | 3,04 | 3,12 | - | 3,86 | - | - | - |
| LAI _o ABR | - | 4,00 | 3,60 | - | 4,51 | - | - | - |
| LAI _o MAI | - | 3,64 | 3,54 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o JUN | - | 3,84 | 3,43 | - | 4,39 | - | - | - |
| LAI _o JUL | - | 4,04 | 3,33 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o AGO | - | 3,98 | 2,98 | - | 3,97 | - | - | - |
| LAI _o SET | - | 3,75 | 3,06 | - | 3,88 | - | - | - |
| LAI _o OUT | - | 2,47 | 2,38 | - | 2,73 | - | - | - |
| LAI _o NOV | - | 2,31 | 2,17 | - | 2,61 | - | - | - |
| LAI _o DEZ | - | 2,91 | 2,92 | - | 3,32 | - | - | - |
| LAI _u JAN | 1,69 | 0,0046 | 0,0042 | 1,59 | - | 0,96 | 1,67 | - |
| LAI _u FEV | 1,69 | 0,0047 | 0,0045 | 1,51 | - | 0,96 | 1,95 | - |
| LAI _u MAR | 1,67 | 0,0044 | 0,0045 | 1,56 | - | 1,01 | 1,78 | - |
| LAI _u ABR | 2,03 | 0,0058 | 0,0052 | 1,78 | - | 1,09 | 2,01 | - |
| LAI _u MAI | 2,10 | 0,0053 | 0,0051 | 1,83 | - | 1,08 | 2,01 | - |
| LAI _u JUN | 1,97 | 0,0055 | 0,0049 | 1,65 | - | 0,97 | 1,92 | - |
| LAI _u JUL | 1,88 | 0,0058 | 0,0048 | 1,51 | - | 0,91 | 1,87 | - |
| LAI _u AGO | 1,67 | 0,0057 | 0,0043 | 1,35 | - | 0,78 | 1,68 | - |
| LAI _u SET | 1,62 | 0,0054 | 0,0044 | 1,29 | - | 0,80 | 1,71 | - |
| LAI _u OUT | 1,18 | 0,0036 | 0,0034 | 1,09 | - | 0,70 | 1,42 | - |
| LAI _u NOV | 1,18 | 0,0033 | 0,0031 | 1,17 | - | 0,78 | 1,31 | - |
| LAI _u DEZ | 1,59 | 0,0042 | 0,0042 | 1,52 | - | 0,91 | 1,62 | - |
| RMAX _o | - | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 | - | - | - |
| RMAX _u | 5000 | 2788 | 2788 | 5000 | - | 3000 | 5000 | - |
| RMIN _o | - | 153 | 153 | - | 125 | - | - | - |
| RMIN _u | 175 | 153 | 153 | 125 | - | 340 | 165 | - |
| MT _o | - | 0,27 | 0,20 | - | 0,19 | - | - | - |
| MT _u | - | 0,28 | 0,21 | 0,18 | - | 0,19 | 0,20 | - |
| VPD _o | - | 3663 | 3663 | - | 2128 | - | - | - |
| VPD _u | 3636 | 3663 | 3663 | 4202 | - | 4000 | 4202 | - |
| RPC _o | - | 0,63 | 0,64 | - | 0,70 | - | - | - |
| RPC _u | 0,53 | 0,00091 | 0,00093 | 0,51 | - | - | 0,53 | - |
| ALB _o JAN | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o FEV | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAR | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o ABR | - | 0,11 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAI | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o JUN | - | 0,10 | 0,11 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o JUL | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o AGO | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o SET | - | 0,10 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,15 | - |
| ALB _o OUT | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o NOV | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o DEZ | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,13 | - |
| ALB _u JAN | 0,15 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u FEV | 0,15 | 0,00016 | 0,00018 | 0,17 | - | 0,20 | 0,14 | - |
| ALB _u MAR | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u ABR | 0,14 | 0,00015 | 0,00018 | 0,15 | - | 0,16 | 0,14 | - |
| ALB _u MAI | 0,14 | 0,00013 | 0,00016 | 0,15 | - | 0,17 | 0,13 | - |
| ALB _u JUN | 0,14 | 0,00014 | 0,00016 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u JUL | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u AGO | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,15 | - | 0,18 | 0,13 | - |
| ALB _u SET | 0,15 | 0,00014 | 0,00019 | 0,18 | - | 0,21 | 0,15 | - |
| ALB _u OUT | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u NOV | 0,16 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u DEZ | 0,15 | 0,00016 | 0,00019 | 0,16 | - | 0,19 | 0,13 | - |
| RZD ₁ | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,33 | 0,25 |
| RZD ₂ | 0,80 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 1,00 | 0,33 | 0,90 |
| RZD ₃ | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,40 | 1,00 | 0,01 | 0,70 |
| RZF _{o1} | - | 0,55 | 0,58 | - | 0,58 | - | - | - |
| RZF _{o2} | - | 0,40 | 0,38 | - | 0,42 | - | - | - |
| RZF _{o3} | - | 0,04 | 0,04 | - | 0,00 | - | - | - |
| RZF _{u1} | 0,43 | 0,40 | 0,40 | 0,99 | - | 0,44 | 0,99 | - |
| RZF _{u2} | 0,57 | 0,60 | 0,60 | 0,00 | - | 0,30 | 0,00 | - |
| RZF _{u3} | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,02 | 0,00 | - |

Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

terra não foram calibrados por duas razões: primeiro porque são mais conhecidos tanto na literatura quanto em trabalhos de levantamento, segundo devido a limitações quanto

Figura 9 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas.



ao tempo de processamento do modelo que, por ser elevado, inviabiliza a adoção de um número maior de iterações no processo de calibração. Neste caso, com um número maior de parâmetros, o espaço de soluções é também maior, e seriam necessárias mais iterações para se chegar a um resultado melhor para a calibração.

Para cada parâmetro a ser calibrado, foram definidos os arquivos de entrada do calibrador. Os dados de entrada para cada parâmetro são: valor inicial, limite inferior, limite superior, incremento/decremento e o viés. Conforme pode ser visualizado na Tabela 15, os valores iniciais foram os mesmos utilizados na modelagem inicial da bacia e apresentados na Tabela 12. Pelo fato de existirem poucos estudos com relação aos limites para os demais parâmetros, os valores considerados foram os mesmos para todos os tipos de solo. O valor zero para o viés de cada parâmetro indica ao sistema de calibração que nenhuma tendência de aumento ou diminuição deverá ser considerada inicialmente.

4.4 Resultados e discussão

Os resultados do trabalho foram organizados em duas seções apresentadas na sequência. A primeira trata especificamente da interface gráfica do *software* de calibração implementado. A segunda trata da apresentação do estudo de caso considerando a bacia hidrográfica

Tabela 14 – Estações utilizadas como fonte de informações hidroclimatológicas.

| Estação | Código | Tipo |
|----------------------|---------------|---------------|
| Alegre | A617 | Meteorológica |
| Alfredo Chaves | A615 | Meteorológica |
| Atílio Vivacqua | 2041000 | Pluviométrica |
| Burarama | 2041021 | Pluviométrica |
| Castelo | 2041002 | Pluviométrica |
| Conceição de Castelo | 2041011 | Pluviométrica |
| Dores do Rio Preto | 2041014 | Pluviométrica |
| Dores do Manhumirim | 2041008 | Pluviométrica |
| Duas Barras | 2041017 | Pluviométrica |
| Faz. Monte Alegre | 2041015 | Pluviométrica |
| Faz. Vargem Alegre | 2041048 | Pluviométrica |
| Guaçu | 2041001 | Pluviométrica |
| Ibitirama | 2041016 | Pluviométrica |
| Iconha | 2050005 | Pluviométrica |
| Itaici | 2041019 | Pluviométrica |
| Iúna | 2041013 | Pluviométrica |
| Jaciguá | 2041010 | Pluviométrica |
| Mimoso | 2141015 | Pluviométrica |
| São José das Torres | 2141017 | Pluviométrica |
| São Rafael | 2040023 | Pluviométrica |
| Sta. Cruz do Caparaó | 2041017 | Pluviométrica |
| Usina Fortaleza | 2041018 | Pluviométrica |
| Usina Paineiras | 2040006 | Pluviométrica |
| Vila Nova Maravilha | 2040020 | Pluviométrica |

Tabela 15 – Parâmetros de entrada para a calibração

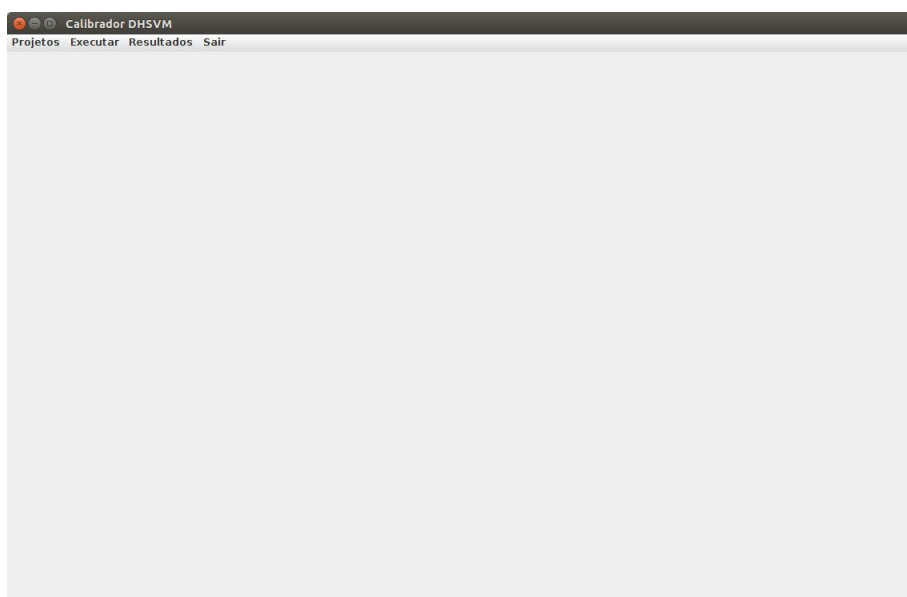
| Tipo de Solo | Parâmetro | Valor Inicial | Limite Inferior | Limite Superior | Increment./Decrem. | Viés |
|---------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------|
| Cambissolo | K_{Is} | 0,0000217 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,23 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 4,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,52 0,54 0,55 | 0,31 0,33 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |
| Latossolo | K_{Is} | 0,0000271 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,14 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,54 0,53 0,51 | 0,31 0,31 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |
| Argissolo | K_{Is} | 0,0000246 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,33 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,48 0,47 0,47 | 0,31 0,31 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |

do rio Itapemirim, em particular a vazão obtida na estação fluviométrica de Rive, localizada no município de Alegre-ES.

4.4.1 Aplicativo implementado

Ao iniciar o aplicativo de calibração implementado, é apresentada ao usuário a tela inicial do sistema, conforme Figura 10, na qual é disponibilizado um menu principal contendo as funções do sistema. São basicamente quatro operações principais: criar um novo projeto, editar um projeto, executar um projeto e visualizar os resultados de um projeto.

Figura 10 – Tela principal do aplicativo de calibração.



Ao escolher a opção criar novo projeto, o sistema apresenta a tela da Figura 11, na qual é solicitado o nome para o novo projeto, devendo este ser formado por uma única palavra sem acento ou com mais palavras sem acento e ligadas com *underline*. No campo Descrição o usuário pode digitar qualquer texto (sem formatação específica) com mais informações sobre o projeto de calibração que será executado.

Após criar um novo projeto ou abrir um projeto já existente, o sistema apresenta ao usuário a tela da Figura 12 para que sejam informados os dados das vazões observadas e também os parâmetros que serão calibrados. A inclusão e exclusão de dados são realizadas por meio dos botões Incluir e Excluir. Já a alteração de um valor é realizada por meio de um duplo *click* na célula que armazena o valor a ser alterado. As informações alteradas são sempre gravadas nos arquivos de configuração e o usuário deve ter a consciência de que os valores alterados não podem ser recuperados. Assim, torna-se importante que o usuário sempre mantenha uma cópia de segurança das pastas onde o sistema armazena os arquivos dos projetos. Em versões futuras pretende-se implementar também a funcionalidade de confirmação ou não das alterações realizadas.

Os parâmetros de calibração são informados na tela apresentada na Figura 13 e seguem

Figura 11 – Tela exibida ao selecionar a opção "Criar novo projeto de calibração". O campo "Nome do projeto" é obrigatório.

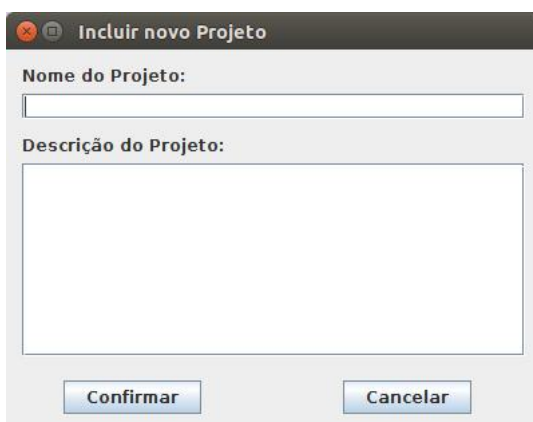
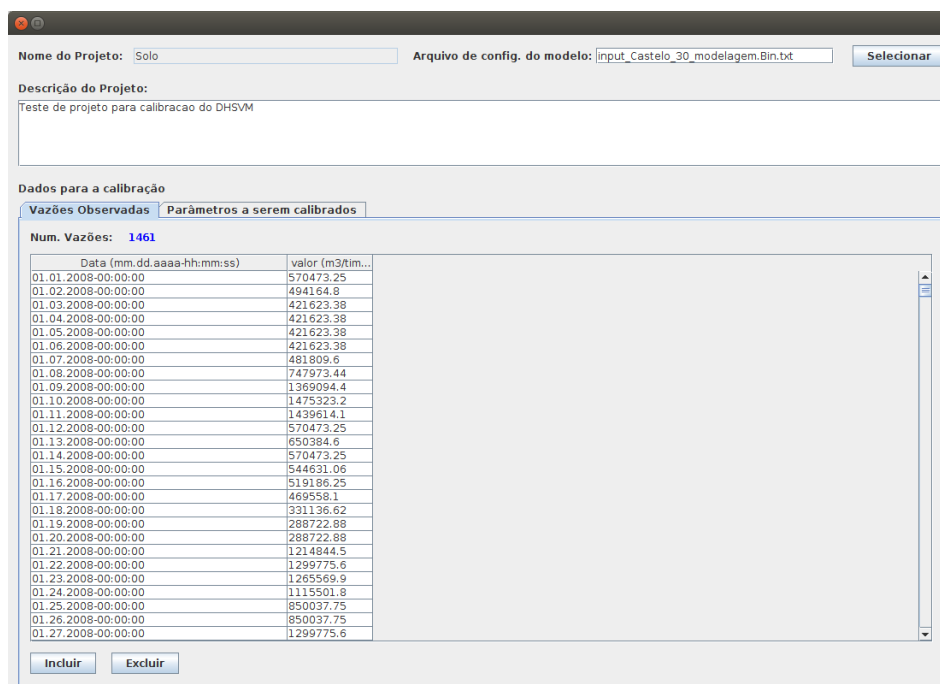


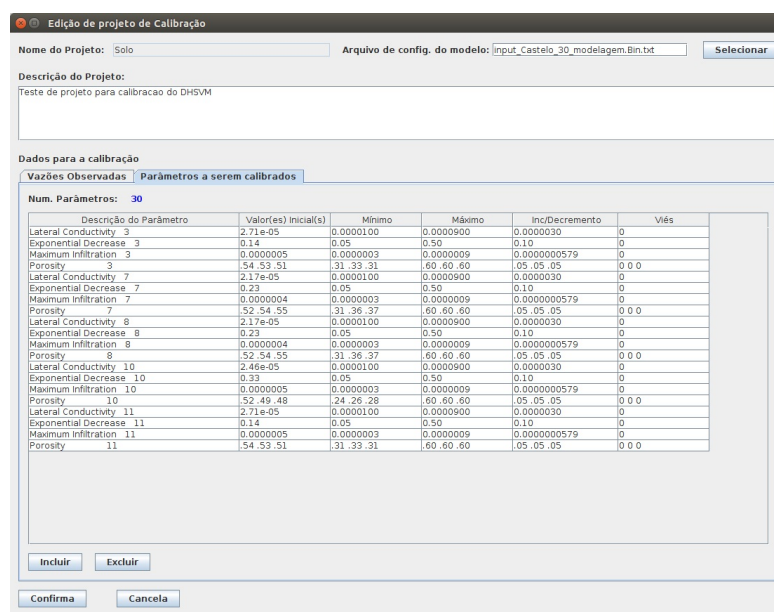
Figura 12 – Tela de edição/inclusão das vazões observadas. Os valores devem ser inseridos em ordem crescente de data.



o mesmo formato adotado no arquivo de configurações do DHSVM. Assim, para parâmetros que consideram mais de um valor, como por exemplo os que são dependentes do número de camadas do solo, os valores devem estar separados por um ou mais espaços, como pode ser visualizado na Figura 13 nos valores para o parâmetro "Porosity". Além disso, para cada parâmetro devem ser definidos os valores dos campos: Valor inicial, Mínimo, Máximo, Inc/Decremento e Viés. O valor inicial normalmente refere-se ao valor definido pelo usuário considerando dados de literatura ou de tabelas. Os valores de mínimo e máximo consistem

de valores limite que podem ser atribuídos ao parâmetro durante o processo de calibração. Inc/Decremento é o valor que é incrementado ou decrementado (randomicamente) quando um novo arquivo de configuração é gerado. O campo viés, conforme descrito na Seção 4.3.1.4, refere-se ao valor que indica se o parâmetro deve ter uma prioridade de aumento do valor original (valores positivos) ou de decréscimo do valor (valores negativos) a cada passo do processo de calibração.

Figura 13 – Tela de Cadastro dos parâmetros de calibração.



Após fornecer as vazões observadas e as informações relativas aos parâmetros a serem calibrados, o usuário pode dar início ao processo de calibração. Após escolher a opção de execução, o sistema apresenta ao usuário a tela da Figura 14 para que seja escolhido o projeto a ser executado, bem como as informações (parâmetros da heurística) que influenciam na precisão do processo e no tempo necessário para a calibração. Os valores sugeridos foram estimados em função de testes de calibração de bacias de tamanhos variados sendo que para as menores (matriz de *pixel* de aproximadamente 200x200) o tempo gasto foi de 40 horas e, para a maior bacia (matriz de 800x800) o tempo gasto foi de aproximadamente 240 horas. Os tempos também são influenciados pelo poder de processamento e o tamanho da memória do computador no qual o sistema é executado. Assim, o usuário deve ajustar o valor desses parâmetros de forma a obter um resultado satisfatório da calibração a um tempo também satisfatório.

Por fim, após finalizado o processo de calibração, o usuário pode visualizar os resultados. A Figura 15 apresenta a janela de resultados onde pode ser visualizado o gráfico comparativo entre os hidrogramas das vazões observadas e estimadas, considerando a melhor solução obtida ao final do processo de calibração. Além do gráfico, a tela apresenta também os valores estimados para cada passo de tempo considerado na modelagem.

Figura 14 – Tela de execução do aplicativo de calibração que apresenta ao usuário a lista de projetos cadastrados e os campos para preenchimento dos valores dos parâmetros de calibração.

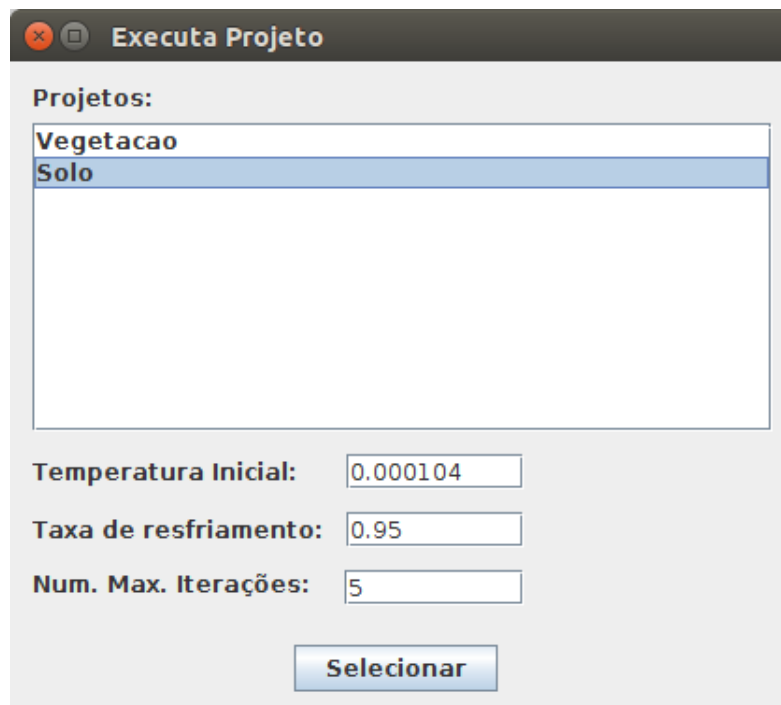


Figura 15 – Tela de resultado referente à melhor solução obtida no processo de calibração onde são apresentados os valores das estatísticas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados.

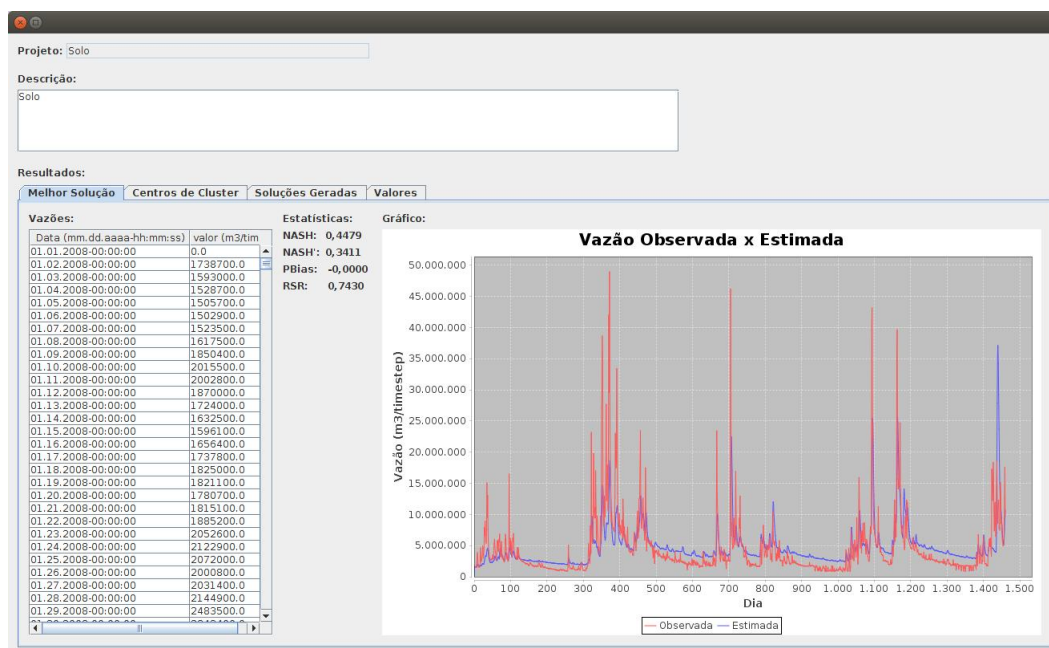
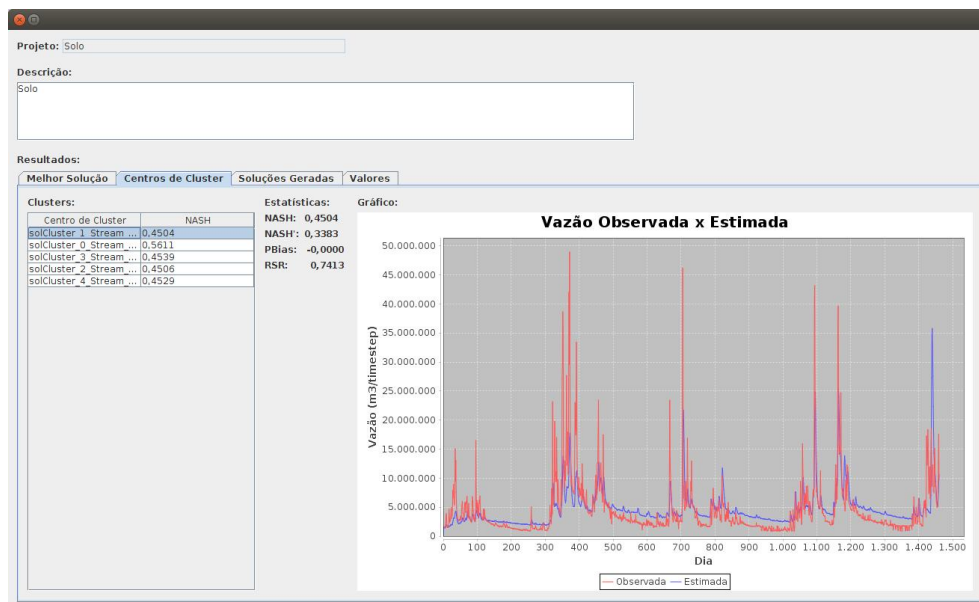


Figura 16 – Tela de resultado das soluções finais para os *clusters* obtidos no processo de calibração. São apresentados os valores das estatísticas calculadas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados.



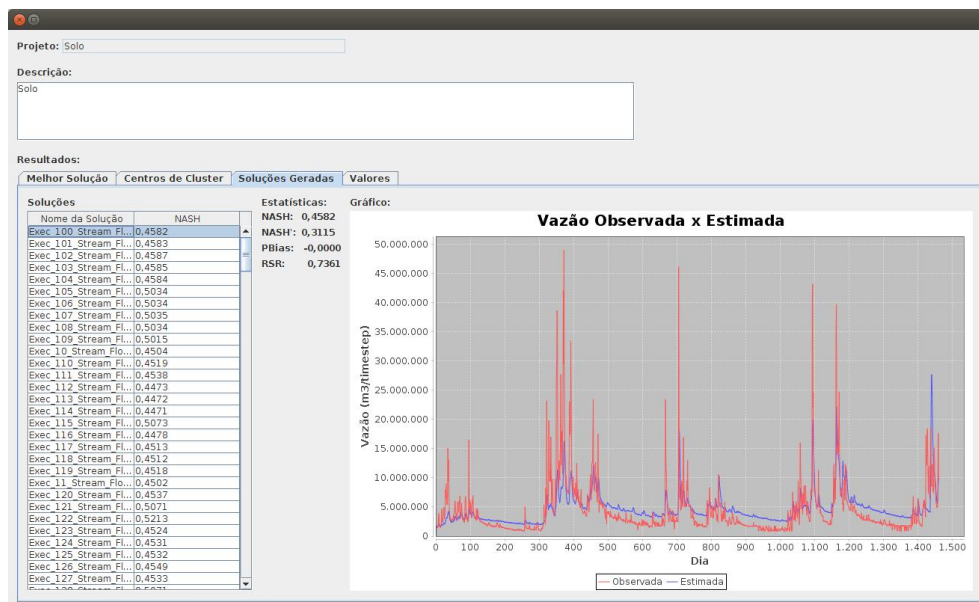
A tela de resultados do sistema também permite ao usuário verificar os resultados para cada *cluster* obtido durante o processo de calibração, conforme Figura 16. Os *clusters* são soluções (conjunto de parâmetros) que representam uma determinada região dentro do espaço global de soluções. Para visualizar o gráfico comparativo entre os hidrogramas das vazões observada e estimada para cada solução, o usuário deve escolher na lista o *cluster* desejado para o qual será exibido o respectivo gráfico.

O sistema também permite que o usuário visualize os hidrogramas de todas as soluções geradas durante o processo de calibração. Para isso basta escolher a aba “Soluções Geradas” e selecionar na lista de soluções aquela para a qual deseja visualizar o gráfico.

O DHSVM possui um conjunto mais extenso de relatórios para os quais não foram implementadas ferramentas de visualização. Em versões futuras, e de acordo com a demanda novos relatórios podem ser implementados no intuito de melhorar a visualização dos resultados do processo de calibração, bem como da modelagem em si.

Atualmente *softwares* para calibração de modelos hidrológicos não estão disponíveis em grande número. Dentre as poucas disponíveis, destaca-se o SWAT-CUP (ABBASPOUR, 2015), muito utilizado na calibração dos parâmetros do modelo SWAT (FUKUNAGA et al., 2015; ABBASPOUR et al., 2015; EDUARDO et al., 2016). O SWAT-CUP é uma ferramenta para calibração e análise de sensibilidade automáticas dos parâmetros do modelo SWAT. O sistema disponibiliza uma interface gráfica por meio da qual o usuário define e manipula um conjunto de arquivos de configurações necessárias para que a calibração e a análise de sensibilidade.

Figura 17 – Tela com os resultados de todas as soluções obtidas no processo de calibração. Para a solução selecionada são apresentados os valores das estatísticas calculadas e os hidrogramas referentes aos valores observados e estimados.



Pode-se observar que o princípio de funcionamento do SWAT-CUP é bastante semelhante à ferramenta implementada no presente trabalho. Por se tratar de uma proposta inicial, a ferramenta implementada não possui ainda flexibilidade para escolha de diferentes algoritmos de calibração bem como de diferentes tipos de funções objetivo. Também, pode ser interessante a implementação de uma ferramenta para análise de sensibilidade dos parâmetros, seguindo o mesmo princípio utilizado no SWAT-CUP. Em versões futuras, pretende-se implementar novas funcionalidades tornando a ferramenta mais flexível e robusta.

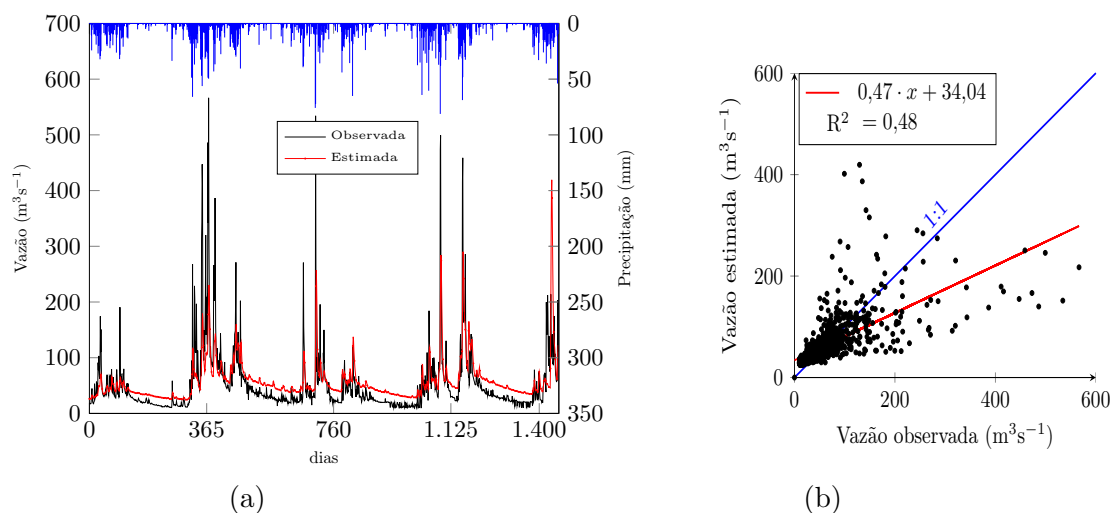
4.4.2 Estudo de caso

Para a aplicação da ferramenta de calibração, inicialmente foi realizada a modelagem da área de estudo considerando os parâmetros de solo e vegetação relacionados na metodologia. A Figura 18 apresenta os hidrogramas obtidos onde observa-se um bom ajuste entre as vazões observada e as estimadas com o modelo DHSVM, com tendência de superestimar os valores das vazões mínimas. Com relação às vazões de pico, o modelo apresenta resposta satisfatória aos eventos de precipitação com tendência a subestimar os valores, como também observado por Cuartas et al. (2012) e Thanapakpawin et al. (2007).

Também é importante ressaltar que os valores dos picos de vazão observados possuem, em si, incertezas pois, nem sempre, o valor observado corresponde ao momento exato de ocorrência do evento, uma vez que a estação fluviométrica de Rive não é automática. Também, segundo Alvarenga (2015) os valores dos picos de vazão modelados estão associados a

incertezas com relação à variabilidade espacial das propriedades do solo e da precipitação que não são considerados.

Figura 18 – Hidrogramas e gráfico de dispersão resultantes da modelagem da sub-bacia de Rive a partir dos valores iniciais dos parâmetros.



Por se tratar de uma modelagem inicial, na qual os parâmetros de solo e de uso da terra foram obtidos de estudos realizados em outras regiões, a maioria dos índices estatísticos calculados apresentam valores satisfatórios. Analisando o gráfico de dispersão da Figura 18 (b), em que o valor de R^2 é relativamente baixo, pode-se observar que o ajuste da reta de regressão é bastante afetado pelos valores referentes às vazões de pico, indicando que no processo de calibração desses valores o ajuste da reta pode ser melhorado.

Tabela 16 – Estatísticas para a modelagem inicial da sub-bacia em estudo.

| Índice estatístico | Sigla | Valor |
|---|-------|-------|
| Coefficiente de eficiência Nash-Sutcliffe | NS | 0,46 |
| Coefficiente de eficiência ajustado | NS' | 0,31 |
| Percentual de viés | PBIAS | 13,70 |

Com relação ao índice NS, Moriasi et al. (2007) afirma que valores superiores a 0,50 são considerados satisfatórios para dados mensais. No presente estudo foi considerado o mesmo limiar para dados diários por ser ainda mais rigoroso, segundo Piniewski e Okruszko (2011). Assim, o valor de $NS = 0,46$, obtido na modelagem inicial da bacia pode ser considerado bom, sendo bem próximo de 0,50. Fukunaga et al. (2015) obteve $NS = -0,38$ para a mesma bacia utilizando o modelo SWAT, considerando o intervalo de tempo compreendido entre setembro de 1996 e novembro de 2000 que, em extensão, é bem próximo do intervalo adotado no presente trabalho. Alvarenga (2015) aplicou o DHSVM para modelagem da bacia Lavrinha, localizada na região da Serra da Mantiqueira, sul de Minas Gerais. No

trabalho, após a modelagem inicial, foi realizada a calibração dos parâmetros de solo e uso da terra. Embora o valor obtido para NS (0,52) seja superior, o mesmo é bastante próximo ao valor obtido no presente trabalho sendo que, neste caso, não foram calibrados parâmetros referentes ao uso da terra.

Resultados da calibração

Na Tabela 17 são apresentados os valores iniciais, os limites e o valor obtido ao final do processo de calibração, para cada tipo de solo.

Tabela 17 – Parâmetros de entrada e valores calibrados para os parâmetros de solo referentes à bacia do rio Itapemirim.

| Tipo de Solo | Parâmetro | Valor Inicial | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Calibrado |
|--------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Cambissolo | K_{ls} | 0,0000217 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000157 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,23 | 0,05 | 0,50 | 0,13 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 4,0 | 3,0 | 9,0 | 6,32 |
| | P | 0,52 0,54 0,55 | 0,31 0,33 0,31 | 0,80 0,80 0,80 | 0,42 0,49 0,50 |
| Latossolo | K_{ls} | 0,0000271 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000211 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,14 | 0,05 | 0,50 | 0,24 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 5,58 |
| | P | 0,54 0,53 0,51 | 0,31 0,31 0,31 | 0,80 0,80 0,80 | 0,49 0,48 0,41 |
| Argissolo | K_{ls} | 0,0000246 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000216 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,33 | 0,05 | 0,50 | 0,43 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 6,16 |
| | P | 0,48 0,47 0,47 | 0,31 0,31 0,31 | 0,80 0,80 0,80 | 0,57 0,59 0,38 |

Os parâmetros selecionados para calibração do modelo possuem grande influência no regime de vazão da bacia. Por exemplo, a porosidade do solo (P), a taxa de escoamento lateral (K_{ls}) e a taxa de decaimento do escoamento lateral (EDR) influenciam nas vazões mínimas, ajustando tanto o volume de água no solo quanto a velocidade com que escoam sub-superficialmente em direção aos cursos d'água. Já a taxa máxima de infiltração (MIC), influencia no volume máximo que pode infiltrar no período de tempo, desde que o solo comporte, e também na vazão máxima por controlar o volume não infiltrado que, consequentemente, é considerado escoamento.

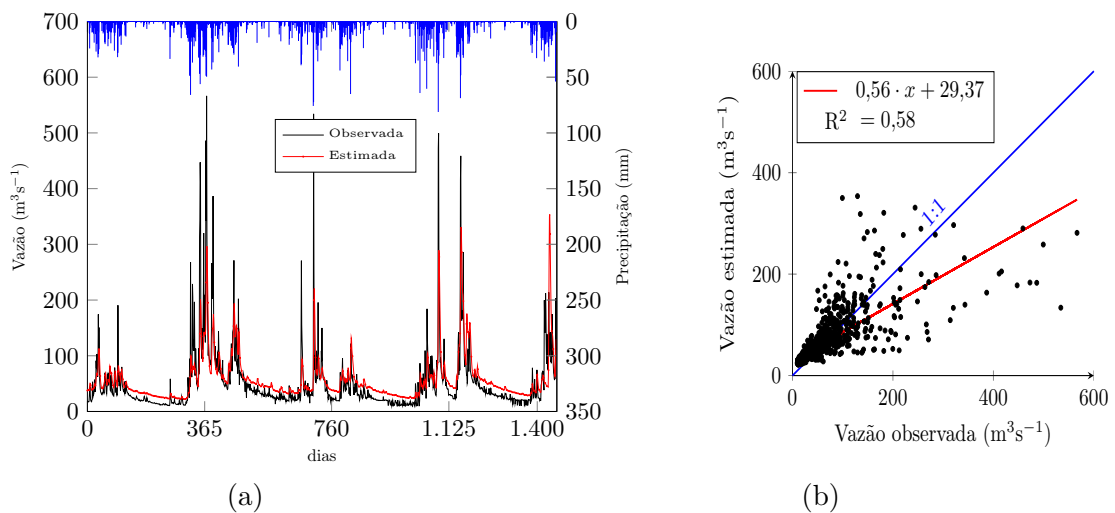
Os valores dos parâmetros, obtidos após a calibração, ficaram dentro da mesma ordem de grandeza dos valores iniciais, e também de valores obtidos por Alvarenga (2015), Thanapakpawin et al. (2007) e Cuo et al. (2006), com exceção dos valores referentes à MIC que foram bem menores. Por exemplo, Alvarenga (2015) considerou 36.288 mm/dia, Cuartas et al. (2012) 36.029 mm/dia e Cuo et al. (2006) taxas variando de 0,17 a 2.592 mm/dia. Como pode ser observado, esses valores são bastante elevados, fazendo com que o modelo considere que toda a precipitação seja infiltrada, caso o solo possua capacidade. Por outro lado, os resultados satisfatórios obtidos nesses trabalhos podem ser justificados em função de valores atribuídos a outros parâmetros do solo, que também influenciam na capacidade do solo em absorver a precipitação. Diferentemente, os valores considerados para a MIC no presente trabalho, de 46 a 48 mm/dia, são mais condizentes com a realidade.

A taxa de escoamento lateral teve seu valor decrementado para todos os tipos de solo, o que tem como resultado uma diminuição na taxa de escoamento da água armazenada e, conseqüentemente, uma diminuição no volume escoado durante o período seco. Com isso, uma vez que o reservatório do solo encontra-se com mais água, na ocorrência de uma precipitação, o volume infiltrado tende a ser menor, o que leva a um aumento do volume escoado superficialmente.

Com relação à porosidade, os solos do tipo Cambissolo e Latossolo tiveram os valores decrementados para todas as camadas e, para o solo do tipo Argissolo, os valores foram incrementados para as duas primeiras camadas. Como a porosidade influencia na capacidade de armazenamento do solo e, conseqüentemente, no volume disponível para escoamento sub-superficial lateral, não se encontra explicação plausível para tal fato pois, com maior disponibilidade no solo, a tendência seria prejudicar o ajuste do modelo, aumentando a vazão em períodos secos e não diminuindo, o que seria mais desejável, uma vez que o modelo apresentou na modelagem inicial tendência a superestimar as vazões mínimas.

Da mesma forma, a MIC, que possui relação direta com as vazões máximas modeladas, teve seus valores incrementados para todos os tipos de solo. Neste caso, embora o esperado fosse a diminuição dos valores, pode-se concluir que tal comportamento pode ter sido influenciado pelo decréscimo da porosidade do solo, levando a uma necessidade do aumento da taxa máxima de infiltração.

Figura 19 – Hidrogramas e gráfico de dispersão resultantes da calibração da sub-bacia de Rive.



Os hidrogramas apresentados na Figura 19a mostram que o processo de calibração dos parâmetros do solo melhorou o ajuste para as vazões de pico, para alguns eventos onde o valor estimado foi maior do que o valor modelado inicialmente. Já as vazões estimadas para os períodos secos, tiveram seus valores reduzidos, embora ainda sejam superestimadas em sua maioria.

A região considerada no trabalho é bastante desprovida de estudos que determinem valores consistentes para os parâmetros do DHSVM. Somente duas estações meteorológicas foram consideradas, sendo apenas uma (Rive) localizada dentro da área da bacia. Com isso, a estimativa da evapotranspiração para os diversos pontos da bacia, com diferentes tipos de uso da terra, tende a ser menos precisa. Por exemplo, como os dados meteorológicos para as estações pluviométricas foram considerados o da estação meteorológica mais próxima, as estações localizadas em regiões de maior altitude como Iúna, Dores do Rio Preto, Guaçu e Ibitirama, assumiram os mesmos valores obtidos para a estação meteorológica de Rive, localizada em uma região com altitude bem menor. Além dos dados meteorológicos, o mapa de tipos de solos da bacia é pouco detalhado, considerando os parâmetros do modelo, como por exemplo, a taxa de infiltração, que varia consideravelmente para um mesmo tipo de solo. Assim, como o mapa disponível não apresenta resolução que contemple toda a variabilidade dos parâmetros do DHSVM, a modelagem tende a ser menos consistente com a realidade da região, mesmo que os mesmos sejam calibrados. Outro ponto a considerar é a não calibração dos parâmetros referentes ao uso da terra que, por exemplo, têm influência no processo da evapotranspiração.

O gráfico de dispersão da Figura 19b mostra que o ajuste da reta obtida da regressão linear entre os valores observados e estimados é melhor que o obtido para o caso da modelagem inicial. Neste caso, o coeficiente angular da reta ajustada passa de 0,47 para 0,56, tornando-a mais próxima da reta 1:1, cujo coeficiente angular é igual a 1. O coeficiente linear variou de 34,04 para 29,37, indicando uma melhoria no ajuste.

Tabela 18 – Estatísticas para as modelagens inicial e após a calibração.

| Índice estatístico | Sigla | Valor |
|--|--------------|--------------|
| Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe | NS | 0,56 |
| Coeficiente de eficiência ajustado | NS' | 0,38 |
| Percentual de viés | PBIAS | 13,70 |

Quanto aos índices r^2 , NS e NS', houve uma melhoria com relação aos valores obtidos para a modelagem inicial da bacia. O índice NS passou de 0,46 para 0,56. Os índices R^2 e NS' passaram de 0,48 para 0,58 e de 0,31 para 0,38, respectivamente. O índice PBIAS (13,70) manteve o mesmo valor obtido para a modelagem inicial, o que, segundo Moriasi et al. (2007), pode ser considerado aceitável, por estar compreendido entre -25 e 25. Os valores dos índices NS e NS' foram piores do que os obtidos por Fukunaga et al. (2015) após a calibração do modelo SWAT para a mesma bacia, 0,76 e 0,75, respectivamente. Cabe ressaltar que Fukunaga et al. (2015) calibrou tanto os parâmetros de solo quanto os parâmetros de uso da terra, fato que pode explicar o melhor resultado obtido.

Como destacado na Seção 4.4.1, embora não apresente flexibilidade como o SWAT-CUP, ainda assim a ferramenta implementada é de grande importância, por não existirem

ferramentas disponíveis para calibração automática dos parâmetros do modelo DHSVM. Além disso, o processo de calibração manual é extremamente trabalhoso e demorado, sendo um fator desmotivador para a utilização de modelos mais complexos como o DHSVM (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). De maneira geral, com relação à ferramenta de calibração proposta, os resultados mostram a eficácia de sua utilização, mesmo para o caso apresentado, no qual apenas parâmetros de solo foram calibrados.

4.5 Conclusão

Este trabalho abordou o problema de calibração automática de modelos hidrológicos com a utilização de meta-heurísticas. Foi proposta a utilização da meta-heurística *Clustering Search* para a solução do problema de calibração do modelo DHSVM. O algoritmo do método foi implementado e, em seguida, aplicado na calibração de parâmetros do solo para uma bacia hidrográfica localizada na região sudeste do Brasil. Os resultados mostraram que a meta-heurística apresentou uma boa capacidade de calibração automática dos parâmetros, tendo melhorado o índice de Nash-Sutcliffe com relação ao obtido a partir dos parâmetros iniciais. Embora o tempo computacional seja um fator limitante, como trabalho futuro sugere-se a calibração não só dos parâmetros de solo mas também dos parâmetros relativos ao uso da terra.

A ferramenta de calibração implementada agrega um valor ainda maior ao modelo DHSVM que, na sua versão atual, não dispõe de uma ferramenta automática para calibração dos parâmetros de entrada. Com isso, o processo de modelagem, utilizando o DHSVM, pode ser mais rápido e menos trabalhoso para os pesquisadores.

Embora já totalmente funcional, ainda são necessários mais testes da ferramenta, nos quais devem ser calibrados os parâmetros de entrada para outras sub-bacias e em outras regiões. Também é interessante a implementação de outras funções objetivo, bem como, de outras heurísticas a fim de tornar a ferramenta mais flexível e adaptável para os diversos cenários e condições das áreas onde for utilizada.

5 Análise da eficiência do modelo DHSVM para conjuntos de parâmetros calibrados em diferentes sub-bacias

5.1 Resumo

Quando se pretende realizar a modelagem hidrológica de uma bacia hidrográfica, nem sempre estão disponíveis valores ideais para os parâmetros de entrada do modelo. Neste caso, o que normalmente se faz é obter valores a partir da literatura ou de outros estudos realizados em regiões com características climáticas, topográficas de solo e de vegetação semelhantes. Caso o resultado da modelagem a partir dos valores obtidos não seja satisfatório, por meio da calibração faz-se o ajuste dos mesmos. Devido à característica não linear do problema de calibração de modelos hidrológicos, podem existir múltiplas soluções para o problema o que dificulta o processo de calibração. Quando se dispõe de um algoritmo de calibração como o *clustering search* (CS) que permite obter um conjunto de soluções sub-ótimas durante o processo de calibração, pode ser interessante verificar a eficiência do modelo para outras sub-bacias a partir das soluções sub-ótimas obtidas. Nesse trabalho esta abordagem é verificada para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim. Foram modeladas e calibradas de forma automática oito sub-bacias utilizando a heurística híbrida CS onde obteve-se, para cada sub-bacia, cinco conjuntos de parâmetros de entrada. Cada sub-bacia foi modelada para cada um dos cinco conjuntos de parâmetros obtidos da calibração das demais sub-bacias. Os resultados mostram que conjuntos sub-ótimos de parâmetros calibrados para uma sub-bacia podem ser adequados para outras sub-bacias.

5.2 Introdução

Modelos hidrológicos têm sido utilizados com objetivos variados como, estimar a descarga nos cursos d'água e estudar a influência das alterações do uso da terra na disponibilidade hídrica. Para a utilização de modelos hidrológicos é necessário o levantamento de um conjunto de parâmetros de entrada, nem sempre disponíveis ou adequados para a área modelada. No Brasil e, principalmente no estado do Espírito Santo, a escassez desses dados, especialmente daqueles referentes aos solos, são ainda maiores.

Os parâmetros de entrada de um modelo hidrológico são de extrema importância pois, é a partir deles que o modelo realiza a simulação dos processos hidrológicos, produzindo como resultado o comportamento das vazões nos cursos d'água, por exemplo.

Quando os parâmetros de entrada não permitem obter bons resultados na modelagem, uma alternativa comumente utilizada é sua calibração. Nesse caso, os parâmetros são alterados e, para cada novo conjunto de entrada, o resultado da modelagem é analisado até que se obtenha um resultado satisfatório (MORADKHANI; SOROOSHIAN, 2009). A calibração pode ser realizada manualmente ou de forma automatizada. O processo manual tende a ser trabalhoso e dependente da experiência do pesquisador com relação ao modelo utilizado e também com a área estudada. Para modelos complexos, que necessitam de um grande número de parâmetros, é comum um ou mais parâmetros influenciarem um mesmo comportamento do modelo, dificultando ainda mais o processo de calibração manual. Nesse caso, o ajuste dos parâmetros torna-se complexo, pois o ajuste de um dado parâmetro pode tornar necessário um novo ajuste em um parâmetro previamente ajustado (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

Outro problema em modelagem hidrológica é a falta de informações referentes aos parâmetros de entrada do modelo utilizado. Quando não se dispõe dessas informações, é comum utilizar dados de literatura ou de outros estudos realizados para regiões que possuam características climáticas, topográficas, de solo e de vegetação semelhantes. No entanto, por mais que haja semelhança, nem sempre os dados obtidos levam a resultados satisfatórios ao final da modelagem, tornando mais necessário ainda processos eficientes de calibração dos parâmetros de entrada do modelo.

Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, a cada dia torna-se mais viável a utilização de ferramentas computacionais para a calibração de modelos hidrológicos. O desenvolvimento de um calibrador automático requer a definição de uma função objetivo, que pode ser baseada em um ou mais critérios de avaliação da eficiência do modelo e, também, de um algoritmo que permita gerar conjuntos de parâmetros de entrada a partir dos quais o modelo é executado e, ao final, a função objetivo é novamente calculada para avaliar se houve melhoria na eficiência do modelo. Para a geração de novos conjuntos de parâmetros de entrada, técnicas estatísticas e heurísticas têm sido empregadas na construção de algoritmos e ferramentas de calibração (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999).

Entretanto, mesmo o processo de calibração automática pode levar a resultados não satisfatórios. Por exemplo, valores obtidos para parâmetros de entrada podem não ser conceitualmente consistentes. Outro problema se refere ao fato de que um calibrador pode ser eficiente para um dado modelo ou um dado conjunto de entrada de dados mas, quando se aplica o mesmo para outros modelos ou dados de entrada, os resultados obtidos podem não ser satisfatórios (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). Esses problemas decorrem do fato de que os modelos hidrológicos são essencialmente problemas não lineares, o que,

em geral, à existência de múltiplas soluções ótimas (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992) em cada espaço de soluções.

Por esses motivos, os parâmetros obtidos ao final do processo de calibração podem não permitir obter bons resultados na modelagem da bacia estudada para períodos que compreendam intervalos fora do intervalo utilizado na calibração. Dessa forma, é importante utilizar técnicas de calibração e de validação que minimizem esses problemas (ARSENAULT et al., 2013).

Em particular, o modelo DHSVM não dispõe de um conjunto de ferramentas para calibração automática. No Capítulo 4 é proposta uma ferramenta de calibração para o modelo baseada na meta-heurística *Clustering Search* (CS), que possui como característica a geração de um conjunto de soluções sub-ótimas, uma para cada centro de *cluster*. Um dos *clusters* obtidos, possui em seu centro, a melhor solução obtida durante o processo de calibração e, os demais, as outras soluções sub-ótimas geradas.

Em uma bacia hidrográfica onde se dispõe de séries de dados consistentes para mais de uma estação fluviométrica presentes dentro de sua área de drenagem, pode ser interessante realizar a calibração para cada estação fluviométrica e, a partir dos melhores conjuntos de parâmetros obtidos para cada estação (sub-bacia), verificar a eficiência de cada conjunto na modelagem das demais sub-bacias. Diante disso, este trabalho tem como objetivo verificar a eficiência da simulação hidrológica de bacias a partir da transferência de mais de um conjunto de parâmetros calibrados para diferentes sub-bacias.

5.3 Material e Métodos

Na elaboração deste trabalho, foi implementada uma ferramenta para, a partir dos conjuntos de parâmetros obtidos da calibração das sub-bacias, verificar a eficiência de cada uma para as demais sub-bacias. A ferramenta de validação foi implementada utilizando a linguagem C em ambiente Linux. Para execução da ferramenta, é necessário apenas o parâmetro referente ao tamanho da série de dados utilizada na modelagem e calibração da bacia. A ferramenta faz a leitura de todos os arquivos de configuração do modelo, localizados na pasta “configfiles” e, para cada arquivo, executa o modelo DHSVM. Ao final do processo é gerado como saída um *log* contendo as estatísticas e, para cada execução, são guardadas cópias dos dois principais arquivos de saída do modelo, “*massbalance*” e “*streamflow*”. A ferramenta implementada foi aplicada em um estudo de caso para a bacia do rio Itapemirim (BHRI) e suas sub-bacias. A seguir são apresentados os passos e os dados utilizados para a elaboração deste trabalho.

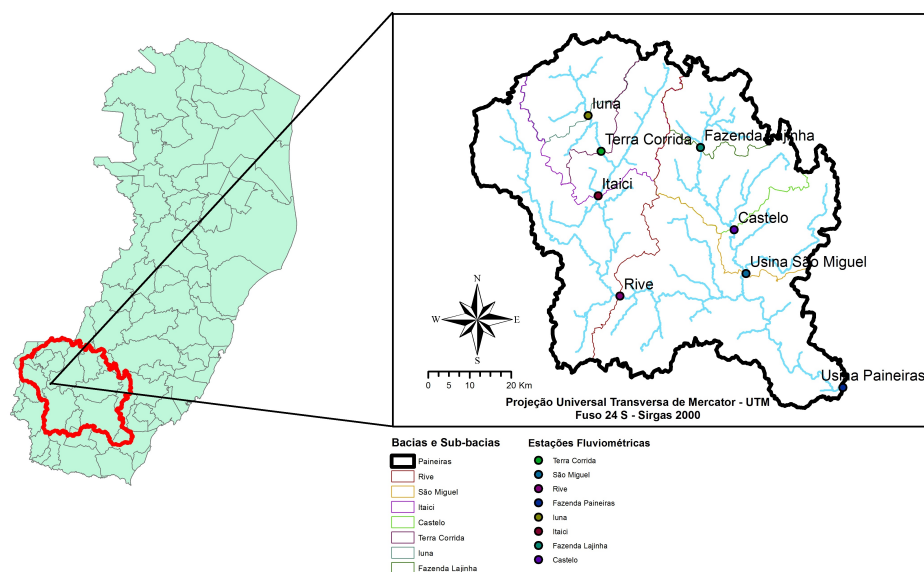
5.3.1 Caracterização da área em estudo

A área em estudo foi a bacia do rio Itapemirim, considerando as seguintes sub-bacias: Castelo, Fazenda Lajinha, Itaiçi, Iúna, Rive, Terra Corrida, Usina Paineiras e Usina

São Miguel, conforme Figura 20. A bacia do rio Itapemirim abastece 17 municípios localizados ao sul do estado do Espírito Santo e um município de Minas Gerais. Segundo dados extraídos do último Censo do IBGE, realizado em 2010, a população residente nos municípios capixabas desta bacia é de 491.228 habitantes, o que representa 13,97% da população do Espírito Santo. Os municípios Capixabas atendidos pelos cursos d'água da bacia são: Alegre, Atílio Vivácqua, Castelo, Conceição de Castelo, Cachoeiro de Itapemirim, Itapemirim, Iúna, Irupi, Ibatiba, Jerônimo Monteiro, Marataízes, Muqui, Muniz Freire, Presidente Kennedy, Vargem Alta, Venda Nova do Imigrante e Ibitirama. Está situada entre os meridianos 40°48' e 41°52' de Longitude Oeste, entre os paralelos 20°10' e 21°15' de Latitude Sul e possui área de drenagem de cerca de 6.014 km². A topografia é acidentada com ocorrência de serras de maiores elevações nas proximidades do contorno oeste, onde situa-se a Serra do Caparaó. Segundo Beckers, Smerdon e Wilson (2009) e Surfleet, Skaugset e McDonnell (2010), o fato do terreno ser montanhoso é condição adequada para a utilização do modelo DHSVM. Os recursos hídricos da bacia possuem como destinos principais o abastecimento urbano e rural, o consumo industrial e agroindustrial, dessedentação animal, irrigação, manutenção de biodiversidade fluvial, recreação e lazer, diluição de efluentes e mineração.

A Figura 20 apresenta a localização da bacia do rio Itapemirim, as estações fluviométricas e as sub-bacias. As informações referentes à localização, altitude e área de contribuição estão apresentadas na Tabela 19.

Figura 20 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Itapemirim, das sub-bacias e das estações fluviométricas.

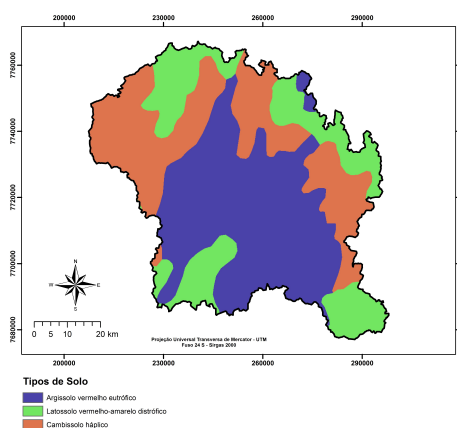


Os dados de solo foram obtidos do Novo Mapa de Solos do Brasil na escala 1:5.000.000, atualizado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 2006 (SANTOS et

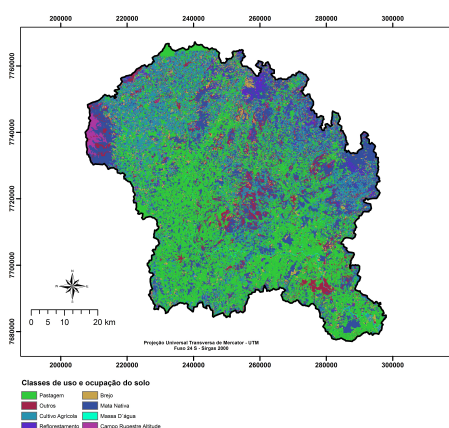
Tabela 19 – Dados de localização geográfica, altitude e área de drenagem referentes às estações fluviométricas situadas na área em estudo.

| Estação | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Área de drenagem (km ²) |
|------------------|----------|-----------|--------------|-------------------------------------|
| Fazenda Lajinha | -20°25' | -41°16' | 400 | 436 |
| Iúna | -20°21' | -41°31' | 640 | 432 |
| Terra Corrida | -20°25' | -41°30' | 380 | 587 |
| Castelo | -20°36' | -41°11' | 107 | 975 |
| Itaici | -20°31' | -41°30' | 380 | 1045 |
| Usina São Miguel | -20°42' | -41°10' | 200 | 1459 |
| Rive | -20°44' | -41°27' | 128 | 2218 |
| Usina Paineiras | -20°57' | -40°57' | 40 | 5168 |

Figura 21 – Mapas de classes de tipos de solo e de tipos de Uso da terra referentes à bacia do rio Itapemirim.



(a) Classes de Solo



(b) Classes de Uso e Ocupação do Solo

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2014).

al., 2011; EMBRAPA, 2014). Na área há a predominância dos solos do tipo Latossolo, Cambissolo e Argissolo, conforme pode ser visto na Figura 21a.

O mapa de uso da terra foi obtido junto ao do Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo - IEMA. Esse mapa foi produzido a partir de fotointerpretação de imagens obtidas por meio de aerolevantamento realizado em todo o estado, nos anos de 2007 e 2008. No quadrante relativo à área em estudo, foram classificados um total de 22 classes de uso da terra, as quais foram reagrupadas em 8 classes, como pode ser observado no mapa da Figura 21b.

Atualmente no Brasil, e principalmente no estado do Espírito Santo, existem poucos estudos recentes sobre os tipos de solos, principalmente com informações dos parâmetros necessários ao modelo DHSVM. Assim, para a obtenção dos parâmetros de solo foram realizados levantamentos das informações em trabalhos já publicados referentes a estudos

utilizando o modelo DHSVM em outras regiões do Brasil (OLIVEIRA, 2014; KRUK et al., 2009). Oliveira (2014) realizou a modelagem da bacia do rio Jucu, localizada em região próxima à área em estudo deste trabalho. Por ser uma área próxima e de características de solo, topografia, clima e de uso da terra relativamente semelhantes, optou-se por tomar como base os mesmos parâmetros de solo. Também foram consultados outros trabalhos realizados no Brasil, nos quais verificou-se que os valores dos parâmetros apresentavam, em sua grande maioria, valores de mesma magnitude. Também foi verificado que o valor adotado para a taxa máxima de infiltração, utilizada nos trabalhos pesquisados, estava super-estimado, sendo então realizado o ajuste nos valores tendo como base valores de referência encontrados na literatura. Outro ajuste considerado foi a utilização de valores *default*, definidos no arquivo de configuração de exemplo do modelo, para os parâmetros não definidos para a bacia do Rio Jucu. A Tabela 20 apresenta os parâmetros de entrada para as três classes de solo presentes na bacia.

Tabela 20 – Parâmetros do modelo DHSVM referentes aos tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

| Parametro | Classes de Solo | | |
|-------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
| | Cambissolo | Latossolo | Argissolo |
| K_{ls} ($\times 10^{-5}$) (m/s) | 2,17 | 2,71 | 2,46 |
| EDR | 0,23 | 0,14 | 0,33 |
| DTS | 0,50 | 0,50 | 0,50 |
| MIC ($\times 10^{-7}$) (m/s) | 4,00 | 5,00 | 5,00 |
| CD | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| ALB _S (m/s) | 0,16 | 0,17 | 0,19 |
| NSL | 3 | 3 | 3 |
| | 0,52 | 0,54 | 0,48 |
| P | 0,54 | 0,53 | 0,47 |
| | 0,55 | 0,51 | 0,47 |
| | 0,46 | 0,35 | 0,46 |
| PSD | 0,49 | 0,38 | 0,43 |
| | 0,49 | 0,35 | 0,40 |
| | 0,53 | 1,01 | 0,63 |
| h_b | 0,40 | 0,62 | 0,35 |
| | 0,37 | 0,63 | 0,45 |
| | 0,31 | 0,31 | 0,25 |
| F_c | 0,36 | 0,33 | 0,33 |
| | 0,37 | 0,31 | 0,32 |
| | 0,25 | 0,23 | 0,19 |
| w_p | 0,30 | 0,25 | 0,27 |
| | 0,31 | 0,21 | 0,25 |
| | 1227 | 1133 | 1293 |
| BD | 1211 | 1210 | 1332 |
| | 1199 | 1275 | 1361 |
| | 2,80 | 3,20 | 2,90 |
| k_{vs} ($\times 10^{-5}$) | 1,50 | 1,99 | 1,07 |
| | 1,38 | 2,32 | 1,40 |
| | 7,114 | 7,114 | 7,114 |
| TCon | 6,923 | 6,923 | 6,923 |
| | 6,923 | 7,000 | 6,923 |
| | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| Tcap ($\times 10^6$) | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| | 1,40 | 1,40 | 1,40 |

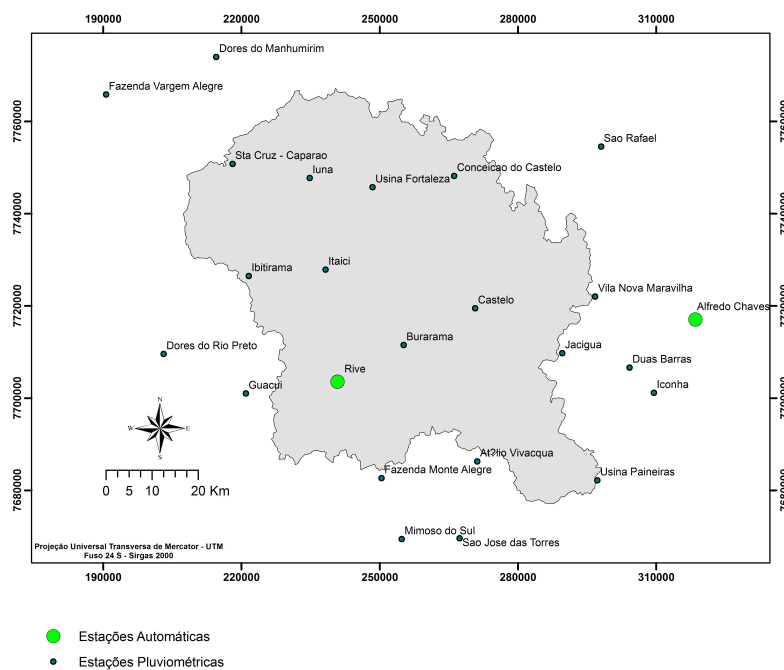
Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

Como o objetivo do trabalho foi o de calibrar e verificar os parâmetros de solo, os parâmetros relativos aos tipos de uso da terra utilizados foram exatamente os mesmos utilizados na modelagem da bacia do rio Jucu. Na Tabela 21 são apresentados os valores

dos parâmetros de uso da terra utilizados na modelagem inicial da bacia principal e das sub-bacias.

As informações meteorológicas, necessárias para a modelagem, foram obtidas de estações automáticas e convencionais localizadas, tanto internamente na bacia, quanto nas proximidades do contorno da mesma, conforme o mapa apresentado na Figura 22. As estações Alfredo Chaves e Rive fazem parte do Sistema de Informação Meteorológica Automática de Superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As demais são estações pluviométricas pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas (ANA). A opção por utilizar estações com dados apenas de precipitação deveu-se ao fato de existir apenas uma estação automática na bacia. Nesse caso, mesmo utilizando estações automáticas no entorno da bacia, a espacialização da precipitação, que é realizada durante a execução do modelo, não representaria bem a realidade da precipitação na área em estudo.

Figura 22 – Localização das estações meteorológicas e pluviométricas.



Para as estações pluviométricas da ANA, as quais possuem apenas dados de precipitação, optou-se por considerar os demais dados meteorológicos para estas estações como sendo os mesmos da estação automática mais próxima. A escolha da estação automática mais próxima foi realizada utilizando a metodologia dos Polígonos de Thiessen, em que a estação automática escolhida como fonte de dados foi a que se encontrava no mesmo polígono que a estação pluviométrica.

Tabela 21 – Parâmetros do modelo DHSVM referentes ao uso e ocupação do solo presentes na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.

| Parâmetro | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FI | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 |
| OVER | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | FALSE | FALSE | FALSE |
| UNDER | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE | TRUE | TRUE | FALSE |
| FC _o | - | 0,84 | 0,61 | - | 0,44 | - | - | - |
| TSPace | - | 0,50 | 0,60 | - | 0,70 | - | - | - |
| COEFA | - | 2,50 | 2,50 | - | 2,50 | - | - | - |
| COEFR | - | 0,70 | 0,70 | - | 0,50 | - | - | - |
| MSIC | - | 0,03 | 0,03 | - | 0,03 | - | - | - |
| SIEff | - | 0,60 | 0,60 | - | 0,60 | - | - | - |
| MRRatio | - | 0,40 | 0,40 | - | 0,40 | - | - | - |
| h _o | - | 6,33 | 20,00 | - | 22,00 | - | - | - |
| h _u | 2,70 | 0,91 | 2,59 | 0,21 | - | - | - | - |
| LAI _o JAN | - | 3,18 | 2,94 | - | 3,84 | - | - | - |
| LAI _o FEV | - | 3,26 | 3,13 | - | 4,14 | - | - | - |
| LAI _o MAR | - | 3,04 | 3,12 | - | 3,86 | - | - | - |
| LAI _o ABR | - | 4,00 | 3,60 | - | 4,51 | - | - | - |
| LAI _o MAI | - | 3,64 | 3,54 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o JUN | - | 3,84 | 3,43 | - | 4,39 | - | - | - |
| LAI _o JUL | - | 4,04 | 3,33 | - | 4,37 | - | - | - |
| LAI _o AGO | - | 3,98 | 2,98 | - | 3,97 | - | - | - |
| LAI _o SET | - | 3,75 | 3,06 | - | 3,88 | - | - | - |
| LAI _o OUT | - | 2,47 | 2,38 | - | 2,73 | - | - | - |
| LAI _o NOV | - | 2,31 | 2,17 | - | 2,61 | - | - | - |
| LAI _o DEZ | - | 2,91 | 2,92 | - | 3,32 | - | - | - |
| LAI _u JAN | 1,69 | 0,0046 | 0,0042 | 1,59 | - | 0,96 | 1,67 | - |
| LAI _u FEV | 1,69 | 0,0047 | 0,0045 | 1,51 | - | 0,96 | 1,95 | - |
| LAI _u MAR | 1,67 | 0,0044 | 0,0045 | 1,56 | - | 1,01 | 1,78 | - |
| LAI _u ABR | 2,03 | 0,0058 | 0,0052 | 1,78 | - | 1,09 | 2,01 | - |
| LAI _u MAI | 2,10 | 0,0053 | 0,0051 | 1,83 | - | 1,08 | 2,01 | - |
| LAI _u JUN | 1,97 | 0,0055 | 0,0049 | 1,65 | - | 0,97 | 1,92 | - |
| LAI _u JUL | 1,88 | 0,0058 | 0,0048 | 1,51 | - | 0,91 | 1,87 | - |
| LAI _u AGO | 1,67 | 0,0057 | 0,0043 | 1,35 | - | 0,78 | 1,68 | - |
| LAI _u SET | 1,62 | 0,0054 | 0,0044 | 1,29 | - | 0,80 | 1,71 | - |
| LAI _u OUT | 1,18 | 0,0036 | 0,0034 | 1,09 | - | 0,70 | 1,42 | - |
| LAI _u NOV | 1,18 | 0,0033 | 0,0031 | 1,17 | - | 0,78 | 1,31 | - |
| LAI _u DEZ | 1,59 | 0,0042 | 0,0042 | 1,52 | - | 0,91 | 1,62 | - |
| RMAX _o | - | 5000 | 5000 | - | 5000 | - | - | - |
| RMAX _u | 5000 | 2788 | 2788 | 5000 | - | 3000 | 5000 | - |
| RMIN _o | - | 153 | 153 | - | 125 | - | - | - |
| RMIN _u | 175 | 153 | 153 | 125 | - | 340 | 165 | - |
| MT _o | - | 0,27 | 0,20 | - | 0,19 | - | - | - |
| MT _u | - | 0,28 | 0,21 | 0,18 | - | 0,19 | 0,20 | - |
| VPD _o | - | 3663 | 3663 | - | 2128 | - | - | - |
| VPD _u | 3636 | 3663 | 3663 | 4202 | - | 4000 | 4202 | - |
| RPC _o | - | 0,63 | 0,64 | - | 0,70 | - | - | - |
| RPC _u | 0,53 | 0,00091 | 0,00093 | 0,51 | - | - | 0,53 | - |
| ALB _o JAN | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o FEV | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAR | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o ABR | - | 0,11 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o MAI | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o JUN | - | 0,10 | 0,11 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o JUL | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o AGO | - | 0,09 | 0,11 | - | 0,12 | - | 0,13 | - |
| ALB _o SET | - | 0,10 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,15 | - |
| ALB _o OUT | - | 0,10 | 0,12 | - | 0,12 | - | 0,14 | - |
| ALB _o NOV | - | 0,11 | 0,14 | - | 0,13 | - | 0,14 | - |
| ALB _o DEZ | - | 0,11 | 0,13 | - | 0,13 | - | 0,13 | - |
| ALB _u JAN | 0,15 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u FEV | 0,15 | 0,00016 | 0,00018 | 0,17 | - | 0,20 | 0,14 | - |
| ALB _u MAR | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u ABR | 0,14 | 0,00015 | 0,00018 | 0,15 | - | 0,16 | 0,14 | - |
| ALB _u MAI | 0,14 | 0,00013 | 0,00016 | 0,15 | - | 0,17 | 0,13 | - |
| ALB _u JUN | 0,14 | 0,00014 | 0,00016 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u JUL | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u AGO | 0,14 | 0,00014 | 0,00017 | 0,15 | - | 0,18 | 0,13 | - |
| ALB _u SET | 0,15 | 0,00014 | 0,00019 | 0,18 | - | 0,21 | 0,15 | - |
| ALB _u OUT | 0,14 | 0,00015 | 0,00017 | 0,16 | - | 0,18 | 0,14 | - |
| ALB _u NOV | 0,16 | 0,00016 | 0,00020 | 0,17 | - | 0,21 | 0,14 | - |
| ALB _u DEZ | 0,15 | 0,00016 | 0,00019 | 0,16 | - | 0,19 | 0,13 | - |
| RZD ₁ | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,33 | 0,25 |
| RZD ₂ | 0,80 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,60 | 1,00 | 0,33 | 0,90 |
| RZD ₃ | 0,60 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,40 | 1,00 | 0,01 | 0,70 |
| RZF _{o1} | - | 0,55 | 0,58 | - | 0,58 | - | - | - |
| RZF _{o2} | - | 0,40 | 0,38 | - | 0,42 | - | - | - |
| RZF _{o3} | - | 0,04 | 0,04 | - | 0,00 | - | - | - |
| RZF _{u1} | 0,43 | 0,40 | 0,40 | 0,99 | - | 0,44 | 0,99 | - |
| RZF _{u2} | 0,57 | 0,60 | 0,60 | 0,00 | - | 0,30 | 0,00 | - |
| RZF _{u3} | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | 0,02 | 0,00 | - |

Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

5.3.2 Calibração das sub-bacias

Cada uma das 8 sub-bacias foi modelada e, em seguida, calibrada utilizando a ferramenta de calibração apresentada no Capítulo 4. Os parâmetros calibrados foram os apresentados na Tabela 22, e o calibrador foi programado para considerar 5 *clusters*, de forma que, ao final do processo de calibração, fossem obtidas as cinco melhores soluções (conjuntos de parâmetros do modelo DHSVM) para cada sub-bacia, totalizando 40 arquivos.

Tabela 22 – Parâmetros de entrada para a calibração. Foram considerados três parâmetros: taxa de escoamento lateral do solo saturado K_{ls} , taxa de decaimento da K_{ls} , taxa máxima de infiltração e a porosidade do solo.

| Tipo de Solo | Parâmetro | Valor Inicial | Límite Inferior | Límite Superior | Increment./Decrem. | Viés |
|--------------|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-------|
| Cambissolo | K_{ls} | 0,0000217 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,23 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 4,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,52 0,54 0,55 | 0,31 0,33 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |
| Latossolo | K_{ls} | 0,0000271 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,14 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,54 0,53 0,51 | 0,31 0,31 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |
| Argissolo | K_{ls} | 0,0000246 | 0,0000100 | 0,0000900 | 0,0000030 | 0 |
| | EDR ($\times 10^{-5}$) | 0,33 | 0,05 | 0,50 | 0,10 | 0 |
| | MIC ($\times 10^{-7}$) | 5,0 | 3,0 | 9,0 | 0,579 | 0 |
| | P | 0,48 0,47 0,47 | 0,31 0,31 0,31 | 0,60 0,60 0,60 | 0,05 0,05 0,05 | 0 0 0 |

O processo de calibração, implementado na ferramenta, tem como objetivo maximizar o valor do índice de Nash-Sutcliffe (NS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), Equação 5.1, e também calcula os índices de Nash-Sutcliffe modificado e o PBIAS para cada solução gerada durante o processo de calibração. Ao final, é gerado um *log* com os índices estatísticos obtidos para as soluções e, também, os arquivos de configuração (parâmetros de entrada do modelo).

$$NS = 1 - \frac{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_1^n (Q_i^{obs} - Q_{média}^{obs})^2} \quad (5.1)$$

5.3.3 Combinação dos sub-ótimos calibrados para as sub-bacias

O processo de combinação das soluções obtidas com a calibração foi executado para cada sub-bacia. Os arquivos de configuração do modelo, obtidos para cada centro de *cluster* das demais bacias, foram adaptados para a bacia processada com relação a: informações de localização, centroide e quantidade de *pixels* da área. Foram obtidos 35 arquivos de configuração para cada sub-bacia, sendo esses os arquivos de entrada para o programa de combinação. Após a execução do programa, o arquivo de saída contendo as estatísticas calculadas para cada arquivo de configuração foram tabuladas e organizadas em ordem decrescente pelo índice NS. A melhor solução obtida (maior índice) foi denominada “Combinada” e então comparada com as soluções calibradas para cada sub-bacia.

5.4 Resultados e Discussão

5.4.1 Resultados da calibração dos parâmetros

Nas Tabelas de 23 a 30 tem-se os resultados pertinentes à calibração de cada uma das sub-bacias da BHRI. Nestas são apresentados os valores dos parâmetros calibrados e respectivos NS da estimativa das vazões. Conforme relatado no item anterior, as tabelas citadas apresentam, para cada sub-bacia, os cinco conjuntos de parâmetros (*clusters*) que resultaram nos maiores valores de NS.

Os valores dos parâmetros ficaram dentro da mesma ordem de grandeza dos valores iniciais. A condutividade hidráulica lateral (K_{ls}) média foi igual a $5,14 \cdot 10^{-5}$ m/s, valor próximo a $4,12 \cdot 10^{-5}$ m/s, obtido por Thanapakpawin et al. (2007) utilizando o modelo DHSVM para o estudo dos efeitos de mudanças no uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Mae Chaem na Tailândia. A taxa de decaimento média da condutividade hidráulica (EDR) foi de 0,33, valor igualmente obtido por Cuartas et al. (2012) em estudo utilizando o modelo DHSVM em uma bacia na região amazônica. O valor de EDR ficou, também, dentro da mesma ordem de grandeza do valor obtido por Thanapakpawin et al. (2007) que foi de 0,50. Com relação à porosidade (P), o valor médio obtido, 0,48 também foi próximo do valor obtido por Thanapakpawin et al. (2007) que foi de 0,50, para o mesmo estudo. O valor médio da taxa máxima de infiltração (MIC), 52 mm/dia, foi consideravelmente menor do que os valores obtidos em outros trabalhos. Por exemplo, Alvarenga (2015) considerou 36.288 mm/dia para os três tipos de solo da bacia, Cuartas et al. (2012) considerou 36.029 mm/dia e Cuo et al. (2006) taxas variando de 0,17 a 2.592 mm/dia. No entanto, os resultados finais encontrados nesses trabalhos foram condizentes com o esperado em função das características do modelo DHSVM no qual, por exemplo, a porosidade e a profundidade do solo também influenciam no comportamento hidrológico. Nesse caso, mesmo para taxas de infiltração elevadas, uma profundidade menor considerada pode diminuir a capacidade máxima de armazenamento do solo, levando a um menor volume infiltrado e, conseqüentemente, um maior escoamento superficial.

Ainda com relação aos parâmetros calibrados, de maneira geral, observa-se que os valores obtidos ao final do processo, para os *clusters* de cada sub-bacia, foram sempre próximos, não apresentando tendência clara quando se compara, para cada tipo de solo, a solução do pior com o melhor *cluster*. Os parâmetros que apresentaram maior variação foram a MIC e a porosidade do solo. Para esses parâmetros, de maneira geral, observa-se tendência contrária na variação dos mesmos, ou seja, quando a MIC teve seu valor aumentado a porosidade foi reduzida, da mesma forma que, para aumentos na porosidade a MIC foi reduzida. Esse comportamento também se explica em função de ambos influenciarem no armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, nos escoamentos superficial e subterrâneo.

Com relação à eficiência da modelagem, a análise das Tabelas 23 a 30 mostra, de

maneira geral, que os valores NS obtidos para os *clusters* de cada uma das sub-bacias apresentaram apenas pequenas diferenças. Estes variaram entre 0,37 e 0,43 para a sub-bacia Castelo, na qual verificou-se mais baixo desempenho (Tabela 23) e entre 0,57 e 0,61 para a sub-bacia Paineiras, na qual evidenciou-se o melhor desempenho (Tabela 27). A existência de diferenças tão pequenas no NS confirma as características não lineares do problema de calibração na área em estudo, indicando, dessa forma, que o problema de calibração tem mais de uma solução viável. Tal fato corrobora o anteriormente destacado por outros trabalhos com modelos hidrológicos (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). Ademais, a metodologia aqui proposta, de ajustar mais de um conjunto de parâmetros calibrados (*cluster*) pode ter o potencial de transferência de um ou mais destes *clusters* para sub-bacias similares, próximas, à jusante ou à montante da bacia calibrada, fato que é testado na sequência do trabalho.

Ainda com relação às pequenas diferenças nos NS dos *clusters* de cada sub-bacia, observa-se que em alguns destes, como para a sub-bacia Rive (Tabela 28), os valores dos parâmetros calibrados (RIV2 a RIV5) são extremamente próximos e resultam, nesse caso, em NS idênticos. Tal fato tem origem no próprio método de calibração: o sistema de calibração explorou no espaço de busca valores de parâmetros apenas nas proximidades de um ótimo local, para o qual o NS é aceitável, embora haja um *cluster* com melhor desempenho (RIV1). Em outras situações, como em Paineiras (Tabela 27), a solução ótima encontra-se próxima às obtidas para os *clusters* e na mesma região do espaço de busca. Em ambos os casos, como o número de soluções aleatórias geradas e verificadas no processo não foi o ideal, por conta do custo computacional do modelo DHSVM e, como os resultados para o índice NS obtidos ficaram próximos do valor mínimo considerado por Moriasi et al. (2007) como aceitável, provavelmente a meta-heurística CS implementada explorou de forma inadequada outras regiões promissoras do espaço de busca, não permitindo, portanto, que soluções melhores fossem obtidas. Todavia, para a maior parte dos *clusters* das sub-bacias, percebe-se, pela diferença nos valores calibrados dos parâmetros, que vários “ótimos” locais foram encontrados, tornando todas as soluções viáveis. Como exemplo desse comportamento tem-se a sub-bacia Itaici (Tabela 25).

Considera-se importante ilustrar outra tendência ocorrida, com relação aos dois conjuntos das bacias (e suas sub-bacias) principais da área em estudo: a primeira, formada pela bacia Rive (incluindo as sub-bacias Itaici, Terra Corrida, Iúna e Usina Fortaleza), e a segunda formada pela bacia Usina São Miguel (incluindo as sub-bacias Castelo e Fazenda Laginha). Os resultados calibrados mostram que o conjunto que engloba Rive apresentou melhores ajustes na calibração, com NS variando entre 0,38 e 0,56, em relação ao conjunto Usina São Miguel, no qual NS variou entre 0,37 e 0,46.

Finalmente, ainda de maneira geral, percebe-se certa tendência e melhores eficiências de calibração (maiores NS) para sub-bacias com maior área de drenagem, como Rive (NS = 0,56) e Paineiras (NS = 0,61). Iúna, que tem a menor área de drenagem, obteve o pior

Tabela 23 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Castelo.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| CAS 1 | 0,43 | K _{ls} | 4,81e-05 | 6,01e-05 | 2,11e-05 |
| | | EDR | 0,24 | 0,14 | 0,44 |
| | | MIC | 4,42e-07 | 3,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,59 0,58 0,41 | 0,54 0,58 0,46 | 0,59 0,53 0,46 |
| CAS 2 | 0,41 | K _{ls} | 4,81e-05 | 6,01e-05 | 2,11e-05 |
| | | EDR | 0,24 | 0,34 | 0,44 |
| | | MIC | 4,42e-07 | 3,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,59 0,58 0,41 | 0,59 0,53 0,56 | 0,49 0,53 0,56 |
| CAS 3 | 0,37 | K _{ls} | 4,21e-05 | 4,51e-05 | 2,11e-05 |
| | | EDR | 0,24 | 0,14 | 0,24 |
| | | MIC | 3,84e-07 | 3,42e-07 | 3,42e-07 |
| | | P | 0,59 0,48 0,46 | 0,59 0,53 0,56 | 0,59 0,58 0,51 |
| CAS 4 | 0,43 | K _{ls} | 4,81e-05 | 6,01e-05 | 2,11e-05 |
| | | EDR | 0,24 | 0,24 | 0,44 |
| | | MIC | 4,42e-07 | 3,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,59 0,53 0,41 | 0,59 0,58 0,46 | 0,59 0,53 0,46 |
| CAS 5 | 0,38 | K _{ls} | 4,21e-05 | 4,81e-05 | 1,81e-05 |
| | | EDR | 0,24 | 0,14 | 0,24 |
| | | MIC | 3,84e-07 | 3,42e-07 | 3,42e-07 |
| | | P | 0,59 0,48 0,46 | 0,59 0,53 0,56 | 0,59 0,58 0,51 |

Tabela 24 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Fazenda Lajinha.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| FLA 1 | 0,45 | K _{ls} | 3,01e-05 | 3,91e-05 | 8,41e-05 |
| | | EDR | 0,44 | 0,44 | 0,14 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 4,00e-07 | 8,05e-07 |
| | | P | 0,34 0,43 0,46 | 0,49 0,58 0,56 | 0,59 0,58 0,56 |
| FLA 2 | 0,44 | K _{ls} | 3,01e-05 | 3,91e-05 | 7,81e-05 |
| | | EDR | 0,44 | 0,44 | 0,14 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 4,00e-07 | 8,05e-07 |
| | | P | 0,34 0,48 0,46 | 0,49 0,58 0,56 | 0,54 0,58 0,56 |
| FLA 3 | 0,39 | K _{ls} | 2,71e-05 | 3,01e-05 | 5,41e-05 |
| | | EDR | 0,44 | 0,44 | 0,14 |
| | | MIC | 6,16e-07 | 4,00e-07 | 5,74e-07 |
| | | P | 0,49 0,53 0,51 | 0,54 0,58 0,56 | 0,59 0,53 0,56 |
| FLA 4 | 0,43 | K _{ls} | 3,01e-05 | 3,91e-05 | 7,51e-05 |
| | | EDR | 0,44 | 0,44 | 0,14 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 4,00e-07 | 7,47e-07 |
| | | P | 0,34 0,48 0,51 | 0,49 0,58 0,56 | 0,54 0,58 0,56 |
| FLA 5 | 0,46 | K _{ls} | 3,01e-05 | 3,31e-05 | 5,71e-05 |
| | | EDR | 0,44 | 0,44 | 0,14 |
| | | MIC | 6,74e-07 | 4,00e-07 | 8,05e-07 |
| | | P | 0,44 0,53 0,46 | 0,54 0,53 0,56 | 0,59 0,53 0,46 |

resultado (NS = 0,49). A mesma tendência de melhores calibrações para bacias maiores foi evidenciada por Fukunaga (2012) na mesma BHRI e por Neto et al. (2014) e Eduardo et al. (2016), em bacias do Sul de Minas Gerais, todos utilizando o modelo hidrológico SWAT. De modo semelhante, Piniewski e Okruszko (2011) investigou, utilizando o modelo SWAT, a influência da área de drenagem com relação à calibração e validação de 12 sub-bacias com áreas variando entre 355 e 1.657 km², localizadas no noroeste da Polônia. No trabalho foram calibradas 11 outras sub-bacias de áreas de drenagem maiores, sendo os parâmetros calibrados então validados nas sub-bacias menores. Os resultados mostraram que o modelo obteve melhores resultados em bacias maiores e que, para a área em estudo, o uso do

Tabela 25 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Itaiçi.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| ITA 1 | 0,49 | K _{ls} | 2,76e-05 | 5,11e-05 | 1,57e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,43 |
| | | MIC | 6,74e-07 | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | 0,52 0,59 0,48 | 0,59 0,48 0,56 | 0,52 0,54 0,55 |
| ITA 2 | 0,44 | K _{ls} | 3,36e-05 | 5,11e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,33 | 0,14 | 0,43 |
| | | MIC | 7,90e-07 | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | 0,47 0,54 0,48 | 0,59 0,48 0,56 | 0,52 0,59 0,60 |
| ITA 3 | 0,45 | K _{ls} | 3,06e-05 | 5,11e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,33 | 0,14 | 0,43 |
| | | MIC | 7,32e-07 | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,43 | 0,59 0,48 0,56 | 0,52 0,59 0,60 |
| ITA 4 | 0,46 | K _{ls} | 3,06e-05 | 5,11e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,33 | 0,14 | 0,43 |
| | | MIC | 7,32e-07 | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,43 | 0,59 0,48 0,56 | 0,52 0,54 0,60 |
| ITA 5 | 0,51 | K _{ls} | 3,66e-05 | 5,41e-05 | 1,87e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,24 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | 0,57 0,54 0,38 | 0,54 0,53 0,56 | 0,52 0,59 0,55 |

Tabela 26 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia de Iúna.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------|----------------|----------------|
| IUN 1 | 0,41 | K _{ls} | | 5,11e-05 | 4,57e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,58 0,46 | 0,47 0,59 0,60 |
| IUN 2 | 0,39 | K _{ls} | | 4,81e-05 | 4,87e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,33 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,54 0,58 0,46 | 0,42 0,59 0,60 |
| IUN 3 | 0,38 | K _{ls} | | 4,81e-05 | 4,57e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,23 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,58 0,46 | 0,42 0,59 0,60 |
| IUN 4 | 0,38 | K _{ls} | | 4,81e-05 | 4,27e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,23 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,58 0,46 | 0,42 0,59 0,60 |
| IUN 5 | 0,49 | K _{ls} | | 3,91e-05 | 4,27e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,58 0,56 | 0,47 0,54 0,45 |

modelo não é aconselhado em sub-bacias de área de contribuição menores que 600 km².

Esse resultado, em parte, pode ser consequência da modelagem do escoamento no qual os fluxos superficial e subterrâneo se deslocam um *pixel* por passo de tempo, o que tem influência direta no tempo de deslocamento da água na sub-bacia. Nesse caso, como o tamanho do *pixel* foi o mesmo para todas as sub-bacias, o tempo de deslocamento da água nas sub-bacias menores foi pior modelado do que para as sub-bacias de áreas de drenagem maiores, implicando em uma pior estimativa do escoamento total em sua foz.

Ademais, tal comportamento também pode ter explicação no fato de terem sido consideradas apenas duas estações meteorológicas. Nesse caso, os parâmetros meteorológicos

Tabela 27 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Paineiras.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| PAI 1 | 0,57 | K _{ls} | 3,06e-05 | 3,31e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,13 | 0,14 | 0,33 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 5,58e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,48 | 0,54 0,53 0,56 | 0,52 0,59 0,55 |
| PAI 2 | 0,58 | K _{ls} | 2,46e-05 | 2,71e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,23 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 4,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,49 0,48 | 0,54 0,53 0,51 | 0,52 0,54 0,55 |
| PAI 3 | 0,58 | K _{ls} | 2,76e-05 | 2,71e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,23 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 4,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,49 0,48 | 0,54 0,53 0,51 | 0,52 0,54 0,55 |
| PAI 4 | 0,59 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,01e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,23 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 4,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,43 | 0,54 0,53 0,51 | 0,52 0,54 0,50 |
| PAI 5 | 0,61 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,01e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,23 | 0,24 | 0,33 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 4,42e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,43 | 0,54 0,53 0,56 | 0,52 0,54 0,50 |

Tabela 28 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Rive.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| RIV 1 | 0,56 | K _{ls} | 2,16e-05 | 2,11e-05 | 1,57e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,13 |
| | | MIC | 6,16e-07 | 5,58e-07 | 6,32e-07 |
| | | P | 0,57 0,59 0,38 | 0,54 0,58 0,51 | 0,57 0,49 0,50 |
| RIV 2 | 0,45 | K _{ls} | 2,46e-05 | 2,71e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 5,00e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,53 | 0,59 0,53 0,56 | 0,52 0,54 0,55 |
| RIV 3 | 0,45 | K _{ls} | 2,46e-05 | 2,71e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,00e-07 | 5,0e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,53 | 0,59 0,53 0,56 | 0,52 0,54 0,55 |
| RIV 4 | 0,45 | K _{ls} | 2,46e-05 | 2,41e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,58e-07 | 5,00e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,53 | 0,59 0,53 0,51 | 0,52 0,54 0,55 |
| RIV 5 | 0,45 | K _{ls} | 2,76e-05 | 2,41e-05 | 2,17e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,14 | 0,23 |
| | | MIC | 5,58e-07 | 5,00e-07 | 4,58e-07 |
| | | P | 0,52 0,54 0,53 | 0,59 0,53 0,51 | 0,52 0,49 0,55 |

que influenciam nos processos, como a evapotranspiração, não foram corretamente espacializados, o que pode ter influenciado mais negativamente nas sub-bacias de cabeceira, que possuem menor área de drenagem. Por outro lado, Qi e Grunwald (2005) reporta que, para esses casos, sub e super-estimções para sub-bacias a montante podem levar a uma vazão média mais próxima da real na sub-bacia a jusante. De forma semelhante, Neto et al. (2014) destaca que em bacias de maior área há tendência de amortização da resposta dos fenômenos hidrológicos que estão associados à própria dinâmica da água no solo. Nas bacias de menor área as respostas aos fenômenos são mais rápidas, implicando em uma dinâmica maior para a vazão, fato que pode explicar o pior desempenho do modelo em

Tabela 29 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia São Miguel.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| USM 1 | 0,40 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,66e-05 | 3,37e-05 |
| | | EDR | 0,33 | 0,43 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,63e-07 | 4,00e-07 |
| | | P | 0,57 0,54 0,58 | 0,37 0,39 0,48 | 0,52 0,49 0,50 |
| USM 2 | 0,42 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,66e-05 | 3,67e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,33 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,63e-07 | 4,00e-07 |
| | | P | 0,57 0,54 0,58 | 0,37 0,39 0,48 | 0,52 0,49 0,50 |
| USM 3 | 0,46 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,36e-05 | 3,37e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,63e-07 | 4,00e-07 |
| | | P | 0,57 0,54 0,58 | 0,37 0,39 0,48 | 0,52 0,49 0,50 |
| USM 4 | 0,39 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,66e-05 | 3,07e-05 |
| | | EDR | 0,33 | 0,43 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,63e-07 | 4,00e-07 |
| | | P | 0,57 0,54 0,58 | 0,37 0,39 0,48 | 0,52 0,49 0,50 |
| USM 5 | 0,42 | K _{ls} | 2,76e-05 | 3,96e-05 | 3,37e-05 |
| | | EDR | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| | | MIC | 8,47e-07 | 8,63e-07 | 4,00e-07 |
| | | P | 0,57 0,59 0,58 | 0,37 0,39 0,48 | 0,52 0,49 0,50 |

Tabela 30 – Parâmetros e índice NS para os cinco *clusters* obtidos como resultado da calibração para a sub-bacia Terra Corrida.

| <i>Cluster</i> | Índice NS | Parâm. | Argisolo | Latosolo | Cambisolo |
|----------------|-----------|-----------------|----------|----------------|----------------|
| TCO 1 | 0,54 | K _{ls} | | 8,71e-05 | 3,36e-05 |
| | | EDR | | 0,44 | 0,33 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,48 0,56 | 0,58 0,57 0,42 |
| TCO 2 | 0,53 | K _{ls} | | 8,71e-05 | 4,26e-05 |
| | | EDR | | 0,24 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,54 0,58 0,56 | 0,58 0,57 0,42 |
| TCO 3 | 0,50 | K _{ls} | | 8,71e-05 | 3,96e-05 |
| | | EDR | | 0,34 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,54 0,48 0,56 | 0,58 0,57 0,47 |
| TCO 4 | 0,54 | K _{ls} | | 8,71e-05 | 3,36e-05 |
| | | EDR | | 0,44 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,54 0,53 0,56 | 0,58 0,57 0,42 |
| TCO 5 | 0,54 | K _{ls} | | 8,71e-05 | 3,36e-05 |
| | | EDR | | 0,44 | 0,43 |
| | | MIC | | 8,47e-07 | 8,63e-07 |
| | | P | | 0,59 0,48 0,56 | 0,58 0,57 0,42 |

sub-bacias menores.

5.4.2 Resultados da combinação dos parâmetros

Na Tabela 31 tem-se os resultados pertinentes à troca dos *clusters* de calibração entre as sub-bacias. Ou seja, tem-se os valores de NS resultantes da troca de todos os parâmetros de calibração de todas as sub-bacias entre si. Nessa tabela, os *clusters*/valores marcados na cor verde apresentam NS superior à melhor calibração para a sub-bacia. Já aqueles marcados em amarelo apresentam desempenho variando entre os valores máximos e mínimos encontrados anteriormente (Tabelas 23 a 30, conforme a sub-bacia). Finalmente,

os *clusters*/valores em vermelhos apresentaram NS inferiores àquele referente ao *cluster* de pior NS na calibração, para a sub-bacia em questão.

Pode-se observar que os NS pertinentes aos *clusters* trocados, de maneira geral, apresentam pouca variação em relação aos NS dos *clusters* calibrados para cada sub-bacia. Na troca houve melhoria dos NS para as sub-bacias de Castelo (0,43 para 0,48), Itaici (0,51 para 0,56), Usina São Miguel (0,46 para 0,48) e Paineiras (0,61 para 0,67). Para a sub-bacia de Rive os valores foram exatamente os mesmos. Os valores foram piores para as sub-bacias de Iúna (0,49 para 0,48), Fazenda Lajinha (0,46 para 0,39) e Terra Corrida (0,54 para 0,52), entretanto, dentro da faixa de variação obtida nos *clusters* de calibração destas sub-bacias. Observa-se, também, que os valores calibrados para sub-bacias do mesmo conjunto levaram a bons resultados quando aplicados a outras sub-bacias do mesmo conjunto. Por exemplo Itaici, que pertence ao conjunto de Rive, obteve melhor resultado para o conjunto de parâmetros calibrados para Terra Corrida, onde o NS variou de 0,51 para 0,56, conforme pode ser visualizado na Tabela 30. Da mesma forma, por exemplo, a sub-bacia Castelo obteve melhor resultado para o conjunto de parâmetros calibrados para Fazenda Lajinha, com NS variando de 0,43 para 0,48.

Os resultados mostram, ainda, que para sub-bacias com menor área de drenagem e de cabeceira (IUN e FLA), as combinações a partir de dados de sub-bacias a jusante não propiciaram melhora na modelagem, com destaque para a sub-bacia Fazenda Lajinha, que apresentou piora ligeiramente maior. A mesma tendência foi encontrada na calibração do modelo SWAT, em Minas Gerais, por Eduardo et al. (2016): aplicação dos parâmetros de calibração de bacias maiores tendem a apresentar menor eficiência em pequenas bacias de montante. Todavia, a eficiência aqui encontrada foi maior que aquela apresentada no referido trabalho, sendo similar à própria calibração das sub-bacias de cabeceira.

Os resultados obtidos com a combinação dos parâmetros calibrados, de forma análoga ao que já foi mencionado na Seção 5.4.1, indicam a tendência de que os parâmetros calibrados para sub-bacias com menor área de drenagem levam a resultados satisfatórios para sub-bacias de áreas maiores. Uma explicação para esse comportamento pode estar ligada ao tipo de escoamento adotado, em que a lâmina sob a superfície do solo escoou um *pixel* por passo de tempo, influenciando no tempo de deslocamento do escoamento. Assim, como o tempo de deslocamento depende do tamanho do *pixel*, o valor adotado nas simulações pode estar mais adequado às sub-bacias maiores. Neto et al. (2014) destaca que em bacias de menor área as respostas aos fenômenos são mais rápidas, implicando em uma dinâmica maior para a vazão, fato que pode explicar o pior desempenho do modelo.

Tabela 31 – *Cluster* e respectivos coeficientes de Nash-Sutcliffe (entre parêntesis) pertinentes à aplicação de cada *cluster* de calibração nas outras sub-bacias.

| Clusters (n° de ordem)* | Sub-Bacias | | | | | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | IUN – 432 | FLA – 435 | TCO – 586 | CAS – 975 | ITA – 1045 | USM – 1458 | RIV – 2218 | PAI – 5167 |
| 1 | TCO4 (0,48) | USM4 (0,39) | IUN5 (0,52) | FLA5 (0,48) | TCO1 (0,56) | FLA3 (0,48) | TCO5 (0,56) | RIV1 (0,67) |
| 2 | TCO1 (0,48) | USM3 (0,38) | ITA1 (0,47) | FLA1 (0,45) | TCO5 (0,56) | FLA5 (0,47) | TCO1 (0,56) | TCO2 (0,65) |
| 3 | TCO5 (0,48) | USM0 (0,38) | ITA5 (0,45) | FLA2 (0,45) | TCO4 (0,56) | FLA1 (0,46) | TCO4 (0,56) | TCO1 (0,65) |
| 4 | ITA1 (0,44) | USM5 (0,38) | ITA4 (0,43) | FLA3 (0,45) | TCO2 (0,56) | FLA2 (0,46) | TCO2 (0,56) | TCO4 (0,65) |
| 5 | ITA5 (0,43) | USM1 (0,38) | ITA3 (0,43) | FLA4 (0,42) | IUN5 (0,53) | FLA4 (0,44) | IUN5 (0,55) | TCO5 (0,65) |
| 6 | TCO3 (0,43) | CAS1 (0,31) | ITA2 (0,43) | ITA5 (0,42) | TCO3 (0,50) | PAI5 (0,41) | ITA5 (0,54) | ITA5 (0,64) |
| 7 | ITA2 (0,42) | CAS4 (0,31) | RIV1 (0,42) | USM3 (0,42) | RIV1 (0,49) | CAS4 (0,41) | TCO3 (0,54) | IUN5 (0,64) |
| 8 | ITA3 (0,42) | PAI1 (0,29) | IUN1 (0,42) | RIV1 (0,41) | IUN1 (0,43) | CAS1 (0,41) | ITA1 (0,51) | FLA5 (0,64) |
| 9 | ITA4 (0,42) | ITA5 (0,28) | IUN2 (0,41) | PAI1 (0,40) | IUN2 (0,42) | CAS2 (0,41) | FLA1 (0,49) | TCO3 (0,63) |
| 10 | TCO2 (0,41) | CAS2 (0,25) | IUN4 (0,41) | PAI5 (0,40) | IUN4 (0,42) | ITA4 (0,40) | ITA4 (0,49) | FLA3 (0,63) |
| 11 | RIV1 (0,32) | PAI3 (0,24) | IUN3 (0,41) | USM5 (0,40) | IUN3 (0,42) | RIV1 (0,39) | FLA5 (0,49) | FLA1 (0,62) |
| 12 | PAI1 (0,23) | PAI4 (0,24) | PAI1 (0,33) | USM2 (0,40) | FLA1 (0,42) | PAI4 (0,38) | ITA3 (0,49) | FLA2 (0,62) |
| 13 | RIV4 (0,17) | CAS3 (0,23) | PAI4 (0,33) | PAI4 (0,39) | FLA5 (0,42) | PAI3 (0,38) | FLA2 (0,49) | ITA1 (0,62) |
| 14 | RIV5 (0,17) | PAI4 (0,23) | RIV5 (0,32) | USM1 (0,39) | FLA2 (0,42) | PAI1 (0,38) | PAI5 (0,48) | ITA4 (0,61) |
| 15 | RIV2 (0,17) | RIV1 (0,23) | RIV4 (0,32) | USM4 (0,39) | FLA4 (0,40) | ITA4 (0,36) | IUN1 (0,47) | ITA3 (0,61) |
| 16 | RIV3 (0,17) | CAS5 (0,23) | CAS4 (0,31) | ITA3 (0,38) | PAI4 (0,39) | ITA3 (0,36) | PAI3 (0,47) | IUN1 (0,61) |
| 17 | CAS2 (0,14) | PAI2 (0,21) | CAS2 (0,31) | PAI3 (0,38) | PAI5 (0,39) | CAS5 (0,36) | FLA4 (0,47) | IUN2 (0,60) |
| 18 | FLA2 (0,14) | RIV4 (0,20) | CAS1 (0,31) | ITA4 (0,38) | PAI1 (0,38) | ITA2 (0,36) | FLA3 (0,47) | IUN3 (0,60) |
| 19 | FLA3 (0,14) | ITA2 (0,20) | CAS3 (0,31) | ITA2 (0,37) | FLA3 (0,38) | ITA1 (0,35) | IUN2 (0,46) | IUN4 (0,60) |
| 20 | CAS4 (0,14) | RIV3 (0,20) | FLA1 (0,31) | ITA1 (0,37) | CAS4 (0,38) | CAS3 (0,35) | ITA2 (0,46) | FLA4 (0,58) |
| 21 | CAS5 (0,14) | ITA4 (0,20) | FLA2 (0,31) | PAI2 (0,36) | CAS1 (0,38) | PAI2 (0,34) | IUN4 (0,46) | ITA2 (0,58) |
| 22 | CAS1 (0,14) | ITA3 (0,20) | FLA3 (0,31) | TCO3 (0,35) | CAS2 (0,37) | RIV4 (0,33) | IUN3 (0,46) | RIV4 (0,57) |
| 23 | CAS3 (0,14) | ITA1 (0,20) | FLA4 (0,31) | IUN4 (0,35) | USM3 (0,37) | RIV5 (0,33) | PAI2 (0,45) | RIV5 (0,57) |
| 24 | FLA5 (0,14) | TCO5 (0,20) | CAS5 (0,31) | TCO1 (0,35) | USM2 (0,37) | TCO1 (0,32) | PAI1 (0,45) | RIV3 (0,57) |
| 25 | FLA4 (0,14) | TCO1 (0,20) | FLA5 (0,31) | TCO4 (0,35) | USM5 (0,37) | IUN2 (0,32) | CAS1 (0,45) | RIV2 (0,57) |
| 26 | FLA1 (0,14) | TCO4 (0,20) | USM4 (0,30) | IUN3 (0,35) | USM4 (0,37) | TCO5 (0,32) | CAS4 (0,45) | USM3 (0,57) |
| 27 | USM5 (0,14) | IUN5 (0,20) | USM3 (0,30) | IUN2 (0,35) | USM1 (0,37) | IUN4 (0,32) | PAI3 (0,45) | CAS5 (0,57) |
| 28 | USM1 (0,14) | IUN2 (0,20) | USM5 (0,30) | IUN1 (0,35) | RIV4 (0,36) | TCO4 (0,32) | CAS2 (0,44) | CAS3 (0,57) |
| 29 | USM2 (0,14) | TCO2 (0,20) | USM1 (0,30) | TCO2 (0,35) | RIV5 (0,36) | TCO2 (0,32) | CAS3 (0,44) | CAS2 (0,56) |
| 30 | USM4 (0,14) | RIV2 (0,20) | USM2 (0,30) | TCO5 (0,35) | PAI2 (0,36) | IUN1 (0,32) | CAS5 (0,44) | CAS1 (0,56) |
| 31 | USM3 (0,14) | TCO3 (0,20) | RIV2 (0,30) | IUN5 (0,35) | PAI3 (0,35) | TCO3 (0,32) | USM2 (0,44) | CAS4 (0,56) |
| 32 | PAI4 (0,12) | IUN1 (0,20) | RIV3 (0,30) | IUN4 (0,35) | RIV3 (0,35) | IUN3 (0,32) | USM3 (0,44) | USM2 (0,56) |
| 33 | PAI3 (0,10) | IUN4 (0,20) | PAI3 (0,30) | RIV5 (0,34) | RIV2 (0,35) | IUN5 (0,32) | USM5 (0,44) | USM5 (0,55) |
| 34 | PAI2 (0,10) | IUN3 (0,20) | PAI2 (0,30) | RIV3 (0,34) | CAS5 (0,34) | RIV3 (0,32) | USM1 (0,43) | USM1 (0,54) |
| 35 | PAI5 (0,09) | RIV4 (0,18) | PAI5 (0,29) | RIV2 (0,34) | CAS3 (0,34) | RIV2 (0,32) | USM4 (0,43) | USM4 (0,54) |

* organizados individualmente do melhor desempenho (maior NS) para o pior desempenho (menor NS).

Pode-se observar a existência de uma relação entre o tamanho da sub-bacia e a “posição” relativa da sub-bacia que proporcionou o *cluster* cuja aplicação levou a um melhor resultado na modelagem. Ainda que, nem sempre com resultados da troca melhores do que os calibrados, as vazões das sub-bacias de menor área de drenagem (inferior a 450 km²), IUN e FLA, foram melhor modeladas pelos *clusters* de sub-bacias imediatamente à jusante, como não poderia deixar de ser, uma vez que estas são bacias de cabeceira. Sub-bacias de área intermediária (entre 450 e 1050 km²) tiveram suas vazões melhor simuladas pelos *clusters* pertinentes à sub-bacia imediatamente, à montante. Finalmente, nas bacias de maior área (superior a 1400 km²), o melhor *cluster* veio de uma bacia mais à montante. Esses resultados indicam a mesma tendência evidenciada por Eduardo et al. (2016), de que os dados calibrados para sub-bacias à montante sejam viáveis para sub-bacias a jusante, com melhores desempenhos para as bacias de maior tamanho.

Duas maiores bacias compõem as redes de drenagem principal da BHRI: a primeira formada pelo conjunto das sub-bacias USM, CAS e FLA (de jusante para montante), e a segunda formada por RIV, ITA, TCO e IUN (também de jusante para montante). Verificando-se o desempenho da troca de *clusters* para cada uma destas, observa-se claramente dois fatos interessantes: a) existe uma redução do NS no sentido da maior bacia para a menor bacia; b) os melhores *clusters* vieram de uma sub-bacia constituinte do próprio conjunto.

Os resultados obtidos com a combinação de soluções sub-ótimas, calibradas para diferentes sub-bacias, são satisfatórios, uma vez que a metade dos valores de NS obtidos para as combinações ficaram entre o valor mínimo e o máximo calibrados para cada sub-bacia. Comportamento semelhante foi também encontrado por Campanharo (2013) na modelagem de três sub-bacias, denominadas STAMA, JUCUM e JUCUE, utilizando o modelo *Variable Infiltration Capacity* (VIC). Os resultados calibrados para as três sub-bacias foram aplicados para cada sub-bacia, sendo satisfatórios os resultados obtidos para a sub-bacia STAMA.

5.5 Conclusão

Neste trabalho foi testada uma metodologia para utilização dos resultados da calibração do modelo DHSVM obtidos a partir da utilização do calibrador apresentado no Capítulo 4. Foram calibradas 8 sub-bacias situadas dentro da bacia do rio Itapemirim obtendo, ao final, 5 conjuntos de parâmetros para cada sub-bacia. Na sequência, cada sub-bacia foi modelada utilizando os parâmetros das demais sub-bacias, no intuito de verificar se os parâmetros obtidos na calibração de outras sub-bacias pudessem promover melhores resultados nas modelagens. Os resultados obtidos indicam que a metodologia pode ser eficaz quando se dispõe de outras estações fluviométricas no interior da bacia modelada. Do total das 8 sub-bacias modeladas e calibradas, quatro apresentaram melhores resultados

da modelagem a partir de parâmetros calibrados para outras sub-bacias. Um resultado também interessante foi o fato de que, os parâmetros calibrados das sub-bacias com menor área de drenagem foram satisfatórios para sub-bacias de maior área de drenagem.

O fato de o calibrador produzir como resultado um conjunto de soluções calibradas para as sub-bacias mostrou-se um fato inovador no processo de calibração de sub-bacias. Outros métodos, como os apresentados por Piniewski e Okruszko (2011) e Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016), consideram apenas os conjuntos de parâmetros calibrados para as sub-bacias. Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que a abordagem adotada pode ser eficiente na calibração bem como na extrapolação dos parâmetros do modelo DHSVM para regiões que não dispõem de informações acerca dos parâmetros do modelo. Cabe ressaltar que são importantes novos estudos de aplicação da abordagem aqui estudada afim de confirmar e/ou aprimorar o conceito.

6 Conclusão final

O tema abordado neste trabalho foi a calibração de modelos hidrológicos, em especial o modelo DHSVM, que não dispõe de ferramenta para calibração automática dos seus parâmetros. Os objetivos principais foram implementar a meta-heurística *Clustering Search* para solução do problema de calibração e, em função de suas características com a geração de soluções sub-ótimas, testar se soluções calibradas para outras sub-bacia não seriam melhores que a solução calibrada para uma determinada sub-bacia.

Durante a elaboração do trabalho e, em função das características do modelo DHSVM, com relação ao modelo de escoamento, chegou-se à conclusão de que era necessário promover a calibração do parâmetro de profundidade do solo e do tamanho do *pixel*, normalmente não considerados nos processos de calibração de modelos hidrológicos. Os resultados apresentados no Capítulo 3 mostram que é realmente importante, para o caso do modelo DHSVM, a calibração do tamanho do *pixel* e da profundidade do solo.

No Capítulo 4, foi apresentada a ferramenta de calibração implementada bem como um estudo de caso da aplicação da mesma para uma sub-bacia do rio Castelo. A calibração foi realizada para parâmetros de solo mais sensíveis, segundo Cuo, Giambelluca e Ziegler (2011), sendo definidos limites inferior e superior para os valores dos parâmetros, bem como o valor do incremento/decremento a ser aplicado na geração de uma nova solução. Os resultados apresentados mostram que a meta-heurística CS produz bons resultados de calibração mesmo tendo como fator limitante o número de iterações e, conseqüentemente, de soluções testadas.

Para o futuro é interessante o aprimoramento da ferramenta de calibração por meio da implementação de novas funções objetivo, novas heurísticas, além de estudar melhor a influência dos parâmetros da meta-heurística CS no problema de calibração de modelos hidrológicos.

Por fim, foi proposta uma metodologia para, a partir dos resultados da calibração para um conjunto de sub-bacias, realizar a validação e, ou, ajuste na calibração dos parâmetros por meio da aplicação dos parâmetros obtidos para outras sub-bacias. Os resultados obtidos indicaram que a metodologia pode melhorar o resultado da calibração para uma determinada sub-bacia com a aplicação dos parâmetros calibrados para uma outra sub-bacia.

Os resultados obtidos da modelagem das sub-bacias com os parâmetros calibrados para

as demais sub-bacias indicam a necessidade de novos estudos com o objetivo de verificar a eficiência da metodologia utilizada no presente trabalho na extrapolação de parâmetros para sub-bacias localizadas em regiões diferentes mas com características semelhantes quanto ao tipo de solo, uso da terra e relevo.

Referências

- ABBASPOUR, K. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale {SWAT} model. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 733 – 752, 2015.
- ABBASPOUR, K. C. *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. EAWAG, 2015.
- AGUIAR, L. J. G. et al. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em Áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, scielo, v. 26, p. 215 – 224, 06 2011. ISSN 0102-7786.
- ALVARENGA, L. A. *Impactos hidrológicos decorrentes de diferentes cenários de cobertura do solo e mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, utilizando o modelo DHSVM*. Tese (Tese) — Universidade Federal de Lavras, 10 2015.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, v. 22, n. 6, p. 711–728, 12 2013.
- ARSENAULT, R. et al. Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 19, n. 7, p. 1374–1384, 2013.
- BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta. forrex forum for research and extension in natural resources, kamloops, bc. forrex series no. 25. *British Columbia, Canada*, 2009.
- BLASONE, R.-S.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D. Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques. *Hydrology Research*, IWA Publishing, v. 38, n. 4-5, p. 451–476, 2007.
- BOYLE, D. P.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 36, n. 12, p. 3663–3674, 2000.
- BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Hierarchical calibration of swat model for a watershed in southern brazil. *RBRH*, SciELO Brasil, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.
- CAMPANHARO, W. A. *Análise do modelo de capacidade de infiltração variável (VIC) para as bacia dos rios Santa Maria de Vitória e Jucú*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

- CHAVES, A. A. *Uma meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória*. Tese (Tese) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, São José dos Campos, 2009.
- CHAVES, A. A.; CORREA, F. de A.; LORENA, L. A. N. Clustering search heuristic for the capacitated p-median problem. In: *Innovations in Hybrid Intelligent Systems*. [S.l.]: Springer, 2007. p. 136–143.
- CUARTAS, L. A. et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new {HAND} terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 462–463, p. 15 – 27, 2012. Tropical Hydrology.
- CUO, L. et al. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the puget sound basin, washington. *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons, Ltd., v. 25, n. 11, p. 1729–1753, 2011.
- 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, n. 15, p. 2405–2421, 2011.
- CUO, L. et al. 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*, v. 224, n. 1–2, p. 81 – 94, 2006.
- DANTAS, R. *NetBeans IDE 7 Cookbook*. [S.l.]: Packt Publishing, 2011.
- DEITEL, H. *Java: como programar*. [S.l.]: PRENTICE HALL BRASIL, 2010.
- DU, E. et al. Validation and sensitivity test of the distributed hydrology soil-vegetation model (DHSVM) in a forested mountain watershed. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, v. 28, n. 26, p. 6196–6210, 2014.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, 1992.
- DUNNE, T. Introduction to section 2—problems in measuring and modeling the influence of forest management on hydrologic and geomorphic processes. *Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*, Wiley Online Library, p. 77–83, 2001.
- EDUARDO, E. N. A. et al. Hydrological simulation as subside for management of surface water resources at the Mortes River Basin. *Ciência e Agrotecnologia*, scielo, v. 40, p. 390 – 404, 08 2016.
- EMBRAPA. Mapa de solos do brasil. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, 2014. Acesso em: 15 dez 2014.
- ENTEKHABI D. EAGLESON, P. S. Land surface hydrology parameterization for atmospheric general circulation models including subgrid scale spatial variability. *Journal of Climate*, v. 2, n. 8, p. 816–831, 1989.

- FRANCHINI, M.; GALEATI, G.; BERRA, S. Global optimization techniques for the calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, v. 43, n. 3, p. 443–458, 1998.
- FUKUNAGA, D. C. *Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.
- FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the swat hydrologic model to a tropical watershed at brazil. *Catena*, Elsevier, v. 125, p. 206–213, 2015.
- GOUGH, B.; STALLMAN, R. *An Introduction to GCC: For the GNU Compilers Gcc and G++*. [S.l.]: Network Theory, 2004. (A Network theory manual).
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, v. 108, n. 3, p. 225–230, 1982.
- HUTCHINSON, M. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, v. 106, n. 3, p. 211 – 232, 1989.
- KIRKPATRICK, S. et al. Optimization by simulated annealing. *science*, Washington, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.
- KRUK, N. S. et al. Análise de sensibilidade do modelo hidrológico distribuído dhsvm aos parâmetros de vegetação. *Diretoria da ABRH*, p. 75, 2009.
- LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999. ISSN 1944-7973. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>>.
- LIONG, S.-Y.; CHAN, W. T.; SHREERAM, J. Peak-flow forecasting with genetic algorithm and swmm. *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 121, n. 8, p. 613–617, 1995.
- MENDES, L. A. *Análise dos critérios de outorga de direito de usos consuntivos dos recursos hídricos baseados em vazões mínimas e em vazões de permanência*. Tese (Dissertação) — Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo, 2007.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. In: *Hydrological modelling and the water cycle*. [S.l.]: Springer, 2009. p. 1–24.
- MORAES, J. M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 1, p. 61–70, 2003.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, American society of agricultural and biological engineers, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

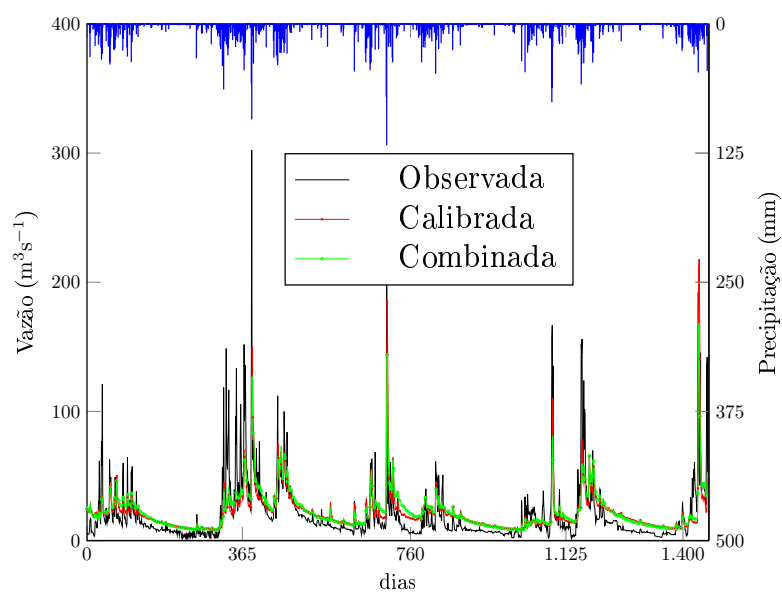
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, Br Computer Soc, v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965.
- NETO, J. de O. M. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo swat. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 19, n. 1, 2014.
- OLIVEIRA, A. C.; LORENA, L. A. Detecting promising areas by evolutionary clustering search. In: *Advances in Artificial Intelligence—SBIA 2004*. [S.l.]: Springer, 2004. p. 385–394.
- OLIVEIRA, A. C. A. M. d.; CHAVES, A. A.; LORENA, L. A. N. Clustering search. *Pesquisa Operacional*, scielo, v. 33, p. 105 – 121, 04 2013.
- OLIVEIRA, K. D. *Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Jucu Utilizando o Modelo DHSVM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- ONO, S. *Análise dos critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos considerando a disponibilidade de água superficial*. Tese (Dissertação) — Escola Politecnica, Universidade de Sao Paulo., 2006.
- OTTENBREIT, E. M. *Modeling the Impacts of Climate Change and Agricultural Management Practices on Surface Erosion in a Dryland Agricultural Basin*. Tese (Tese) — Washington State University, 05 2011.
- PINIEWSKI, M.; OKRUSZKO, T. Multi-site calibration and validation of the hydrological component of swat in a large lowland catchment. In: _____. *Modelling of Hydrological Processes in the Narew Catchment*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 15–41.
- PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. Estudo da vazão em cursos d'água. *Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Viçosa.*, p. 151, 2006.
- QI, C.; GRUNWALD, S. Gis-based hydrologic modeling in the sandusky watershed using swat. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 48, n. 1, p. 169–180, 2005.
- ROSENBROCK, H. H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, v. 3, n. 3, p. 175–184, 1960.
- SANTOS, H. et al. O novo mapa de solos do brasil: legenda atualizada. *Rio de Janeiro, Brazil: EMBRAPA Solos*, 2011.
- SELMAN, B.; KAUTZ, H. A.; COHEN, B. Noise strategies for improving local search. In: *AAAI*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 94, p. 337–343.
- SHOURONG, W. et al. Numerical simulation experiments by nesting hydrology model dhsvm with regional climate model regcm2/china. *Journal of Meteorological Research*, v. 16, n. 4, p. 509–518, 2002.

- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. V. Computer models of watershed hydrology. In: _____. [S.l.]: Water Resources Publications, 1995. cap. Model Calibration.
- STORCK, P. *Trees, snow and flooding: an investigation of forest canopy effects on snow accumulation and melt at the plot and watershed scales in the Pacific Northwest*. [S.l.], 2000.
- STORCK, P.; LETTENMAIER, D. P.; BOLTON, S. M. Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, oregon, united states. *Water Resources Research*, 2002.
- SUMNER, N. R.; FLEMING, P. M.; BATES, B. C. Calibration of a modified {SFB} model for twenty-five australian catchments using simulated annealing. *Journal of Hydrology*, v. 197, n. 1-4, p. 166 – 188, 1997.
- SURFLEET, C. G.; SKAUGSET, A. E.; MCDONNELL, J. J. Uncertainty assessment of forest road modeling with the distributed hydrology soil vegetation model (dhsvm). *Canadian journal of forest research*, NRC Research Press, v. 40, n. 7, p. 1397–1409, 2010.
- THANAPAKPAWIN, P. et al. Effects of land use change on the hydrologic regime of the mae chaem river basin, nw thailand. *Journal of Hydrology*, v. 334, n. 1, p. 215–230, 2007.
- THYER, M.; KUCZERA, G.; BATES, B. C. Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 35, n. 3, p. 767–773, 1999.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. In: _____. [S.l.: s.n.], 2001. cap. 1, p. 25.
- TUCCI, C. E. M. *Modelo Hidrológicos*. 2.ed. rev. e aum.. ed. Porto Alegre: ABRH Editora da UFRGS, 2005.
- WESTRICK, K. J.; STORCK, P.; MASS, C. F. Description and evaluation of a hydrometeorological forecast system for mountainous watersheds. *Weather and Forecasting*, v. 17, n. 2, p. 250–262, 2002.
- WHITAKER, A. et al. Application of the distributed hydrology soil vegetation model to redfish creek, british columbia: model evaluation using internal catchment data. *Hydrological processes*, Wiley Online Library, v. 17, n. 2, p. 199–224, 2003.
- WIGMOSTA, M. S. et al. The distributed hydrology soil vegetation model. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*, Water Resource Publications: Littleton, CO, p. 7–42, 2002.
- WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, 1994.
- YAO, C.; YANG, Z. Parameters optimization on dhsvm model based on a genetic algorithm. *Frontiers of Earth Science in China*, Springer, v. 3, n. 3, p. 374–380, 2009.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 204, n. 1, p. 83–97, 1998.

Apêndices

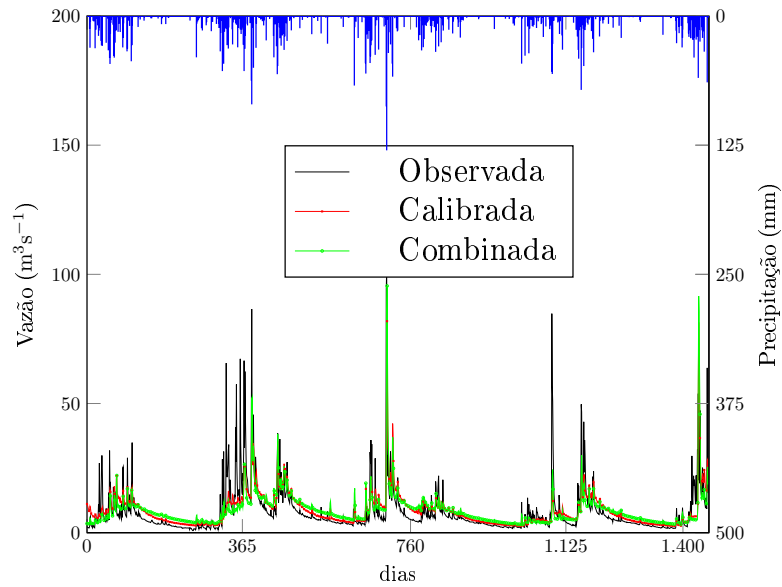
A Hidrogramas comparativos entre as vazões observadas, calibradas e melhores combinadas

Figura 23 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a bacia Castelo.



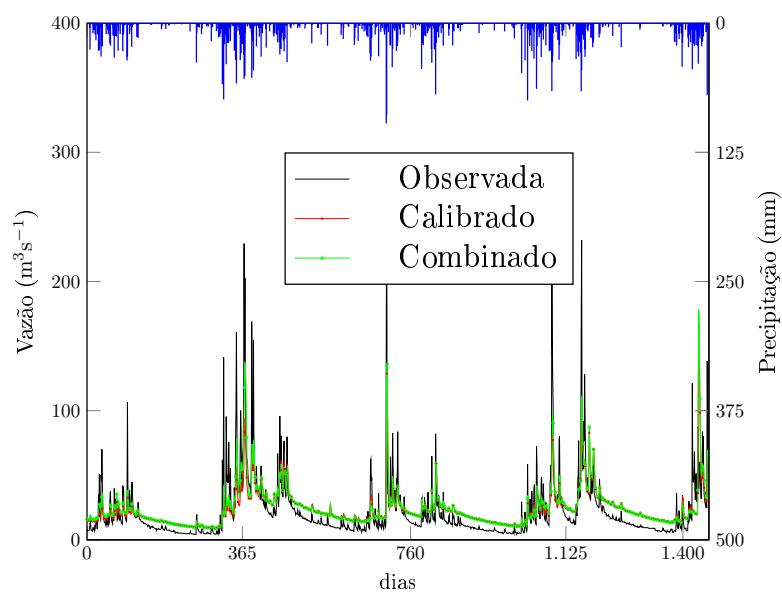
Fonte: O autor

Figura 24 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Fazenda Lajinha.



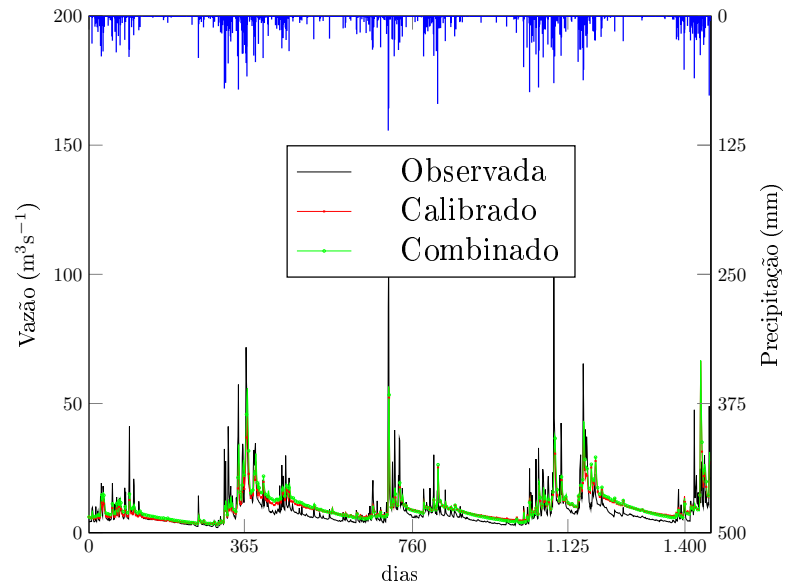
Fonte: O autor

Figura 25 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Itaici.



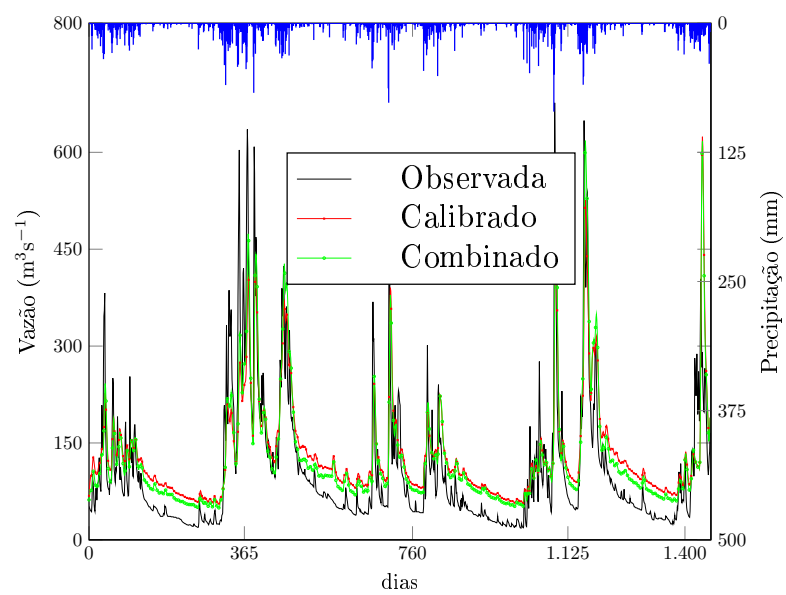
Fonte: O autor

Figura 26 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Iúna.



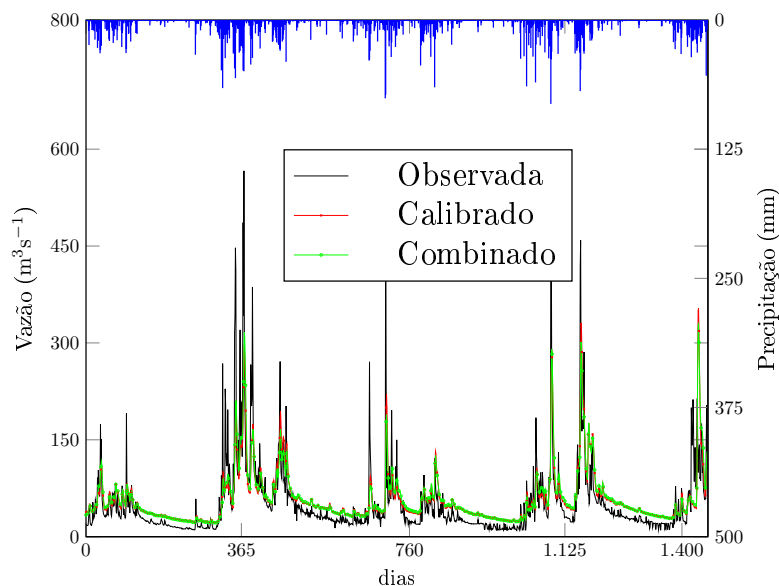
Fonte: O autor

Figura 27 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Paineiras.



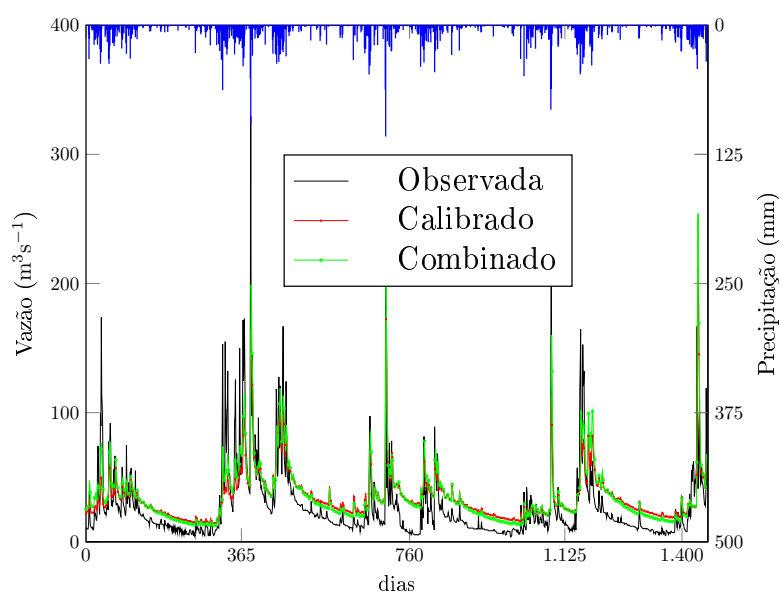
Fonte: O autor

Figura 28 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Rive.



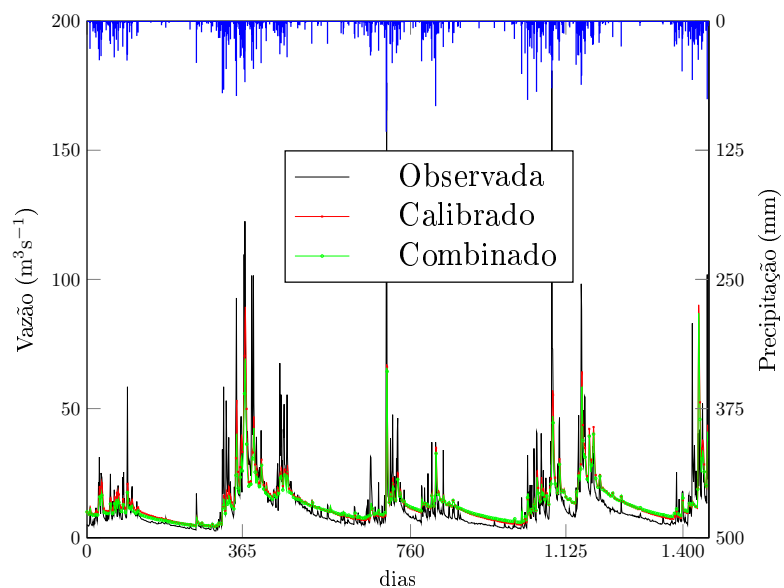
Fonte: O autor

Figura 29 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia São Miguel.



Fonte: O autor

Figura 30 – Hidrograma comparativo das vazões observada, calibrada e melhor combinada para a sub-bacia Terra Corrida.



Fonte: O autor

B Arquivo de configuração do modelo

```

\#
\# DHSVM INPUT FILE FORMAT
\#
\# The file is organized in sections [...], which contain key = entry pairs.
\# The file is free format, in that correct reading of the file is not dependent
\# on spaces and/or the order of the key-entry pairs within a section.
\# The keys are not case-sensitive, but the entries are, because filenames on a
\# UNIX platform are case-sensitive.
\# Comments are preceded by a '\#', and run from the occurrence of '\#' till the
\# end of the line. You can comment out an entire line (like in this
\# header), or you can place a comment after an entry.
\# It is important to place the key-entry pair in the correct section, since it
\# will not be found if it is in another section.
\# The easiest way to make the input file is to fill out this default template.
\# Since DHSVM will only use the keys that it requires you do not have to worry
\# about empty entries for keys that are not needed. For example, if you are
\# running the model in point mode, you do not have to fill out the routing
\# section. If you have already filled it out you can leave it, since DHSVM will
\# not use the information. This allows easy switching between point and basin mode.
\# For more information about the specific entries see the DHSVM web page
\# the soil parameters are copied from Lan's lowland INPUT File (with extremely
\# low lateral conductivity \$ changed the station from 1 to 2

\#
\# OPTIONS SECTION
\#

[OPTIONS]                                \# Model Options
Format = BIN                             \# BIN or NETCDF

Extent = BASIN                           \# POINT or BASIN
Gradient = WATERTABLE                    \# TOPOGRAPHY or WATERTABLE
Flow Routing = NETWORK                    \# UNIT\_HYDROGRAPH or NETWORK
Sensible Heat Flux = FALSE                \# TRUE or FALSE
Sediment = FALSE                         \# TRUE or FALSE
Sediment Input File =                    \# path for sediment configuration file
Overland Routing = CONVENTIONAL           \# CONVENTIONAL or KINEMATIC
Infiltration = STATIC                     \# Static or Dynamic
Interpolation = VARCRESS                  \# NEAREST or INVDIST or VARCRESS
MM5 = FALSE                               \# TRUE or FALSE
QPF = FALSE                               \# TRUE or FALSE
PRISM = FALSE                             \# TRUE or FALSE
PRISM data path =                        \# path for PRISM files
PRISM data extension = bin                \# file extension for PRISM files
Canopy radiation attenuation mode = FIXED \# FIXED or VARIABLE
Shading = FALSE                           \# TRUE or FALSE
Shading data path = ../input/Shadow

```

```

Shading data extension = hourly.bin      \# File extension for shading files
Skyview data path      = ../input/SkyView.bin
Snotel                 = FALSE           \# TRUE or FALSE
Outside                = TRUE            \# TRUE or FALSE
Rhoverride             = FALSE           \# TRUE or FALSE
Precipitation Source   = STATION         \# STATION or RADAR
Wind Source             = STATION         \# STATION or MODEL
Temperature lapse rate = CONSTANT        \# CONSTANT or VARIABLE
Precipitation lapse rate = CONSTANT      \# CONSTANT, MAP, or VARIABLE
Cressman radius        = 10              \# in model pixels
Cressman stations      = 4               \# the maximum stations for interpolation

\#
\# MODEL AREA SECTION
\#

[AREA]                                     \# Model area
Coordinate System      = UTM              \# UTM or USER\_DEFINED
Extreme North          = 7769446.63227   \# Coordinate for northern edge of grid
Extreme West           = 206657.099347   \# Coordinate for western edge of grid
Center Latitude        = -20.34          \# Central parallel of basin
Center Longitude       = -41.21          \# Central meridian of basin
Time Zone Meridian     = -39.0           \# Time zone meridian for area
Number of Rows         = 927             \# Number of rows
Number of Columns      = 915             \# Number of columns
Grid spacing           = 100             \# Grid resolution in m
Point North            =                 \# North coordinate for point model if Extent = POINT
Point East             =                 \# East coordinate for point model if Extent = POINT

\#
\# TIME SECTION
\#

[TIME]                                     \# Model period
Time Step              = 24              \# Model time step (hours)
\#Model Start          = 01/01/2007-00   \# Model start time (MM/DD/YYYY-HH)
\#Model End            = 01/01/2008-00   \# Model end time (MM/DD/YYYY-HH)
Model Start            = 01/01/2008-00   \# Model start time (MM/DD/YYYY-HH)
Model End              = 12/31/2011-00   \# Model end time (MM/DD/YYYY-HH)

\#
\# CONSTANTS SECTION
\#

[CONSTANTS]                               \# Model constants
Ground Roughness       = 0.02            \# Roughness of soil surface (m)
Snow Roughness         = 0.01            \# Roughness of snow surface (m)
Rain Threshold         = -1.0            \# Minimum temperature at which rain occurs (C)
Snow Threshold         = 0.5             \# Maximum temperature at which snow occurs (C)
Snow Water Capacity    = 0.03            \# Snow liquid water holding capacity(fraction)
Reference Height       = 45.0            \# Reference height (m)
Rain LAI Multiplier    = 0.0001         \# LAI Multiplier for rain interception
Snow LAI Multiplier    = 0.0005         \# LAI Multiplier for snow interception
Min Intercepted Snow   = 0.005           \# Intercepted snow that can only be melted (m)
Outside Basin Value    = 0               \# Value in mask that indicates outside the basin
Temperature Lapse Rate = -0.0065        \# Temperature lapse rate (C/m)
Precipitation Lapse Rate = 0.0001       \# Precipitation lapse rate (m/m). Use a linear function to
\# assuming precipiatio is positively related to elevation

\#

```

```

\# TERRAIN INFORMATION SECTION
\#

[TERRAIN]                                \# Terrain information
DEM File      = ../input/dem.bin
Basin Mask File = ../input/mask.bin

\#
\# ROUTING SECTION
\#

[ROUTING]                                \# Routing information. This section is
                                          \# only relevant if the Extent = BASIN

\#
\# STREAM NETWORK
\#

\# The following three fields are only used if Flow Routing = NETWORK
Stream Map File      = ../input/stream.map.dat
Stream Network File = ../input/stream.network.dat
Stream Class File   = ../input/adjust.classfile

\#
\# ROAD NETWORK
\#

\# The following three fields are only used if Flow Routing = NETWORK and there
\# is a road network

\#Road Map File      =                \# path for road map file
\#Road Network File =                \# path for road network file
\#Road Class File   =                \# path for road network file

\#
\# UNIT HYDROGRAPH
\#
\# The following two fields are only used if Flow Routing = UNIT\_HYDROGRAPH

Travel Time File     =                \# path for travel time file
Unit Hydrograph File =                \# path for unit hydrograph file

\#
\# METEOROLOGY SECTION
\#

[METEOROLOGY]                                \# Meteorological station

Number of Stations = 24                    \# Number of meteorological stations

Station Name 1 = Inmet\_A617\_Rive
North Coordinate 1 = 7703524.6
East Coordinate 1 = 240831.2
Elevation 1 = 129.00
Station File 1 = ../metfiles/Inmet\_A617\_Rive.csv

Station Name 2 = ANA\_2041000\_AtVivacqua
North Coordinate 2 = 7686244.4
East Coordinate 2 = 271177.6
Elevation 2 = 76.00
Station File 2 = ../metfiles/ANA\_2041000\_Atilio\_Vivacqua.csv

```

Station Name 3 = ANA_2041021_Burarama
North Coordinate 3 = 7711493.4
East Coordinate 3 = 255198.7
Elevation 3 = 180.00
Station File 3 = ../metfiles/ANA_2041021_Burarama.csv

Station Name 4 = ANA_2041002_Castelo
North Coordinate 4 = 7719463.8
East Coordinate 4 = 270725.3
Elevation 4 = 107.00
Station File 4 = ../metfiles/ANA_2041002_Castelo.csv

Station Name 5 = ANA_2041011_Conc_Castelo
North Coordinate 5 = 7748196.8
East Coordinate 5 = 266161.1
Elevation 5 = 600.00
Station File 5 = ../metfiles/ANA_2041011_Conc_Castelo.csv

Station Name 6 = ANA_2041014_Dores
North Coordinate 6 = 7709549.9
East Coordinate 6 = 203103.1
Elevation 6 = 772.00
Station File 6 = ../metfiles/ANA_2041014_Dores.csv

Station Name 7 = ANA_2041008_Dores_do_Manhumirim
North Coordinate 7 = 7774006.6
East Coordinate 7 = 214543.6
Elevation 7 = 458.00
Station File 7 = ../metfiles/ANA_2041008_Dores_do_Manhumirim.csv

Station Name 8 = ANA_2040017_Duas_Barras
North Coordinate 8 = 7706596.4
East Coordinate 8 = 304238.1
Elevation 8 = 100.00
Station File 8 = ../metfiles/ANA_2040017_Duas_Barras.csv

Station Name 9 = ANA_2041015_Faz_Monte_Alegre
North Coordinate 9 = 7682623.8
East Coordinate 9 = 250416.6
Elevation 9 = 450.00
Station File 9 = ../metfiles/ANA_2041015_Faz_Monte_Alegre.csv

Station Name 10 = ANA_2041048_Faz_Vargem_Alegre
North Coordinate 10 = 7765841.1
East Coordinate 10 = 190616.4
Elevation 10 = 500.00
Station File 10 = ../metfiles/ANA_2041048_Faz_Vargem_Alegre.csv

Station Name 11 = ANA_2041001_Guacui
North Coordinate 11 = 7700991.4
East Coordinate 11 = 220969.7
Elevation 11 = 576.00
Station File 11 = ../metfiles/ANA_2041001_Guacui.csv

Station Name 12 = ANA_2040016_Ibitirama
North Coordinate 12 = 7726483.3
East Coordinate 12 = 221592.3
Elevation 12 = 794.00
Station File 12 = ../metfiles/ANA_2040016_Ibitirama.csv

Station Name 13 = ANA_2050005_Iconha
North Coordinate 13 = 7701120.5
East Coordinate 13 = 309508.6
Elevation 13 = 25.00
Station File 13 = ../metfiles/ANA_2050005_Iconha.csv

Station Name 14 = ANA_2041019_Itaici
North Coordinate 14 = 7727855.7
East Coordinate 14 = 238267.3
Elevation 14 = 380.00
Station File 14 = ../metfiles/ANA_2041019_Itaici.csv

Station Name 15 = ANA_2041013_Iuna
North Coordinate 15 = 7747742.0
East Coordinate 15 = 234828.6
Elevation 15 = 615.00
Station File 15 = ../metfiles/ANA_2041013_Iuna.csv

Station Name 16 = ANA_2041010_Jacigua
North Coordinate 16 = 7709742.3
East Coordinate 16 = 289614.3
Elevation 16 = 580.00
Station File 16 = ../metfiles/ANA_2041010_Jacigua.csv

Station Name 17 = ANA_2141015_Mimoso
North Coordinate 17 = 7669396.4
East Coordinate 17 = 254774.4
Elevation 17 = 67.00
Station File 17 = ../metfiles/ANA_2141015_Mimoso.csv

Station Name 18 = ANA_2141017_Sao_Jose_Torres
North Coordinate 18 = 7669576.5
East Coordinate 18 = 267348.3
Elevation 18 = 120.00
Station File 18 = ../metfiles/ANA_2141017_Sao_Jose_Torres.csv

Station Name 19 = ANA_2040023_Sao_Rafael
North Coordinate 19 = 7754537.3
East Coordinate 19 = 298057.1
Elevation 19 = 818.00
Station File 19 = ../metfiles/ANA_2040023_Sao_Rafael.csv

Station Name 20 = ANA_2041017_Sta_Cruz_Caparao
North Coordinate 20 = 7750798.8
East Coordinate 20 = 218061.3
Elevation 20 = 920.00
Station File 20 = ../metfiles/ANA_2041017_Sta_Cruz_Caparao.csv

Station Name 21 = ANA_2041018_Usina_Fortaleza
North Coordinate 21 = 7745731.3
East Coordinate 21 = 248439.1
Elevation 21 = 580.00
Station File 21 = ../metfiles/ANA_2041018_Usina_Fortaleza.csv

Station Name 22 = ANA_2040006_Usina_Paineiras
North Coordinate 22 = 7682152.0
East Coordinate 22 = 297242.1
Elevation 22 = 40.00
Station File 22 = ../metfiles/ANA_2040006_Usina_Paineiras.csv

```
Station Name 23 = ANA\_2040020\_Vila\_Nova\_Maravilha
North Coordinate 23 = 7722010.5
East Coordinate 23 = 296760.8
Elevation 23 = 980.00
Station File 23 = ../metfiles/ANA\_2040020\_Vila\_Nova\_Maravilha.csv
```

```
Station Name 24 = Inmet\_A615\_Alfredo\_Chaves
North Coordinate 24 = 7717053.6
East Coordinate 24 = 318500.2
Elevation 24 = 014.00
Station File 24 = ../metfiles/Inmet\_A615\_Alfredo\_Chaves.csv
```

```
\#
```

```
\# MM5
```

```
\#
```

```
\# The following block only needs to be filled out if MM5 = TRUE. In that case
\# This is the ONLY block that needs to be filled out
```

```
MM5 Start           =           \# Start of MM5 file (MM/DD/YYYY-HH),
MM5 Rows            =
MM5 Cols            =
MM5 Extreme North   =
MM5 Extreme West    =
MM5 DY              =
```

```
\# MM5 met files
```

```
MM5 Temperature File =
MM5 Humidity File    =
MM5 Wind Speed File  =
MM5 Shortwave File   =
MM5 Longwave File    =
MM5 Pressure File    =
MM5 Precipitation File =
MM5 Terrain File     =
MM5 Temp Lapse File  =
```

```
\# For each soil layer make a key-entry pair as below (n = 1, ..,
\# Number of Soil Layers)
```

```
MM5 Soil Temperature File 0 =
MM5 Soil Temperature File 1 =
MM5 Soil Temperature File 2 =
```

```
\#
```

```
\# RADAR
```

```
\#
```

```
\# The following block only needs to be filled out if Precipitation Source =
\# RADAR.
```

```
Radar Start         =
Radar File           =
Radar Extreme North =
Radar Extreme West  =
Radar Number of Rows =
Radar Number of Columns =
Radar Grid Spacing  =
```

```
\#
```

```

\# Wind
\#

\# The following block only needs to be filled out if Wind Source = MODEL
Number of Wind Maps      =
Wind File Basename      =
Wind Map Met Stations    =

\#
\# Precipitation lapse rate
\#

\# The following block only needs to be filled out if Precipitation lapse rate
\# = MAP
Precipitation lapse rate =

\#
\# SOILS INFORMATION SECTION
\#

[SOILS]                                \# Soil information
Soil Map File      = ../input/soil.bin
Soil Depth File    = ../input/soild\_10.bin

Number of Soil Types = 13

\#
\# SOIL 1
\#

Soil Description      1 = Argilossolo vermelho Eutrofico (4 do kenya)
Lateral Conductivity  1 = 2.17e-05
Exponential Decrease  1 = 0.23
Depth Threshold       1 = 0.5      \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                                \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                                \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                                \# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  1 = 0.0000004
Capillary Drive       1 = 0.09
Surface Albedo        1 = 0.16
Number of Soil Layers 1 = 3
Porosity              1 = .52 .54 .55
Pore Size Distribution 1 = .46 .49 .49
Bubbling Pressure     1 = .53 .40 .37
Field Capacity        1 = .31 .36 .37
Wilting Point         1 = .25 .30 .31
Bulk Density          1 = 1227. 1211. 1199.
Vertical Conductivity 1 = 3.00e-5 1.50e-5 1.38e-5
Thermal Conductivity  1 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity      1 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n            1 = 0.013

\#
\# SOIL 2
\#

Soil Description      2 = Argilossolo vermelho Eutrofico (7 do kenya)
Lateral Conductivity  2 = 2.71e-05
Exponential Decrease  2 = 0.14
Depth Threshold       2 = 0.5      \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays

```

```

\# applies unless water table is higher than soil depth. If this
\# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
\# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration 2 = 0.0000004
Capillary Drive      2 = 0.09
Surface Albedo       2 = 0.17
Number of Soil Layers 2 = 3
Porosity              2 = .54 .53 .51
Pore Size Distribution 2 = .35 .38 .35
Bubbling Pressure    2 = 1.01 .62 .63
Field Capacity        2 = .31 .33 .31
Wilting Point         2 = .23 .25 .22
Bulk Density          2 = 1133. 1210. 1275.
Vertical Conductivity 2 = 3.20e-5 1.99e-5 2.32e-5
Thermal Conductivity 2 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity      2 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n            2 = 0.013

\#
\# SOIL 3
\#

Soil Description      3 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (7 do kenya)
Lateral Conductivity  3 = 2.71e-05
Exponential Decrease  3 = 0.14
Depth Threshold       3 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
\# applies unless water table is higher than soil depth. If this
\# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
\# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  3 = 0.0000005
Capillary Drive       3 = 0.09
Surface Albedo        3 = 0.17
Number of Soil Layers 3 = 3
Porosity              3 = .54 .53 .51
Pore Size Distribution 3 = .35 .38 .35
Bubbling Pressure     3 = 1.01 .62 .63
Field Capacity         3 = .31 .33 .31
Wilting Point         3 = .23 .25 .22
Bulk Density          3 = 1133. 1210. 1275.
Vertical Conductivity 3 = 3.20e-5 1.99e-5 2.32e-5
Thermal Conductivity  3 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity      3 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n            3 = 0.013

\#
\# SOIL 4
\#

Soil Description      4 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (7 do kenya)
Lateral Conductivity  4 = 2.71e-05
Exponential Decrease  4 = 0.14
Depth Threshold       4 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
\# applies unless water table is higher than soil depth. If this
\# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
\# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  4 = 0.0000005
Capillary Drive       4 = 0.09
Surface Albedo        4 = 0.17
Number of Soil Layers 4 = 3
Porosity              4 = .54 .53 .51

```

```

Pore Size Distribution 4 = .35 .38 .35
Bubbling Pressure     4 = 1.01 .62 .63
Field Capacity        4 = .31 .33 .31
Wilting Point         4 = .23 .25 .22
Bulk Density          4 = 1133. 1210. 1275.
Vertical Conductivity 4 = 3.20e-5 1.99e-5 2.32e-5
Thermal Conductivity  4 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity     4 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n           4 = 0.013

```

```

\#
\# SOIL 5
\#

```

```

Soil Description      5 = Cambissolo haplico Argila de atividade baixa Distrofico (2 do Keny)
Lateral Conductivity  5 = 2.46e-05
Exponential Decrease  5 = 0.33
Depth Threshold       5 = 0.5      \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
                        \# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  5 = 0.0000005
Capillary Drive       5 = 0.09
Surface Albedo       5 = 0.19
Number of Soil Layers 5 = 3
Porosity              5 = .48 .47 .47
Pore Size Distribution 5 = .46 .43 .40
Bubbling Pressure     5 = .63 .35 .45
Field Capacity        5 = .25 .33 .32
Wilting Point         5 = .19 .27 .25
Bulk Density          5 = 1293. 1332. 1361.
Vertical Conductivity 5 = 2.90e-5 1.07e-5 1.40e-5
Thermal Conductivity  5 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity     5 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n           5 = 0.013

```

```

\#
\# SOIL 6
\#

```

```

Soil Description      6 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (4 do keny)
Lateral Conductivity  6 = 2.17e-05
Exponential Decrease  6 = 0.23
Depth Threshold       6 = 0.5      \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
                        \# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  6 = 0.0000004
Capillary Drive       6 = 0.09
Surface Albedo       6 = 0.16
Number of Soil Layers 6 = 3
Porosity              6 = .52 .54 .55
Pore Size Distribution 6 = .46 .49 .49
Bubbling Pressure     6 = .53 .40 .37
Field Capacity        6 = .31 .36 .37
Wilting Point         6 = .25 .30 .31
Bulk Density          6 = 1227. 1211. 1199.
Vertical Conductivity 6 = 2.80e-5 1.50e-5 1.38e-5
Thermal Conductivity  6 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity     6 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6

```

Mannings n 6 = 0.013

\#

\# SOIL 7

\#

Soil Description 7 = Cambissolo haplico Argila de atividade baixa Distrofico (4 do kenya)

Lateral Conductivity 7 = 2.17e-05

Exponential Decrease 7 = 0.23

Depth Threshold 7 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
 \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
 \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
 \# decay applies just like the older versions.

Maximum Infiltration 7 = 0.0000004

Capillary Drive 7 = 0.09

Surface Albedo 7 = 0.16

Number of Soil Layers 7 = 3

Porosity 7 = .52 .54 .55

Pore Size Distribution 7 = .46 .49 .49

Bubbling Pressure 7 = .53 .40 .37

Field Capacity 7 = .31 .36 .37

Wilting Point 7 = .25 .30 .31

Bulk Density 7 = 1227. 1211. 1199.

Vertical Conductivity 7 = 2.90e-5 1.50e-5 1.38e-5

Thermal Conductivity 7 = 7.114 6.923 6.923

Thermal Capacity 7 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6

Mannings n 7 = 0.013

\#

\# SOIL 8

\#

Soil Description 8 = Cambissolo haplico Argila de atividade baixa Distrofico (4 do kenya)

Lateral Conductivity 8 = 2.17e-05

Exponential Decrease 8 = 0.23

Depth Threshold 8 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
 \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
 \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissiv
 \# decay applies just like the older versions.

Maximum Infiltration 8 = 0.0000004

Capillary Drive 8 = 0.09

Surface Albedo 8 = 0.16

Number of Soil Layers 8 = 3

Porosity 8 = .52 .54 .55

Pore Size Distribution 8 = .46 .49 .49

Bubbling Pressure 8 = .53 .40 .37

Field Capacity 8 = .31 .36 .37

Wilting Point 8 = .25 .30 .31

Bulk Density 8 = 1227. 1211. 1199.

Vertical Conductivity 8 = 2.80e-5 1.50e-5 1.38e-5

Thermal Conductivity 8 = 7.114 6.923 6.923

Thermal Capacity 8 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6

Mannings n 8 = 0.013

\#

\# SOIL 9

\#

Soil Description 9 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (4 do kenya)

Lateral Conductivity 9 = 2.17e-05

```

Exponential Decrease  9 = 0.23
Depth Threshold       9 = 0.5    \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                        \# decay applies just like the older versions.

Maximum Infiltration  9 = 0.0000004
Capillary Drive       9 = 0.09
Surface Albedo        9 = 0.16
Number of Soil Layers 9 = 3
Porosity              9 = .52 .54 .55
Pore Size Distribution 9 = .46 .49 .49
Bubbling Pressure    9 = .53 .40 .37
Field Capacity        9 = .31 .36 .37
Wilting Point        9 = .25 .30 .31
Bulk Density          9 = 1227. 1211. 1199.
Vertical Conductivity 9 = 2.80e-5 1.50e-5 1.38e-5
Thermal Conductivity  9 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity      9 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n           9 = 0.013

\#
\# SOIL 10
\#

Soil Description      10 = Argilossolo vermelho Eutrofico (2 do Keny)
Lateral Conductivity  10 = 2.46e-05
Exponential Decrease  10 = 0.33
Depth Threshold       10 = 0.5    \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                        \# decay applies just like the older versions.

Maximum Infiltration  10 = 0.0000005
Capillary Drive       10 = 0.09
Surface Albedo        10 = 0.19
Number of Soil Layers 10 = 3
Porosity              10 = .52 .49 .48
Pore Size Distribution 10 = .47 .53 .49
Bubbling Pressure    10 = .95 .73 .61
Field Capacity        10 = .24 .26 .28
Wilting Point        10 = .18 .22 .22
Bulk Density          10 = 1163. 1211. 1272.
Vertical Conductivity 10 = 5.00e-5 2.76e-5 2.26e-5
Thermal Conductivity  10 = 7.114 6.923 6.923
Thermal Capacity      10 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n           10 = 0.013

\#
\# SOIL 11
\#

Soil Description      11 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (7 do keny)
Lateral Conductivity  11 = 2.71e-05
Exponential Decrease  11 = 0.14
Depth Threshold       11 = 0.5    \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                        \# decay applies just like the older versions.

Maximum Infiltration  11 = 0.0000005
Capillary Drive       11 = 0.09
Surface Albedo        11 = 0.17

```

```

Number of Soil Layers 11 = 3
Porosity              11 = .54 .53 .51
Pore Size Distribution 11 = .35 .38 .35
Bubbling Pressure    11 = 1.01 .62 .63
Field Capacity        11 = .31 .33 .31
Wilting Point         11 = .23 .25 .22
Bulk Density          11 = 1133. 1210. 1275.
Vertical Conductivity 11 = 3.20e-5 1.99e-5 2.32e-5
Thermal Conductivity 11 = 7.114 6.923 7.0
Thermal Capacity      11 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n            11 = 0.013

```

```

\#
\# SOIL 12
\#

```

```

Soil Description      12 = Latossolo vermelho-amarelo Distrofico (6 do kenya)
Lateral Conductivity  12 = 4.66e-05
Exponential Decrease  12 = 0.23
Depth Threshold       12 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                        \# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  12 = 0.0000008
Capillary Drive        12 = 0.09
Surface Albedo         12 = 0.21
Number of Soil Layers 12 = 3
Porosity              12 = .49 .49 .49
Pore Size Distribution 12 = .42 .46 .46
Bubbling Pressure     12 = 1.84 1.71 .89
Field Capacity         12 = .21 .28 .28
Wilting Point         12 = .14 .22 .20
Bulk Density          12 = 1307. 1339. 1308.
Vertical Conductivity 12 = 5.20e-5 2.93e-5 2.55e-5
Thermal Conductivity  12 = 7.114 6.923 7.0
Thermal Capacity      12 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
Mannings n            12 = 0.013

```

```

\#
\# SOIL 13
\#

```

```

Soil Description      13 = Argilossolo vermelho-amarelo Eutrofico (7 do kenya)
Lateral Conductivity  13 = 2.71e-05
Exponential Decrease  13 = 0.14
Depth Threshold       13 = 0.5 \# If this value is set to be zero, linear transmissivity decays
                        \# applies unless water table is higher than soil depth. If this
                        \# value is very large (e.g. > 100), only exponential transmissivity
                        \# decay applies just like the older versions.
Maximum Infiltration  13 = 0.0000005
Capillary Drive        13 = 0.09
Surface Albedo         13 = 0.17
Number of Soil Layers 13 = 3
Porosity              13 = .54 .53 .51
Pore Size Distribution 13 = .35 .38 .35
Bubbling Pressure     13 = 1.01 .62 .63
Field Capacity         13 = .31 .33 .31
Wilting Point         13 = .23 .25 .22
Bulk Density          13 = 1133. 1210. 1275.
Vertical Conductivity 13 = 3.20e-5 1.99e-5 2.32e-5

```

Thermal Conductivity 13 = 7.114 6.923 7.0
 Thermal Capacity 13 = 1.4e6 1.4e6 1.4e6
 Mannings n 13 = 0.013

\#
 \# VEGETATION INFORMATION SECTION
 \#

[VEGETATION]

Vegetation Map File = ../input/veg.bin

Number of Vegetation Types = 22 \# Number of different vegetation types

\#
 \# SOIL 1
 \#

Vegetation Description 1 = Pastagem
 Impervious Fraction 1 = 0.0
 Detention Fraction 1 = 0.0
 Detention Decay 1 = 0.0
 Overstory Present 1 = FALSE
 Understory Present 1 = TRUE
 Fractional Coverage 1 =
 Hemi Fract Coverage 1 =
 Trunk Space 1 =
 Aerodynamic Attenuation 1 =
 Radiation Attenuation 1 =
 Clumping Factor 1 = /* Required only if Canopy Radiation Attenuation == VARIABLE
 Leaf Angle A 1 = /* Required only if Canopy Radiation Attenuation == VARIABLE
 Leaf Angle B 1 = /* Required only if Canopy Radiation Attenuation == VARIABLE
 Scattering Parameter 1 = /* Required only if Canopy Radiation Attenuation == VARIABLE
 Max Snow Int Capacity 1 =
 Snow Interception Eff 1 =
 Mass Release Drip Ratio 1 =
 IMPERVIOUS SURFACE ROUTING FILE = ../output/surface.routing.txt
 Height 1 = 0.21
 Overstory Monthly LAI 1 =
 Understory Monthly LAI 1 = 1.59 1.51 1.56 1.78 1.83 1.65 1.51 1.35 1.29 1.09 1.17 1.52
 Maximum Resistance 1 = 5000.
 Minimum Resistance 1 = 125.
 Moisture Threshold 1 = 0.18
 Vapor Pressure Deficit 1 = 4202
 Rpc 1 = 0.51
 Overstory Monthly Alb 1 =
 Understory Monthly Alb 1 = 0.17 0.17 0.16 0.15 0.15 0.16 0.16 0.15 0.18 0.16 0.17 0.16
 Number of Root Zones 1 = 3
 Root Zone Depths 1 = 0.28 0.30 0.20
 Overstory Root Fraction 1 =
 Understory Root Fraction 1 = 0.9994 0.0006 0.00

\#
 \# SOIL 1
 \#

Vegetation Description 2 = Outros (Como area Edificada)
 Impervious Fraction 2 = 0.99
 Detention Fraction 2 = 0.0
 Detention Decay 2 = 0.0


```

Understory Monthly Alb  3 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones    3 = 3
Root Zone Depths        3 = 0.25 0.40 0.30
Overstory Root Fraction 3 =
Understory Root Fraction 3 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description  4 = Cultivo Agricola - Abacaxi (Como Cafe)
Impervious Fraction     4 = 0.0
Detention Fraction      4 = 0.0
Detention Decay         4 = 0.0
Overstory Present       4 = FALSE
Understory Present      4 = TRUE
Fractional Coverage     4 =
Hemi Fract Coverage     4 =
Clumping Factor         4 =
Leaf Angle A            4 =
Leaf Angle B            4 =
Scattering Parameter    4 =
Trunk Space             4 =
Aerodynamic Attenuation 4 =
Radiation Attenuation  4 =
Max Snow Int Capacity   4 =
Snow Interception Eff   4 =
Mass Release Drip Ratio 4 =
Height                  4 = 0.70
Overstory Monthly LAI   4 =
Understory Monthly LAI 4 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59
Maximum Resistance      4 = 5000
Minimum Resistance      4 = 175
Moisture Threshold      4 = 0.26
Vapor Pressure Deficit  4 = 3636
Rpc                     4 = 0.53
Overstory Monthly Alb   4 =
Understory Monthly Alb  4 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones    4 = 3
Root Zone Depths        4 = 0.25 1.18 0.87
Overstory Root Fraction 4 =
Understory Root Fraction 4 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description  5 = Cultivo Agricola - Outros Cultivos Temporarios (Como Cafe)
Impervious Fraction     5 = 0.0
Detention Fraction      5 = 0.0
Detention Decay         5 = 0.0
Overstory Present       5 = FALSE
Understory Present      5 = TRUE
Fractional Coverage     5 =
Hemi Fract Coverage     5 =
Clumping Factor         5 =
Leaf Angle A            5 =
Leaf Angle B            5 =
Scattering Parameter    5 =
Trunk Space             5 =

```

```

Aerodynamic Attenuation 5 =
Radiation Attenuation 5 =
Max Snow Int Capacity 5 =
Snow Interception Eff 5 =
Mass Release Drip Ratio 5 =
Height 5 = 2.00
Overstory Monthly LAI 5 =
Understory Monthly LAI 5 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59
Maximum Resistance 5 = 5000
Minimum Resistance 5 = 175
Moisture Threshold 5 = 0.26
Vapor Pressure Deficit 5 = 3636
Rpc 5 = 0.53
Overstory Monthly Alb 5 =
Understory Monthly Alb 5 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones 5 = 3
Root Zone Depths 5 = 0.25 0.60 0.50
Overstory Root Fraction 5 =
Understory Root Fraction 5 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description 6 = Reflorestamento - Eucalipto
Impervious Fraction 6 = 0.0
Detention Fraction 6 = 0.0
Detention Decay 6 = 0.0
Overstory Present 6 = TRUE
Understory Present 6 = FALSE
Fractional Coverage 6 = 0.44
Hemi Fract Coverage 6 =
Clumping Factor 6 =
Leaf Angle A 6 =
Leaf Angle B 6 =
Scattering Parameter 6 =
Trunk Space 6 = 0.7
Aerodynamic Attenuation 6 = 2.50
Radiation Attenuation 6 = 0.50
Max Snow Int Capacity 6 = 0.03
Snow Interception Eff 6 = 0.6
Mass Release Drip Ratio 6 = 0.4
Height 6 = 22.0
Overstory Monthly LAI 6 = 3.84 4.14 3.86 4.51 4.37 4.39 4.37 3.97 3.88 2.73 2.61 3.32
Understory Monthly LAI 6 =
Maximum Resistance 6 = 5000
Minimum Resistance 6 = 125
Moisture Threshold 6 = 0.19
Vapor Pressure Deficit 6 = 2128
Rpc 6 = 0.70
Overstory Monthly Alb 6 = 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13
Understory Monthly Alb 6 =
Number of Root Zones 6 = 3
Root Zone Depths 6 = 0.28 0.50 0.30
Overstory Root Fraction 6 = 0.58 0.42 0.004
Understory Root Fraction 6 =

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description      7 = Brejo (Mesmo da Macega)
Impervious Fraction         7 = 0.0
Detention Fraction          7 = 0.0
Detention Decay              7 = 0.0
Overstory Present           7 = FALSE
Understory Present          7 = TRUE
Fractional Coverage         7 =
Hemi Fract Coverage         7 =
Clumping Factor             7 =
Leaf Angle A                 7 =
Leaf Angle B                 7 =
Scattering Parameter        7 =
Trunk Space                  7 =
Aerodynamic Attenuation     7 =
Radiation Attenuation       7 =
Max Snow Int Capacity       7 =
Snow Interception Eff       7 =
Mass Release Drip Ratio     7 =
Height                       7 = 0.33
Overstory Monthly LAI       7 =
Understory Monthly LAI     7 = 1.67 1.95 1.78 2.01 2.01 1.92 1.87 1.68 1.71 1.42 1.31 1.62
Maximum Resistance          7 = 5000
Minimum Resistance          7 = 165
Moisture Threshold          7 = 0.20
Vapor Pressure Deficit      7 = 4202
Rpc                           7 = 0.53
Overstory Monthly Alb       7 =
Understory Monthly Alb     7 = 0.14 0.14 0.14 0.14 0.13 0.14 0.14 0.13 0.15 0.14 0.14 0.13
Number of Root Zones        7 = 3
Root Zone Depths            7 = 0.28 0.90 0.70
Overstory Root Fraction     7 =
Understory Root Fraction    7 = 0.9996 0.00039 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description      8 = Cultivo Agricola - Cafe
Impervious Fraction         8 = 0.0
Detention Fraction          8 = 0.0
Detention Decay              8 = 0.0
Overstory Present           8 = FALSE
Understory Present          8 = TRUE
Fractional Coverage         8 =
Hemi Fract Coverage         8 =
Clumping Factor             8 =
Leaf Angle A                 8 =
Leaf Angle B                 8 =
Scattering Parameter        8 =
Trunk Space                  8 =
Aerodynamic Attenuation     8 =
Radiation Attenuation       8 =
Max Snow Int Capacity       8 =
Snow Interception Eff       8 =
Mass Release Drip Ratio     8 =
Height                       8 = 2.70
Overstory Monthly LAI       8 =
Understory Monthly LAI     8 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59
Maximum Resistance          8 = 5000

```

```

Minimum Resistance      8 = 175
Moisture Threshold     8 = 0.26
Vapor Pressure Deficit 8 = 3636
Rpc                    8 = 0.53
Overstory Monthly Alb  8 =
Understory Monthly Alb 8 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones   8 = 3
Root Zone Depths       8 = 0.25 0.50 0.40
Overstory Root Fraction 8 =
Understory Root Fraction 8 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description 9 = Mata nativa em estado inicial de regeneracao (mesmo da Mata Nativa) (FO
Impervious Fraction     9 = 0.0
Detention Fraction      9 = 0.0
Detention Decay         9 = 0.0
Overstory Present       9 = TRUE
Understory Present      9 = TRUE
Fractional Coverage     9 = 0.61
Hemi Fract Coverage     9 =
Clumping Factor         9 =
Leaf Angle A            9 =
Leaf Angle B            9 =
Scattering Parameter    9 =
Trunk Space             9 = 0.5
Aerodynamic Attenuation 9 = 2.50
Radiation Attenuation   9 = 0.70
Max Snow Int Capacity   9 = 0.03
Snow Interception Eff   9 = 0.6
Mass Release Drip Ratio 9 = 0.4
Height                  9 = 18.00 2.59
Overstory Monthly LAI   9 = 2.94 3.13 3.12 3.60 3.54 3.43 3.33 2.98 3.06 2.38 2.17 2.92
Understory Monthly LAI 9 = 0.0042 0.0045 0.0045 0.0052 0.0051 0.0049 0.0048 0.0043 0.0044 0.0034 0
Maximum Resistance      9 = 5000 2788
Minimum Resistance      9 = 153 153
Moisture Threshold      9 = 0.20 0.21
Vapor Pressure Deficit 9 = 3663 3663
Rpc                     9 = 0.64 0.00093
Overstory Monthly Alb   9 = 0.14 0.13 0.12 0.12 0.11 0.11 0.12 0.11 0.14 0.12 0.14 0.13
Understory Monthly Alb 9 = 0.00020 0.00018 0.00017 0.00018 0.00016 0.00016 0.00017 0.00017 0.00019
Number of Root Zones    9 = 3
Root Zone Depths        9 = 0.25 0.30 0.20
Overstory Root Fraction 9 = 0.58 0.38 0.04
Understory Root Fraction 9 = 0.40 0.60 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description 10 = Macega
Impervious Fraction     10 = 0.0
Detention Fraction      10 = 0.0
Detention Decay         10 = 0.0
Overstory Present       10 = FALSE
Understory Present      10 = TRUE
Fractional Coverage     10 =
Hemi Fract Coverage     10 =

```

```

Clumping Factor          10 =
Leaf Angle A             10 =
Leaf Angle B             10 =
Scattering Parameter    10 =
Trunk Space              10 =
Aerodynamic Attenuation 10 =
Radiation Attenuation   10 =
Max Snow Int Capacity   10 =
Snow Interception Eff   10 =
Mass Release Drip Ratio 10 =
Height                   10 = 0.33
Overstory Monthly LAI   10 =
Understory Monthly LAI  10 = 1.67 1.95 1.78 2.01 2.01 1.92 1.87 1.68 1.71 1.42 1.31 1.62
Maximum Resistance      10 = 5000
Minimum Resistance      10 = 165
Moisture Threshold      10 = 0.20
Vapor Pressure Deficit  10 = 4202
Rpc                      10 = 0.53
Overstory Monthly Alb   10 =
Understory Monthly Alb  10 = 0.14 0.14 0.14 0.14 0.13 0.14 0.14 0.13 0.15 0.14 0.14 0.13
Number of Root Zones    10 = 3
Root Zone Depths        10 = 0.33 0.33 0.01
Overstory Root Fraction 10 =
Understory Root Fraction 10 = 0.9996 0.00039 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description  11 = Massa D'agua
Impervious Fraction     11 = 0.0
Detention Fraction      11 = 0.0
Detention Decay         11 = 0.0
Overstory Present       11 = FALSE
Understory Present      11 = FALSE
Fractional Coverage     11 =
Hemi Fract Coverage     11 =
Clumping Factor         11 =
Leaf Angle A            11 =
Leaf Angle B            11 =
Scattering Parameter    11 =
Trunk Space             11 =
Aerodynamic Attenuation 11 =
Radiation Attenuation   11 =
Max Snow Int Capacity   11 =
Snow Interception Eff   11 =
Mass Release Drip Ratio 11 =
Height                   11 =
Overstory Monthly LAI   11 =
Understory Monthly LAI  11 =
Maximum Resistance      11 =
Minimum Resistance      11 =
Moisture Threshold      11 =
Vapor Pressure Deficit  11 =
Rpc                      11 =
Overstory Monthly Alb   11 =
Understory Monthly Alb  11 =
Number of Root Zones    11 = 3
Root Zone Depths        11 = 0.25 0.90 0.70
Overstory Root Fraction 11 =

```

Understory Root Fraction 11 =

\#

\# SOIL 1

\#

Vegetation Description 12 = Mata Nativa (FODFSM)
 Impervious Fraction 12 = 0.0
 Detention Fraction 12 = 0.0
 Detention Decay 12 = 0.0
 Overstory Present 12 = TRUE
 Understory Present 12 = TRUE
 Fractional Coverage 12 = 0.61
 Hemi Fract Coverage 12 =
 Clumping Factor 12 =
 Leaf Angle A 12 =
 Leaf Angle B 12 =
 Scattering Parameter 12 =
 Trunk Space 12 = 0.6
 Aerodynamic Attenuation 12 = 2.50
 Radiation Attenuation 12 = 0.70
 Max Snow Int Capacity 12 = 0.03
 Snow Interception Eff 12 = 0.6
 Mass Release Drip Ratio 12 = 0.4
 Height 12 = 20.00 2.59
 Overstory Monthly LAI 12 = 2.94 3.13 3.12 3.60 3.54 3.43 3.33 2.98 3.06 2.38 2.17 2.92
 Understory Monthly LAI 12 = 0.0042 0.0045 0.0045 0.0052 0.0051 0.0049 0.0048 0.0043 0.0044 0.0034 0
 Maximum Resistance 12 = 5000 2788
 Minimum Resistance 12 = 153 153
 Moisture Threshold 12 = 0.20 0.21
 Vapor Pressure Deficit 12 = 3663 3663
 Rpc 12 = 0.64 0.00093
 Overstory Monthly Alb 12 = 0.14 0.13 0.12 0.12 0.11 0.11 0.12 0.11 0.14 0.12 0.14 0.13
 Understory Monthly Alb 12 = 0.00020 0.00018 0.00017 0.00018 0.00016 0.00016 0.00017 0.00017 0.00019
 Number of Root Zones 12 = 3
 Root Zone Depths 12 = 0.25 0.30 0.20
 Overstory Root Fraction 12 = 0.58 0.38 0.04
 Understory Root Fraction 12 = 0.40 0.60 0.00

\#

\# SOIL 1

\#

Vegetation Description 13 = Solo Exposto (mesmo da Massa D'agua)
 Impervious Fraction 13 = 0.0
 Detention Fraction 13 = 0.0
 Detention Decay 13 = 0.0
 Overstory Present 13 = FALSE
 Understory Present 13 = FALSE
 Fractional Coverage 13 =
 Hemi Fract Coverage 13 =
 Clumping Factor 13 =
 Leaf Angle A 13 =
 Leaf Angle B 13 =
 Scattering Parameter 13 =
 Trunk Space 13 =
 Aerodynamic Attenuation 13 =
 Radiation Attenuation 13 =
 Max Snow Int Capacity 13 =
 Snow Interception Eff 13 =

```

Mass Release Drip Ratio 13 =
Height 13 =
Overstory Monthly LAI 13 =
Understory Monthly LAI 13 =
Maximum Resistance 13 =
Minimum Resistance 13 =
Moisture Threshold 13 =
Vapor Pressure Deficit 13 =
Rpc 13 =
Overstory Monthly Alb 13 =
Understory Monthly Alb 13 =
Number of Root Zones 13 = 3
Root Zone Depths 13 = 0.01 0.01 0.01
Overstory Root Fraction 13 =
Understory Root Fraction 13 =

\#
\# SOIL 1
\#

Vegetation Description 14 = Afloramento Rochoso (mesmo da Massa D'agua)
Impervious Fraction 14 = 0.0
Detention Fraction 14 = 0.0
Detention Decay 14 = 0.0
Overstory Present 14 = FALSE
Understory Present 14 = FALSE
Fractional Coverage 14 =
Hemi Fract Coverage 14 =
Clumping Factor 14 =
Leaf Angle A 14 =
Leaf Angle B 14 =
Scattering Parameter 14 =
Trunk Space 14 =
Aerodynamic Attenuation 14 =
Radiation Attenuation 14 =
Max Snow Int Capacity 14 =
Snow Interception Eff 14 =
Mass Release Drip Ratio 14 =
Height 14 =
Overstory Monthly LAI 14 =
Understory Monthly LAI 14 =
Maximum Resistance 14 =
Minimum Resistance 14 =
Moisture Threshold 14 =
Vapor Pressure Deficit 14 =
Rpc 14 =
Overstory Monthly Alb 14 =
Understory Monthly Alb 14 =
Number of Root Zones 14 = 3
Root Zone Depths 14 = 0.25 0.10 0.10
Overstory Root Fraction 14 =
Understory Root Fraction 14 =

\#
\# SOIL 1
\#

Vegetation Description 15 = Cultivo Agricola - Banana (Como Cafe)
Impervious Fraction 15 = 0.0
Detention Fraction 15 = 0.0

```

```

Detention Decay          15 = 0.0
Overstory Present       15 = FALSE
Understory Present      15 = TRUE
Fractional Coverage     15 =
Hemi Fract Coverage     15 =
Clumping Factor         15 =
Leaf Angle A            15 =
Leaf Angle B            15 =
Scattering Parameter    15 =
Trunk Space             15 =
Aerodynamic Attenuation 15 =
Radiation Attenuation  15 =
Max Snow Int Capacity   15 =
Snow Interception Eff   15 =
Mass Release Drip Ratio 15 =
Height                  15 = 2.70
Overstory Monthly LAI   15 =
Understory Monthly LAI 15 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59
Maximum Resistance      15 = 5000
Minimum Resistance      15 = 175
Moisture Threshold      15 = 0.26
Vapor Pressure Deficit  15 = 3636
Rpc                     15 = 0.53
Overstory Monthly Alb   15 =
Understory Monthly Alb 15 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones    15 = 3
Root Zone Depths        15 = 0.25 0.80 0.60
Overstory Root Fraction 15 =
Understory Root Fraction 15 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description  16 = Cultivo Agricola – Coco da Bahia (como cafe)
Impervious Fraction     16 = 0.0
Detention Fraction      16 = 0.0
Detention Decay         16 = 0.0
Overstory Present       16 = FALSE
Understory Present      16 = TRUE
Fractional Coverage     16 =
Hemi Fract Coverage     16 =
Clumping Factor         16 =
Leaf Angle A            16 =
Leaf Angle B            16 =
Scattering Parameter    16 =
Trunk Space             16 =
Aerodynamic Attenuation 16 =
Radiation Attenuation  16 =
Max Snow Int Capacity   16 =
Snow Interception Eff   16 =
Mass Release Drip Ratio 16 =
Height                  16 = 2.70
Overstory Monthly LAI   16 =
Understory Monthly LAI 16 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59
Maximum Resistance      16 = 5000
Minimum Resistance      16 = 175
Moisture Threshold      16 = 0.26
Vapor Pressure Deficit  16 = 3636
Rpc                     16 = 0.53

```

```

Overstory Monthly Alb      16 =
Understory Monthly Alb    16 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones      16 = 3
Root Zone Depths          16 = 0.25 0.60 0.40
Overstory Root Fraction   16 =
Understory Root Fraction  16 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description    17 = Extracao Mineracao (mesmo da Massa D'agua)
Impervious Fraction       17 = 0.0
Detention Fraction        17 = 0.0
Detention Decay           17 = 0.0
Overstory Present         17 = FALSE
Understory Present        17 = FALSE
Fractional Coverage       17 =
Hemi Fract Coverage       17 =
Clumping Factor           17 =
Leaf Angle A              17 =
Leaf Angle B              17 =
Scattering Parameter      17 =
Trunk Space               17 =
Aerodynamic Attenuation   17 =
Radiation Attenuation     17 =
Max Snow Int Capacity     17 =
Snow Interception Eff     17 =
Mass Release Drip Ratio   17 =
Height                    17 =
Overstory Monthly LAI     17 =
Understory Monthly LAI    17 =
Maximum Resistance        17 =
Minimum Resistance        17 =
Moisture Threshold        17 =
Vapor Pressure Deficit    17 =
Rpc                       17 =
Overstory Monthly Alb     17 =
Understory Monthly Alb    17 =
Number of Root Zones      17 = 3
Root Zone Depths          17 = 0.25 0.70 0.50
Overstory Root Fraction   17 =
Understory Root Fraction  17 =

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description    18 = Reflorestamento - Pinus (mesmo do Eucalipito)
Impervious Fraction       18 = 0.0
Detention Fraction        18 = 0.0
Detention Decay           18 = 0.0
Overstory Present         18 = TRUE
Understory Present        18 = FALSE
Fractional Coverage       18 = 0.44
Hemi Fract Coverage       18 =
Clumping Factor           18 =
Leaf Angle A              18 =
Leaf Angle B              18 =
Scattering Parameter      18 =

```

```

Trunk Space          18 = 0.6
Aerodynamic Attenuation 18 = 2.50
Radiation Attenuation 18 = 0.50
Max Snow Int Capacity 18 = 0.03
Snow Interception Eff 18 = 0.6
Mass Release Drip Ratio 18 = 0.4
Height              18 = 22.0
Overstory Monthly LAI 18 = 3.84 4.14 3.86 4.51 4.37 4.39 4.37 3.97 3.88 2.73 2.61 3.32
Understory Monthly LAI 18 =
Maximum Resistance   18 = 5000
Minimum Resistance   18 = 125
Moisture Threshold   18 = 0.19
Vapor Pressure Deficit 18 = 2128
Rpc                  18 = 0.70
Overstory Monthly Alb 18 = 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13
Understory Monthly Alb 18 =
Number of Root Zones 18 = 3
Root Zone Depths     18 = 0.28 0.60 0.40
Overstory Root Fraction 18 = 0.58 0.42 0.004
Understory Root Fraction 18 =

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description 19 = Campo Rupestre/Altitude (FODFAM)
Impervious Fraction     19 = 0.0
Detention Fraction      19 = 0.0
Detention Decay         19 = 0.0
Overstory Present       19 = TRUE
Understory Present      19 = TRUE
Fractional Coverage     19 = 0.84
Hemi Fract Coverage     19 =
Clumping Factor         19 =
Leaf Angle A            19 =
Leaf Angle B            19 =
Scattering Parameter    19 =
Trunk Space             19 = 0.5
Aerodynamic Attenuation 19 = 2.50
Radiation Attenuation  19 = 0.70
Max Snow Int Capacity   19 = 0.03
Snow Interception Eff   19 = 0.6
Mass Release Drip Ratio 19 = 0.4
Height                  19 = 6.33 0.91
Overstory Monthly LAI   19 = 3.18 3.26 3.04 4.00 3.64 3.84 4.04 3.98 3.75 2.47 2.31 2.91
Understory Monthly LAI 19 = 0.0046 0.0047 0.0044 0.0058 0.0053 0.0055 0.0058 0.0057 0.0054 0.0036 0
Maximum Resistance     19 = 5000 2788
Minimum Resistance     19 = 153 153
Moisture Threshold     19 = 0.27 0.28
Vapor Pressure Deficit 19 = 3663 3663
Rpc                    19 = 0.63 0.00091
Overstory Monthly Alb  19 = 0.11 0.11 0.10 0.11 0.09 0.10 0.10 0.09 0.10 0.10 0.11 0.11
Understory Monthly Alb 19 = 0.00016 0.00016 0.00015 0.00015 0.00013 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014 0.00014
Number of Root Zones   19 = 3
Root Zone Depths       19 = 0.25 0.30 0.20
Overstory Root Fraction 19 = 0.55 0.40 0.04
Understory Root Fraction 19 = 0.40 0.60 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1

```

\#

```

Vegetation Description 20 = Area Edificada
Impervious Fraction    20 = 0.99
Detention Fraction     20 = 0.0
Detention Decay        20 = 0.0
Overstory Present      20 = FALSE
Understory Present     20 = TRUE
Fractional Coverage    20 =
Hemi Fract Coverage    20 =
Clumping Factor        20 =
Leaf Angle A           20 =
Leaf Angle B           20 =
Scattering Parameter   20 =
Trunk Space            20 =
Aerodynamic Attenuation 20 =
Radiation Attenuation  20 =
Max Snow Int Capacity  20 =
Snow Interception Eff  20 =
Mass Release Drip Ratio 20 =
Height                 20 = 0.2
Overstory Monthly LAI  20 =
Understory Monthly LAI 20 = 0.96 0.96 1.01 1.09 1.08 0.97 0.91 0.78 0.80 0.70 0.78 0.91
Maximum Resistance     20 = 3000.
Minimum Resistance     20 = 340.
Moisture Threshold     20 = 0.19
Vapor Pressure Deficit 20 = 4000
Rpc                    20 = .108
Overstory Monthly Alb  20 =
Understory Monthly Alb 20 = 0.21 0.20 0.18 0.16 0.17 0.18 0.18 0.18 0.21 0.18 0.21 0.19
Number of Root Zones   20 = 3
Root Zone Depths       20 = 0.28 1.00 1.00
Overstory Root Fraction 20 =
Understory Root Fraction 20 = 0.44 0.30 0.02

```

\#

\# SOIL 1

\#

```

Vegetation Description 21 = Cultivo Agricola - Cana de Acucar (como cafe)
Impervious Fraction    21 = 0.0
Detention Fraction     21 = 0.0
Detention Decay        21 = 0.0
Overstory Present      21 = FALSE
Understory Present     21 = TRUE
Fractional Coverage    21 =
Hemi Fract Coverage    21 =
Clumping Factor        21 =
Leaf Angle A           21 =
Leaf Angle B           21 =
Scattering Parameter   21 =
Trunk Space            21 =
Aerodynamic Attenuation 21 =
Radiation Attenuation  21 =
Max Snow Int Capacity  21 =
Snow Interception Eff  21 =
Mass Release Drip Ratio 21 =
Height                 21 = 2.00
Overstory Monthly LAI  21 =
Understory Monthly LAI 21 = 1.69 1.69 1.67 2.03 2.10 1.97 1.88 1.67 1.62 1.18 1.18 1.59

```

```

Maximum Resistance      21 = 5000
Minimum Resistance      21 = 175
Moisture Threshold      21 = 0.26
Vapor Pressure Deficit  21 = 3636
Rpc                     21 = 0.53
Overstory Monthly Alb   21 =
Understory Monthly Alb  21 = 0.15 0.15 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.14 0.15 0.14 0.16 0.15
Number of Root Zones    21 = 3
Root Zone Depths        21 = 0.25 1.18 0.87
Overstory Root Fraction 21 =
Understory Root Fraction 21 = 0.43 0.57 0.00

```

```

\#
\# SOIL 1
\#

```

```

Vegetation Description  22 = Reflorestamento - Seringueira (mesmo do Eucalipito)
Impervious Fraction     22 = 0.0
Detention Fraction      22 = 0.0
Detention Decay         22 = 0.0
Overstory Present       22 = TRUE
Understory Present      22 = FALSE
Fractional Coverage     22 = 0.44
Hemi Fract Coverage     22 =
Clumping Factor         22 =
Leaf Angle A            22 =
Leaf Angle B            22 =
Scattering Parameter    22 =
Trunk Space             22 = 0.5
Aerodynamic Attenuation 22 = 2.50
Radiation Attenuation   22 = 0.50
Max Snow Int Capacity   22 = 0.03
Snow Interception Eff   22 = 0.6
Mass Release Drip Ratio 22 = 0.4
Height                  22 = 22.0
Overstory Monthly LAI   22 = 3.84 4.14 3.86 4.51 4.37 4.39 4.37 3.97 3.88 2.73 2.61 3.32
Understory Monthly LAI  22 =
Maximum Resistance      22 = 5000
Minimum Resistance      22 = 125
Moisture Threshold      22 = 0.19
Vapor Pressure Deficit  22 = 2128
Rpc                     22 = 0.70
Overstory Monthly Alb   22 = 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13
Understory Monthly Alb  22 =
Number of Root Zones    22 = 3
Root Zone Depths        22 = 0.28 0.90 0.70
Overstory Root Fraction 22 = 0.58 0.42 0.004
Understory Root Fraction 22 =

```

```

\#
\# MODEL OUTPUT SECTION
\#

```

```

[OUTPUT]                                     \# Information what to output when
Output Directory = ../output/
Initial State Directory = ../modelstate/

```

```

\#
\# PIXEL DUMPS
\#

Number of Output Pixels      = 0

\# For each pixel make a key-entry pair as indicated below, varying the
\# number for the output pixel (1, .. , Number of Output Pixel)

North Coordinate            1 = 7754706.34
East Coordinate             1 = 234902.66
Name                       1 = PAINEIRAS\_MOD

\#
\# MODEL STATE
\#
Number of Model States      = 1          \# Number of model states to dump

\# For each model state make a key-entry pair as indicated below, varying the
\# number for the model state dump (1, .. , Number of Model States)

\#State Date                1 = 01/01/2008-00
State Date                  1 = 12/31/2011-00

\#
\# MODEL MAPS
\#
Number of Map Variables     = 0          \# Number of different variables for
\# which you want to output maps

\# For each of the variables make a block like the one that follows, varying
\# the number of the variable (n = 1, .. , Number of Map Variables)

Map Variable                1 =          \# water table depth
Map Layer                   1 = 1
Number of Maps              1 = 1

Map Date 1                  1 = 12/31/2011-00

\#
\# MODEL IMAGES
\#

Number of Image Variables   = 0          \# Number of variables for which you
\# would like to output images

\# For each of the variables make a block like the one that follows, varying
\# the number of the variable (n = 1, .. , Number of Image Variables)

Image Variable              1 = 801      \# ID of the variable to output
Image Layer                 1 = 1        \# If the variable exists for a number
\# of layers, spec

Image Start                 1 = 12/31/2011-00 \# First timestep for which to output an image

Image End                   1 = 12/31/2011-00 \# Last timestep for which to output an image

```

```

Image Interval      1 =          \# Time interval between images (hours)
Image Upper Limit  1 =          \# All values in the output equal to or
                                \# greater than this limit will be set
                                \# to 255
Image Lower Limit   1 =          \# All values in the output equal to or
                                \# smaller than this limit will be set
                                \# to 0

\#
\# GRAPHIC IMAGES
\#

Number of Graphics      = 0          \# Number of variables for which you
                                \# would like to output images
Graphics ID             1 = 7        \# ID of the variable to output
Graphics ID             2 = 4
Graphics ID             3 = 16
Graphics ID             4 = 15
Graphics ID             5 = 50
Graphics ID             6 = 29
Graphics ID             7 = 5
Graphics ID             8 = 6
Graphics ID             9 = 7
Graphics ID            10 = 9

\# 1   SWE (mm)
\# 2   Water Table Depth (mm)
\# 3   Digital Elevation Model (m)
\# 4   Vegetation Class (index \#)
\# 5   Soil Class (index \#)
\# 6   Soil Depth (mm)
\# 7   Precipitation at current time step (mm/time step)
\# 8   Incoming Shortwave (Beam and Diffuse) (W/sqm)
\# 9   Intercepted Snow (mm)
\# 10  Snow Surface Temp (C)
\# 11  Cold Content of snow entire snow pack (kJ)
\# 12  Snow Melt (as Outflow minus Precip, can be negative) (mm/time step)
\# 13  Snow Pack Outflow (mm/time step)
\# 14  Saturated Subsurface Flow (mm/time step)
\# 15  Overland Flow(mm)
\# 16  Total Evapotranspiration (soil + all veg layers)
\# 17  Ground Snow pack vapor flux (mm)
\# 18  Intercepted snow pack vapor flux (mm)
\# 19  Soil Moisture (Surface Layer) % of saturation (i.e. porosity)
\# 20  Soil Moisture (2nd Layer) % of saturation (i.e. porosity)
\# 21  Soil Moisture (3rd Layer) % of saturation (i.e. porosity)
\# 22  Accumulated Precip (mm)
\# 23  air temperature (C)
\# 24  wind speed (m/s)
\# 25  relative humidity
\# 26  Prism Precip Field (mm)
\# 31  Overstory Transpiration (mm)
\# 32  Understory Transpirtation (mm)
\# 33  Soil Evaporation (mm)
\# 34  Overstory Evaporation (mm)
\# 35  Understory Evaportation (mm)
\# 41  Sky View Factor (%)
\# 42  Shade Map (%)
\# 43  Direct Beam Shortwave Rad (W/sqm)

```

```
\# 44    Diffuse Beam Shortwave Rad (W/sqm)
\# 45    Aspect (degrees)
\# 46    Slope (percent)
\# 50    Channel Subsurface Interception (mm)
\# 51    Road Subsurface Interception (mm)
\# WARNING Use soil moisture layers with caution, to minimize calculations during redraw
\# DHSVM does not check to make sure that the assigned soil layer exists
```

```
\# END OF INPUT FILE
```

```
[End]                                     \# This is probably not needed, but
                                           \# just in case (to close the previous
                                           \# section)
```