

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO NA
PLATAFORMA DE MODELAGEM DINAMICA EGO**

Letícia Santos de Lima

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Donizete Faria

Co-orientador: Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares-Filho

Belo Horizonte,
Fevereiro de 2011

L732i Lima, Letícia Santos de.
2011 Implementação de um modelo hidrológico distribuído na
plataforma de modelagem Dinamica EGO [manuscrito] / Letícia
Santos de Lima. – 2011.
xiii, 95 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Instituto de Geociências, 2011.

Orientador: Sergio Donizete Faria.

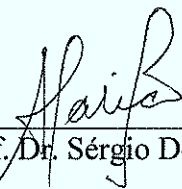
Co-orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.

Bibliografia: f. 88-95.

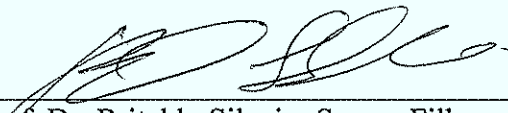
1. Hidrologia – Teses. 2. Solo – Uso – Teses. 3. Modelagem de
dados – Aspectos ambientais – Teses. 4. Sistemas de informação
geográfica – Teses. I. Faria, Sergio Donizete. II. Soares Filho,
Britaldo Silveira III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto
de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6

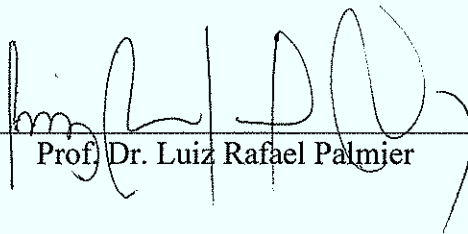
Dissertação defendida e aprovada, em 10 de fevereiro de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Sérgio Donizete Faria



Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares Filho



Prof. Dr. Luiz Rafael Palmier



Prof. Dr. Michael Thomas Coe

Dedico este trabalho a todas as pessoas que, de alguma forma, abrem mão de viver apenas em prol de seus interesses particulares para se dedicar a uma causa comum e maravilhosa: o bem estar de todos seres vivos, por uma convivência saudável na Terra.

Que todos os seres vivos sejam felizes, saudáveis e pacíficos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de coração a todos os que estiveram envolvidos na realização deste trabalho, direta ou indiretamente, na forma de auxílio prático ou mesmo apoio moral. Nada neste mundo se faz sozinho.

Em especial, eu sou imensamente grata:

- aos meus pais, pelo apoio permanente e fundamental, aos meus irmãos pelo carinho;
- ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Faria, por ter acompanhado todo o projeto e me auxiliado durante todo o mestrado;
- ao meu co-orientador, Prof. Dr. Britaldo Soares Filho, pela confiança no meu trabalho e no meu esforço, pela oportunidade da convivência no Centro de Sensoriamento Remoto – UFMG e de estagiar com os pesquisadores do Woods Hole Research Center, proporcionada por ele;
- ao Dr. Michael Coe, pela extrema gentileza e paciência ao me atender nas minhas solicitações para a solução de dúvidas, por ter disponibilizado dados de suas pesquisas, por ter me recebido tão bem em Woods Hole e pelos momentos divertidos que eu pude vivenciar em companhia dele e de seus colegas;
- aos meus amigos e parceiros de trabalho do Centro de Sensoriamento Remoto – UFMG, pela alegria da convivência, muitas risadas e aprendizado. Foi um grande prazer ter compartilhado tantos bons momentos com todos. Agradeço muito pelo auxílio permanente na solução de vários problemas práticos de modelagem, em especial, proporcionados pelo Hermann, Rafaela, Leandro (meu irmão!) e Bruno; Aline e Letícia Hissa pelo auxílio no geoprocessamento; Aline, novamente, pela companhia nas baladas! Agradeço também aos demais amigos do CSR: Renzo, Carol, Amanda, William e Rômulo;
- aos pesquisadores do Woods Hole Research Center pela recepção tão agradável que tive e pelo período maravilhoso que passei por lá; à Wendy, Paul e sua esposa Milene, que foram especialmente amáveis e solícitos durante a minha estadia no centro de pesquisa; Tracy Jones e Andrea Castanho, por terem sido tão gentis comigo;

A realização deste trabalho foi possível graças aos recursos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e da Gordon and Betty Moore Foundation.

RESUMO

Nas últimas décadas diversos estudos ambientais têm sido conduzidos no âmbito das mudanças de uso e cobertura da terra. Dentre os possíveis efeitos dessas mudanças figuram os impactos sobre o balanço hídrico de bacias hidrográficas. No estudo dessas consequências a Hidrologia associada a técnicas de modelagem assume papel fundamental, em especial, com os modelos hidrológicos distribuídos, ou seja, modelos que consideram a distribuição espacial das variáveis em estudo. Um modelo hidrológico desenvolvido nessa perspectiva permite a associação de dados hidrológicos com os demais atributos geográficos, facilitando o estudo da inter-relação entre os agentes e processos de transformação do espaço e as variáveis hidrológicas. Para prever impactos das mudanças de uso da terra no balanço hídrico, é necessário recorrer ao acoplamento entre modelos de uso e cobertura da terra, modelos ecossistêmicos e modelos hidrológicos. Acoplar modelos exige do usuário certa familiaridade com diferentes linguagens de programação. A construção e compreensão de modelos, bem como o acoplamento entre eles, pode ser favorecida pelo uso de plataformas de modelagem com interfaces amigáveis, como, por exemplo, o Dinamica EGO. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma versão de um modelo hidrológico distribuído implementada na plataforma de modelagem Dinamica EGO, com o objetivo de facilitar seu acesso e uso por meio dos recursos visuais que permitem a manipulação e execução de modelos a partir de uma linguagem gráfica. Além disso, a versão implementada no Dinamica EGO facilita a integração desse modelo com os modelos de mudanças de uso e cobertura da terra já implementados na plataforma. Essa versão foi validada com base em uma simulação hidrológica para a bacia do rio Madeira para o período entre 1970 e 1999 e os resultados foram comparados com observações de dezoito estações fluviométricas. As vazões anuais simuladas apresentam boa concordância com as vazões observadas. As vazões mensais, bem como a distribuição das áreas alagadas na bacia, apresentam relativa concordância com os dados observados.

Palavras-chaves: Hidrologia, modelagem ambiental, mudanças de uso da terra.

ABSTRACT

In the last decades several environmental studies related to the land use and cover change (LUCC) have been carried out. Among the possible effects of the LUCC one can mention the impacts on water balance of watersheds. The Hydrology associated to modeling techniques plays an important role on these studies. Specially, the distributed hydrologic models are very useful, as they consider the spatial distribution of the variables. A hydrologic model developed on a distributed perspective enables the association between hydrological data and geographic attributes, making it easier to study the relationships among agents and processes of a changing terrestrial surface and the hydrological variables. To predict LUCC impacts on water balance, it's necessary to use an association of LUCC, ecosystem and hydrological models. Coupling models requires the user to be accustomed to different programming languages. The design of a model, as the model coupling, can be facilitated by using friendly interfaces modeling platforms, such as, the Dinamica EGO software. In this context, this text presents a version of a distributed hydrologic model (Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB) designed on Dinamica EGO modeling platform, aiming to facilitate the access to hydrologic models and its use through the visual resources that enables designing and running models using a graphic interface. Besides, the version of the model built on Dinamica EGO will enable coupling this model with the LUCC models already available on that software. The Dinamica EGO version of THMB was tested through a hydrologic simulation for the Madeira river basin for the period 1970 – 1999 and the results were compared to data from eighteen gauge stations. The simulated annual mean discharges show good agreement with the observed data. The monthly mean discharges, as the floodplain spatial distribution, show relative agreement with the observed data.

Keywords: Hydrology, environmental modeling, land use and cover changes.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	3
1.2 Organização do texto.....	3
2 MODELAGEM HIDROLÓGICA	4
2.1 Modelagem de sistemas ambientais	4
2.2 Modelagem hidrológica.....	8
2.2.1 Modelos hidrológicos distribuídos.....	11
2.2.1.1 Modelos de propagação de vazões.....	12
2.2.1.2 Modelos para planícies de inundação	13
2.2.1.3 Fontes de dados para modelos hidrológicos distribuídos	16
2.2.2 Modelo hidrológico em estudo: THMB.....	18
2.2.2.1 Balanço hídrico vertical	21
2.2.2.2 Modelagem dos processos fluviais	23
2.2.2.3 Planícies de inundação	27
2.2.2.4 Parâmetros do modelo	30
2.2.2.5 Tratamento de dados	31
3 PLATAFORMAS DE MODELAGEM	36
3.1 Dinamica EGO	37
4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO	40
4.1 Tratamento dos dados de entrada	40
4.2 Iterações temporais.....	43
4.3 Operações matemáticas no Dinamica EGO	45
4.4 Implementação de um reservatório linear	47
4.5 Cálculo da vazão e direções de fluxo	50

4.6	Armazenamento dos dados produzidos	53
5	VALIDAÇÃO DO MODELO: BACIA DO RIO MADEIRA	56
5.1	Caracterização da bacia do rio Madeira	56
5.2	Dados de entrada para a simulação	58
5.3	Dados de precipitação	65
5.4	Resultados da simulação	66
5.4.1	Vazões anuais	66
5.4.2	Vazões mensais	67
5.4.3	Comparação das vazões entre as versões do THMB	74
5.4.4	Simulação das planícies de inundação	75
5.4.5	Simulação dos níveis d'água nas planícies de inundação	79
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
2.1 – Fluxograma geral do modelo THMB	20
2.2 – Escoamento superficial e drenagem sub-superficial na célula	24
2.3 – Reservatório fluvial e seus componentes no modelo THMB	25
2.4 – Fluxograma do tratamento dos dados de caracterização da superfície.....	32
2.5 – (a) Direções possíveis de fluxo; (b) representação em potência de 2; (c) representação no THMB	33
3.1 – Interface gráfica do Dinamica EGO	39
3.2 – Visualizador de imagens do software Dinamica EGO	39
4.1 – Exemplo de implementação de iterações temporais no modelo THMB – versão FORTRAN	44
4.2 – Exemplo de estruturação e implementação de iterações temporais no Dinamica EGO	44
4.3 – Exemplo código FORTRAN para execução de operações algébricas	46
4.4 – Exemplo de estruturação e implementação de operações algébricas no Dinamica EGO	47
4.5 – Exemplo de representação e implementação do reservatório fluvial no THMB – versão FORTRAN	48
4.6 – Exemplo da conservação de valores entre iterações temporais aninhadas no Dinamica EGO.	49
4.7 – Trecho de código em FORTRAN para propagação das vazões no THMB – versão FORTRAN	50
4.8 – Algoritmo de propagação da vazão célula a célula no THMB – versão Dinamica EGO.	52
4.9 – Interface gráfica do Dinamica EGO exibindo parte do modelo THMB – versão Dinamica EGO.	55
5.1 – Localização da bacia do rio Madeira.....	57
5.2 – Área de estudo: relevo e principais rios.....	58
5.3 – Mapa de fluxo acumulado	59

5.4 – Mapa de sinuosidade	60
5.5 – Porcentagem de floresta (áreas densamente vegetadas) para a área de estudo, baseado em Eva et al. (2002), reamostrado para resolução espacial de 5 minutos de arco.....	61
5.6 – Imagens temáticas das áreas potencialmente alagáveis: (a) Recorte da imagem original (HESS et al., 2009) para a bacia, em resolução espacial de 3 segundos de arco; (b) Imagem reamostrada para a resolução de 5 minutos de arco.....	62
5.7 – Distribuição espacial das estações fluviométricas e respectivos rios da Tabela 5.1.	65
5.8 – Hidrogramas sazonais das vazões médias mensais (m ³ /s) observadas e simuladas.	70
5.9 – Diagrama de dispersão: vazões mensais observadas versus simuladas.....	73
5.10 – Comparação das vazões mensais simuladas pelo THMB – versão FORTRAN e versão Dinamica EGO.....	75
5.11 – Simulação das áreas alagadas – bacia do Rio Madeira: (a) outubro/1995; (b) fevereiro/1996.	76
5.12 – Comparação entre áreas alagadas simuladas e áreas alagáveis máximas (Wetmask, Hess et al., em revisão).	78
5.13 – Localização dos pontos de avaliação dos níveis d’água.....	82
5.14 – Comparação de níveis d’água relativos no rio Madeira.	83

LISTA DE TABELAS

	Pág.
5.1 – Estações fluviométricas utilizadas para validação do modelo THMB	
– versão Dinamica EGO	64
5.2 – Vazões anuais observadas e simuladas e respectivos erros relativos	67
5.3 – Avaliação das vazões mensais	69
5.4 – Pontos de avaliação dos níveis d'água	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASC	American Standard Code
CCM3	Community Climate Model 3
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRU	Climatic Research Unit
DGEM	Dynamic Global Ecosystem Models
GCM	General Circulation Model
HEC-1	Hydrologic Engineering Center 1
HSPF	Hydrological Simulation Program – Fortran
HYDRA	Hydrological Routing Algorithm
HydroSHEDS	Hydrological Data and Maps Based on Shuttle Elevation Derivatives at Multiple Scales
IBIS	Integrated Biosphere Simulator
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Pannel on Climate Change
LUCC	Land Use and Cover Change
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGB	Modelo de Grandes Bacias
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NetCDF	Network Common Data Form
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWSRFS	National Weather Service River Forecast System
SHE	Systeme Hydrologique Europeen
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSARR	Streamflow Simulation and Reservoir Regulation Model
SWAM	Surface Water Model
THMB	Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry
TIFF	Tagged Image File Format
VIC	Variable Infiltration Capacity
WBM/WTM	Water Balance Model / Water Transport Model
WWF	World Wildlife Fund

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas diversos estudos ambientais têm sido conduzidos no âmbito das mudanças de uso e cobertura da superfície terrestre, contemplando diversos processos, entre eles, o desmatamento devido à exploração madeireira, expansão de fronteiras agrícolas, pecuária e urbanização. Dentre os possíveis efeitos das mudanças de uso da terra figuram os impactos sobre o balanço hídrico de bacias hidrográficas, como a diminuição na evapotranspiração devido à supressão das florestas e aumento do escoamento superficial, o que causa mudanças nas vazões, aumento da susceptibilidade a eventos de inundação e assoreamento de cursos d'água.

No estudo das consequências das mudanças de uso e cobertura da superfície terrestre no balanço hídrico de bacias hidrográficas, a Hidrologia, associada a técnicas de modelagem, assume papel fundamental na concepção e implementação de modelos hidrológicos.

O acoplamento dos modelos hidrológicos com modelos ecossistêmicos e com modelos de circulação atmosférica tem permitido avaliar a resposta ambiental de grandes bacias aos impactos das mudanças de uso e cobertura da superfície levando em conta os processos interativos entre os diversos componentes do sistema ambiental (COSTA et al., 2003; COE et al., 2009). Para isso, os modelos espacialmente distribuídos são adequados, uma vez que os vários processos podem ser tratados de forma distribuída no espaço, o qual é representado por uma malha de elementos de área georreferenciados. Essa abordagem também se ajusta ao uso dos produtos do sensoriamento remoto e dos sistemas de informações geográficas nos modelos ambientais.

Um modelo hidrológico desenvolvido nessa perspectiva permite a integração de dados hidrológicos com os demais atributos geográficos, facilitando o estudo da interrelação entre os agentes e processos de transformação do espaço e as variáveis hidrológicas, considerando as influências mútuas. Atualmente, nessa linha de modelos têm-se, por exemplo: o Systeme Hydrologique Europeen – SHE (ABBOTT

et al., 1986), o TOPMODEL (BEVEN e KIKRBY, 1979), o Modelo de Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN, 2001), o modelo Variable Infiltration Capacity – VIC (WOOD et al., 1992; LIANG et al., 1994; NIJSSEN et al., 1997), WATFLOOD (KOUWEN, 2000) e o Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB (COE et al., 2008).

Modelos hidrológicos distribuídos acoplados a modelos climatológicos e ecossistêmicos também têm sido utilizados para avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre recursos hídricos (NIJSSEN et al., 2005; XU et al., 2005; ANDERSSON et al., 2006).

Acoplar modelos demanda algumas adaptações como a conversão de arquivos em formatos diferentes e a mudança de resolução espacial ou temporal para adequação entre modelos. Outro aspecto significativo na integração de modelos ambientais está relacionado ao modo como são construídos e disponibilizados para os usuários. Os modelos podem ser implementados por meio de linguagens de programação de propósito geral, como C++, FORTRAN, Java, ou de linguagens de domínio específico para modelagem. A execução de modelos, implementados por meio de linguagens de programação de propósito geral pode, muitas vezes, dificultar a compreensão da estrutura do modelo ou mesmo a manipulação das variáveis e cálculos para um usuário não familiarizado, o que pode ser parcialmente resolvido com o uso de interfaces gráficas. Por esse motivo, a construção e compreensão de modelos de diversos tipos, bem como a integração deles, podem ser favorecidas pelo uso de plataformas de modelagem com interfaces amigáveis, como, por exemplo: Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002), TerraME (CARNEIRO, 2006), Stella[®] (ISEE SYSTEMS, 2011), Vensim[®] (VENTANA SYSTEMS INC., 2009).

Dentre essas plataformas, o Dinamica EGO foi escolhido, neste trabalho, para a implementação e uso de modelos hidrológicos. Uma vez que essa plataforma tem sido utilizado para a modelagem de diversos fenômenos espaciais, principalmente relacionados às mudanças de uso da terra (e.g. ALMEIDA, 2003; SOARES-FILHO et al., 2004; SILVESTRINI et al., 2007), a implementação de um modelo hidrológico

nessa plataforma de modelagem pode favorecer a integração desse modelo com aqueles já implementados.

1.1 Objetivo

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo implementar e apresentar uma versão do modelo hidrológico Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB (COE et al., 2008), implementado originalmente em linguagem FORTRAN, na plataforma de modelagem Dinamica EGO, visando facilitar a utilização desse modelo por usuários não familiarizados com a linguagem FORTRAN e com os detalhes operacionais para uso do código original (uso de um ambiente Linux ou seus emuladores para ambiente Windows, criação de arquivos makefile e instalação de bibliotecas netCDF).

1.2 Organização do texto

O texto é apresentado em cinco capítulos, iniciando com conceitos teóricos relativos à modelagem e, em seguida, o texto é direcionado ao trabalho de implementação do modelo e os resultados.

No Capítulo 2 é apresentada uma abordagem geral de conceitos em modelagem ambiental e, especificamente, em modelagem hidrológica distribuída; neste capítulo também é descrito o modelo em estudo (THMB). No Capítulo 3, é apresentada uma breve descrição acerca de plataformas de modelagem, incluindo alguns exemplos e uma explicação da plataforma utilizada para a execução do trabalho (Dinamica EGO). O Capítulo 4 tem por objetivo apresentar o processo de construção do modelo na plataforma Dinamica EGO e a comparação de alguns algoritmos da versão FORTRAN e seus correspondentes na versão Dinamica EGO. No Capítulo 5, um estudo de caso é realizado, na bacia do rio Madeira, com o objetivo de validar a versão construída na plataforma Dinamica EGO. No Capítulo 6 são apresentadas algumas considerações acerca do desenvolvimento do trabalho, análise dos resultados obtidos e possíveis avanços futuros.

2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O propósito deste capítulo é apresentar uma abordagem geral de conceitos em modelagem ambiental, com ênfase na modelagem hidrológica distribuída. Inicialmente, são revistos alguns conceitos em modelagem de sistemas ambientais e, em seguida, o ciclo hidrológico é abordado para introduzir o tema da modelagem hidrológica. Uma breve classificação e histórico de modelos são também apresentados. Por fim, é descrito o Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB, implementado neste trabalho.

2.1 Modelagem de sistemas ambientais

Um sistema ambiental pode ser entendido como um conjunto de elementos e processos físicos, biológicos e químicos que interagem num determinado meio físico e geram complexas teias de influências mútuas e, dessa forma, possibilitam a manutenção da vida e a evolução das espécies.

A maioria dos sistemas ambientais não possui limites discerníveis e seus elementos estão intrinsecamente relacionados, de tal maneira que o sistema todo possui características próprias maiores do que a soma das propriedades isoladas de seus elementos e exibe padrões particulares que não poderiam ser reproduzidos apenas combinando os elementos que o compõem.

A caracterização de um sistema ambiental deve levar em consideração a escala espacial e temporal de análise, uma vez que a complexidade de relações dá origem a sistemas aninhados e inter-relacionados, o que não permite um contorno exato que possibilite separar um sistema de outro. Um sistema ambiental pode incluir o solo, a vegetação, os seres vivos que habitam o local, a água presente e o ar circundante. Entretanto, apenas o solo em si, quando visto em detalhes, pode ser considerado um sistema ambiental porque congrega sedimentos, matéria orgânica, água e oxigênio numa interação que sustenta a vida de microorganismos, plantas e pequenos insetos que ali vivem. Dessa forma, um sistema ambiental pode aninhar vários outros ou pode não ter limites definidos. A definição de condições limitantes ou abrangência

geográfica de um sistema ambiental, bem como de uma escala temporal representativa, é apenas um artifício metodológico para facilitar a análise científica do sistema.

Para detalhes adicionais acerca dos sistemas ambientais e estudos relacionados, Christofolletti (1999) oferece uma abordagem didática e abrangente.

A interação dos seres humanos com os diversos sistemas ambientais provoca mudanças nesses sistemas. Na atual circunstância, essas mudanças estão desencadeando efeitos negativos sobre eles. Em resposta a isso, muitos setores da sociedade estão se mobilizando para estudar, mensurar e minimizar os impactos das atividades humanas. Neste contexto, a modelagem se apresenta como uma das possíveis formas de estudar e prever os impactos e avaliar os efeitos de ações mitigadoras.

A modelagem consiste em uma série de procedimentos que visam representar a realidade de forma simplificada com o objetivo de estudar um aspecto ou um conjunto de aspectos dela. Ela reflete, na verdade, um procedimento intuitivo da mente humana na tentativa de compreender os diversos fenômenos presentes no mundo por meio de sua representação. Ao longo do tempo, a modelagem foi adquirindo “traços” específicos que a tornaram um método, uma ferramenta específica para aprimorar o conhecimento de sistemas. Por isso, atualmente, a modelagem pode ser considerada como um instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Um modelo é a representação simplificada de um sistema cujo objetivo é prever seu comportamento sob certas circunstâncias (BRATLEY et al., 1987). Segundo Cristofolletti (1999, p. 8), um modelo também pode ser entendido como uma “[...] representação de um aspecto do mundo real que surja como de interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução”.

Dessas possibilidades – representação da realidade, previsão de comportamentos ou evoluções – surge o conceito da simulação que significa submeter o modelo a

condições iniciais e verificar o comportamento resultante (BRATLEY et al., 1987; SOARES-FILHO et al., 2007). Por meio desse processo, é possível prever o comportamento do sistema modelado ao longo do tempo e/ou do espaço. Pode-se estudar o estado do sistema daqui a alguns minutos, assim como daqui a algumas centenas de anos. Desta forma, a simulação pode ser utilizada para estudos prognósticos, como: avaliação de impactos ambientais, avaliação ambiental estratégica, tomada de decisões em planejamento governamental ou empresarial, entre muitos outros usos (VERBURG e VELDKAMP, 2004; MOFFATT e HANLEY, 2001; PEIXOTO e MAUAD, 2003; BERGER, 2001).

Os modelos de sistemas ambientais recebem diferentes classificações de acordo com os vários aspectos a que se relacionam. A seguir é apresentada uma breve explicação acerca de alguns dos principais aspectos e classes de modelos, baseando-se em Dooge (1973), Christofolletti (1999), Collischonn (2001) e Tucci (2005). Embora a classificação apresentada se aplique a modelos ambientais em geral, é dada uma ênfase a modelos hidrológicos. Os aspectos apresentados são: temporal, espacial, estrutural e probabilístico.

2.1.1 Aspecto temporal

Um modelo pode representar o estado de um sistema em um dado momento e unicamente nele – sendo então considerado um modelo “estático” –, como também pode representar as mudanças de estado e comportamento ao longo do tempo – sendo então considerado “dinâmico”. Os modelos dinâmicos podem simular processos em termos de cenários futuros, fictícios ou mesmo retrospectivos.

Um sistema é dito discreto quando seu estado muda em intervalos discretos de tempo (DOOGE, 1973). Se um modelo é discretizado no tempo, a escolha do intervalo considerado, ou passo de tempo, deverá levar em conta a precisão desejada e o custo em termos de tempo necessário para executar a simulação. O passo de tempo variará também conforme o fenômeno em estudo; por exemplo, se o objetivo é estudar os efeitos de uma tempestade sobre a drenagem urbana de uma cidade o passo de tempo deverá ser menor do que se a intenção for simular o aumento de vazão fluvial devido ao desmatamento em uma determinada área de floresta.

2.1.2 Aspecto espacial

Os modelos ambientais podem também representar processos e fenômenos em termos de médias de valores das variáveis para a área de estudo ou com base em valores distribuídos no espaço.

Por exemplo, em relação aos modelos hidrológicos, quando desenvolvidos sob a primeira abordagem, têm-se os chamados modelos “concentrados”. Esse é o caso dos modelos hidrológicos de bacias que trabalham com base em valores médios para toda a bacia e fornecem resultados apenas no exutório. No segundo caso, em que os valores são distribuídos no espaço, os modelos são chamados “distribuídos”. De forma geral, os modelos ambientais que seguem essa segunda abordagem são também conhecidos como modelos espaciais ou modelos espacialmente distribuídos.

Segundo Tucci (2005), um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais aos de um modelo concentrado, no entanto, somente um modelo distribuído permite estudar a variabilidade dos processos ao longo do espaço.

2.1.3 Aspecto estrutural

Quanto ao aspecto estrutural, os modelos podem ser classificados como conceituais, de base física ou empíricos.

Os modelos conceituais buscam representar os fenômenos do sistema com uma base física mínima, uma representação matemática simplificada dos processos (COLLISCHONN, 2001).

Já os modelos de base física são formulados com base em equações que procuram expressar da maneira mais realista possível os processos físicos que ocorrem no sistema simulado. Os parâmetros desses modelos são baseados nas características do sistema ou podem ser obtidos por mensuração (COLLISCHONN, 2001).

No caso dos fenômenos serem representados por relações matemáticas e estatísticas que não levam em conta os processos físicos, o modelo será chamado empírico. Os modelos empíricos ajustam os valores calculados aos dados observados por meio de funções que não consideram os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2005).

2.1.4 Aspecto probabilístico

Segundo este aspecto, um modelo pode ser considerado determinístico se para os mesmos valores de entrada o modelo produz sempre os mesmos resultados (DOOGE, 1973), ou seja, não é considerado nenhum grau de aleatoriedade no processo modelado; ou estocástico, caso o modelo trabalhe na ótica da probabilidade de ocorrência dos resultados, ou seja, se considera algum grau de aleatoriedade nos processos que estão sendo modelados. Os modelos estocásticos são também conhecidos como probabilísticos. Segundo Dooge (1973), um sistema probabilístico é aquele que contém um ou mais elementos nos quais a relação entre valores de entrada e valores produzidos é estatística.

Todos esses aspectos podem ser também encontrados em um modelo de forma parcial, ou seja, na qual parte do modelo é construída sob uma dessas óticas e outra parte sobre outra. Esse é o caso dos modelos chamados semi-conceituais, os quais possuem grande parte de seus processos modelados sob bases físicas, mas que admite um certo grau de empirismo em alguns processos (TUCCI, 2005). Os modelos podem também ser determinísticos em parte das equações que regem os processos e admitir a inserção de componentes probabilísticos em outra.

2.2 Modelagem hidrológica

O ciclo hidrológico é o conjunto de fases e processos característicos da circulação da água no meio ambiente. Trata-se de um ciclo porque praticamente não há perdas ou ganhos significativos em volume de água no planeta, porém a água disponível está constantemente circulando, mudando de estado e variando seu estoque de lugar para lugar.

A modelagem hidrológica consiste no desenvolvimento de representações matemáticas destinadas a simular processos relativos ao ciclo hidrológico, por exemplo, o processo de infiltração da água no solo e a recarga de aquíferos, ou mesmo o escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem. Os modelos servem como uma ferramenta de auxílio ao trabalho do engenheiro hidrólogo e demais profissionais envolvidos com o tema, permitindo melhor compreensão dos

fenômenos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, bem como possibilitando prever o comportamento da bacia sob condições diversas. A maior parte dos modelos se dedica em representar apenas alguns dos processos que ocorrem numa bacia hidrográfica, uma vez que a representação de todo o ciclo acarreta num custo computacional alto em relação aos objetivos práticos do modelo.

A modelagem hidrológica surgiu há mais de um século a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos, como, por exemplo, o Método Racional, proposto por Mulvaney por volta de 1850, destinado a prever o escoamento superficial máximo decorrente de um evento de chuva. Esse método foi registrado na literatura por suas aplicações no projeto de redes de esgoto nos últimos anos do Século XIX (TODINI, 2007). Em 1932, L. K. Sherman propôs o Método do Hidrograma Unitário. Em 1933, foi publicada a Teoria Hortoniana de infiltração.

Segundo Tucci (2005), até a década de 1950, os métodos utilizados em Hidrologia se limitavam quase sempre a indicadores estatísticos dos processos, com uma tendência geral de desenvolvimento dos modelos ditos empíricos, os quais representam os processos hidrológicos sem levar em conta os fenômenos físicos envolvidos (Seção 2.1.3). Após esse período, surgiram os primeiros modelos hidrológicos, os quais eram predominantemente do tipo chuva-vazão, que consistiam na previsão dos efeitos da precipitação sobre uma bacia em termos de hidrogramas obtidos para o exutório, sendo assim, em sua maioria, modelos concentrados, do tipo determinístico e semi-conceitual. Com o passar do tempo e a criação gradual de várias agências e institutos de pesquisa e gerenciamento de recursos hídricos, os modelos foram sendo aprimorados, numa tentativa de representar fisicamente os processos hidrológicos.

Entre os primeiros modelos hidrológicos desenvolvidos estão o Streamflow Simulation and Reservoir Regulation Model – SSARR (ROCKWOOD, 1958), o Stanford Watershed Model (CRAWFORD e LINSLEY, 1966) e o National Weather Service River Forecast System – NWSRFS (NOAA, 1972). Em 1973, o Centro de Engenharia Hidrológica do U.S. Army Corps of Engineers – ACOE desenvolveu o HEC-1 (do inglês Hydrologic Engineering Center), modelo que simula as cheias a partir de dados de precipitação (BEDIANT e HUBER, 2002).

Com a disseminação do uso de computadores nas décadas de 1960 e 1970 e a maior disponibilidade de dados hidrometeorológicos, a abordagem espacial distribuída (Seção 2.2.1) começou a ser aplicada na modelagem hidrológica (e.g. FREEZE e HARLAN, 1969; BEVEN, 1979). Desde então, a modelagem hidrológica tem sido desenvolvida e tem originado modelos diversos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas. Os modelos têm sido utilizados para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade relacionados com o regime hídrico e também têm sido utilizados para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas. Uma vez que os modelos podem ser usados para prever condições futuras por meio de simulação, eles são ferramentas bastante úteis para lidar com problemas ambientais e possíveis alternativas para atenuar impactos.

Os modelos, na atualidade, também se dividem entre aqueles que se destinam a avaliar pequenas ou médias bacias hidrográficas e os que são voltados para grandes bacias (e.g. COLLISCHONN, 2001; PAIVA, 2009). A quantidade de dados e a resolução espacial e temporal variam conforme a aplicação escolhida. Em geral, os modelos voltados para grandes bacias destinam-se à avaliação do impacto das mudanças de uso e cobertura do solo (e.g. LI et al., 2007; COE et al., 2009; RENNÓ e SOARES, 2000), bem como das mudanças climáticas (e.g. COSTA e FOLEY, 2000). Muitas vezes, esses modelos são também utilizados integrados aos modelos de circulação geral da atmosfera (General Circulation Models – GCM).

Algumas finalidades específicas caracterizam certos modelos, tais como os que possuem módulos para avaliar e prever a qualidade das águas, como é o caso do modelo Hydrological Simulation Program-Fortran – HSPF (JOHANSON et al., 1980), sucessor do Stanford Watershed Model (CRAWFORD e LINSLEY, 1966); ou o transporte de sedimentos em rios e lagos, como, por exemplo, o modelo SEDDISCH (STEVENS e YANG, 1989) e o modelo SHESED (WICKS e BARTHURST, 1996), sendo esse último um componente de modelagem da erosão e produção de sedimentos para o modelo SHE.

Os diversos modelos hidrológicos podem ser diferenciados entre si pela abordagem espacial que possuem, sendo que duas classes são comumente mencionadas: os modelos concentrados e os modelos distribuídos, como visto na Seção 2.1. Os modelos concentrados, em geral, visam obter resultados médios representativos de toda a bacia, como, por exemplo, a vazão na foz. Já os modelos distribuídos procuram representar os processos em cada elemento de área que compõe a bacia. Essa última classe de modelos é descrita mais detalhadamente a seguir, por ser de interesse no presente trabalho.

2.2.1 Modelos hidrológicos distribuídos

Um modelo hidrológico distribuído considera a variabilidade espacial dos processos simulados, ou seja, as variáveis do sistema possuem valores distintos ao longo do espaço. Em um modelo distribuído, a superfície contínua é discretizada em elementos de área cujos valores são a menor informação discernível no espaço (MENDES, 1996) e representam a média dos valores internos ao elemento de área.

Quando se busca estudar a heterogeneidade espacial dos fenômenos em uma bacia hidrográfica, os modelos distribuídos são a melhor opção. Um modelo hidrológico desenvolvido nessa perspectiva permite a integração de dados hidrológicos com os demais atributos geográficos, tornando possível representar a inter-relação entre os vários agentes de transformação do espaço e as variáveis hidrológicas. Por esse motivo, o modelo hidrológico distribuído se configura como uma opção adequada para estudar a interação entre uso e cobertura do solo e regime hidrológico.

Na linha dos modelos hidrológicos distribuídos têm-se, por exemplo: o TOPMODEL (BEVEN e KIKRBY, 1979), o Systeme Hydrologique Europeen – SHE (ABBOTT, 1986), o Water Balance Model/Water Transport Model – WBM/WTM (VÖRÖSMARTY et al., 1989), o Modelo de Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN, 2001) e o Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB.

Diferentes métodos são utilizados nos modelos hidrológicos distribuídos para a propagação das vazões na rede de drenagem, variando conforme o nível de precisão

esperado e a disponibilidade de dados relativos à morfologia fluvial necessários para caracterização do fluxo. Na Seção 2.2.1.1 são apresentados alguns conceitos e exemplos de modelos de propagação de vazões.

A modelagem de algumas regiões de grande importância para o país em termos de biodiversidade e recursos hídricos, como a Amazônia e o Pantanal, requer a consideração das planícies de inundação na modelagem hidrológica. Por esse motivo, na Seção 2.2.1.2 é apresentada uma breve abordagem acerca da modelagem aplicada às planícies de inundação, aquisição de dados para simulação hidrológica de áreas alagadas e alguns métodos.

Ainda relacionado aos modelos hidrológicos distribuídos, na Seção 2.2.1.3 são abordadas algumas fontes de dados climatológicos e morfológicos necessários para execução e validação de modelos hidrológicos.

2.2.1.1 Modelos de propagação de vazões

Modelos de propagação de vazões destinam-se a modelar o escoamento da água na rede de drenagem de forma a prever a vazão de rios, eventos de cheia e sua influência sobre planícies de inundação, e a magnitude da rede hidrográfica. Os métodos de propagação de vazões permitem calcular a vazão em um ponto a jusante com base nas vazões da área de drenagem a montante e também são usados para construir os hidrogramas da bacia (LINSLEY et al., 1975).

O escoamento da água sobre a superfície é regido por leis físicas e pode ser descrito por equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento (TUCCI, 2002). O regime de escoamento pode ser permanente, caso a velocidade em um mesmo ponto permaneça invariável ao longo do tempo, nesse caso, profundidade, área molhada e vazão terão valores constantes em um mesmo ponto; e não-permanente, caso contrário. Em termos do espaço, os escoamentos podem ser uniformes, caso as velocidades locais sejam paralelas entre si guardando trajetórias retilíneas (PORTO, 2006); e variados, se os elementos característicos do escoamento variarem de uma seção para outra no canal em um mesmo instante de tempo.

A modelagem da dinâmica das águas em rios e planícies de inundação atinge maior nível de complexidade com os modelos hidrodinâmicos que representam o escoamento por meio da equação da continuidade e da equação da quantidade de movimento, as quais, juntas, são conhecidas como equações de Saint-Venant. Essas equações representam as principais forças atuantes no escoamento: gravidade, atrito, inércia e pressão. Os modelos hidrodinâmicos oferecem uma descrição mais precisa do escoamento, no entanto necessitam de uma maior quantidade de dados e soluções numéricas mais complexas para solução das equações diferenciais, de modo que, em geral, recorre-se a modelos baseados em simplificações dessas equações (PORTO, 2006).

Três tipos de modelos baseados em simplificações das equações de Saint-Venant são comumente mencionados na literatura: modelos do tipo armazenamento (BIRKHEAD e JAMES, 2002), onda cinemática (LIU et al., 2004) e difusão (JAIN e SINGH, 2005).

O modelo em estudo, THMB, pode ser classificado como um modelo do tipo armazenamento. Esse tipo de modelo utiliza a equação da continuidade (que pode ser expressa pela Equação 2.1, apresentada na Seção 2.2.2.2) e uma relação entre o armazenamento e a vazão de saída e de entrada no trecho para simular o escoamento (TUCCI, 2002). Entre os modelos do tipo armazenamento têm-se algumas variantes, entre as quais estão: o modelo de reservatório linear (COE, 2007; BUYTAERT et al., 2004); o modelo de Muskingum (BIRKHEAD e JAMES, 2002); e o modelo de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN, 2001).

2.2.1.2 Modelos para planícies de inundação

As planícies de inundação são áreas contíguas aos canais e corpos d'água sujeitas a inundarem em períodos de cheia. Seu tamanho e forma variam conforme o relevo local, características do escoamento e do solo. Essas planícies desempenham importante papel no sistema fluvial, uma vez que ocorre uma troca constante de água, sedimentos e nutrientes entre o canal principal e a planície. Muitas planícies deram origem a extensas áreas férteis utilizadas para agricultura (por exemplo, no rio Nilo).

Além disso, funcionam como amortecedoras das cheias, pois ajudam a atenuar o pico de vazão, armazenando temporariamente a água em eventos de alta pluviosidade, o que protege as áreas a jusante de sofrerem enchentes mais fortes.

Muitos estudos têm sido conduzidos no âmbito do mapeamento das planícies de inundação e caracterização da dinâmica de suas águas (SIPPEL et al., 1998; BIRKETT et al., 2002; HESS et al., 2003; LEHNER e DÖLL, 2004; ALSDORF et al., 2005), biogeoquímica e ciclagem de nutrientes (MELACK e FORSBERG, 2001; RICHEY et al., 2002), flora e fauna típicas de áreas alagadas e sua importância (BRINSON et al., 1981; WITTMAN et al., 2004; KEDDY et al., 2009). No entanto, esses estudos são relativamente recentes, com início a partir da década de 1980, aproximadamente. A escassez de estudos anteriores a essa época se deve à dificuldade para determinar as condições hidrológicas e mudanças fenológicas da vegetação dessas áreas (MELACK e HESS, 2004). Com o advento e melhoria gradual de tecnologias de aquisição de dados e monitoramento, como as de sensoriamento remoto, essas dificuldades têm sido superadas (SIPPEL et al., 1998; HESS et al., 2003; ALSDORF et al., 2007). Essa melhoria tem viabilizado as pesquisas relativas à modelagem hidrológica aplicada a planícies de inundação (BATES e DE ROO, 2000; HORRITT e BATES, 2001; PAZ et al., 2006; COE et al., 2008; PAIVA, 2009).

A importância da modelagem das planícies de inundação para o Brasil vem do fato de que muitas bacias hidrográficas brasileiras possuem extensas áreas de planícies desse tipo, tais como a bacia do rio Paraguai, que forma o Pantanal, e a bacia Amazônica. Por exemplo, na bacia Amazônica, estima-se que as áreas de planícies de inundação excedam 1 milhão de quilômetros quadrados (MELACK e HESS, 2004). Essas planícies dão origem a muitos habitats de grande importância para a biodiversidade.

Devido ao fluxo lateral entre a planície e o canal principal, a modelagem do fluxo de água se torna mais complexa, pois se trata de um fluxo que não é permanente e nem unidirecional. Por esse motivo, vários estudos têm sido desenvolvidos na tentativa de simular de forma mais realística possível o fluxo de água nessas áreas, utilizando

modelagem computacional e sensoriamento remoto (GALLAND et al., 1991; MIGUEZ e MASCARENHAS, 1994; BATES e DE ROO, 2000; HORRITT e BATES, 2001; WILSON et al., 2007; COE et al., 2008; PAZ, 2010). Existem alguns modelos propostos para a modelagem da hidrodinâmica das planícies de inundação (CUNGE, 1980, citado por PAIVA, 2009), por exemplo: (1) modelo de armazenamento, onde o volume recebido pela planície corresponde àquele extravasado do canal principal do rio; (2) modelo da seção composta, onde o escoamento é dividido entre o canal principal e a planície e, nessa última, não só o volume é estocado, como também possui fluxo; e (3) modelo das lagoas interconectadas, onde a planície de inundação é entendida como um sistema interconectado por pequenos canais e há fluxo entre eles.

Em Coe et al., (2008), o volume excedente àquele do canal principal do rio é transportado para as planícies de inundação, no entanto esse volume nunca abandona, de fato, o canal principal. Portanto, nesse modelo, a inundação das planícies não influencia os valores das vazões finais simuladas. As direções de fluxo são estabelecidas a cada passo de tempo baseando-se na diferença de nível d'água entre células vizinhas. As planícies podem ter o seu volume reduzido quando o volume no canal principal se reduz em relação ao volume do passo de tempo anterior e se torna menor do que o volume máximo comportado pelo canal principal.

Muitas vezes, devido às dificuldades existentes na aquisição de informações suficientemente detalhadas relativas à morfologia dos rios e também devido à complexidade da modelagem da dinâmica das planícies, são utilizados relações empíricas e parâmetros obtidos por meio de amostragem das características físicas da bacia e do uso de produtos do sensoriamento remoto em diferentes resoluções (COE et al., 2008; PAZ e COLLISCHONN, 2007; PAIVA, 2009). Em Kouwen (2000), Collischonn (2001) e Coe et al. (2008), a largura média da seção dos canais e nível d'água máximo (a partir da qual a água abandona o canal principal do rio e se direciona às planícies) são estimadas por meio de relações estatísticas baseadas na área de drenagem a montante da célula. Em Coe et al. (2008), duas resoluções diferentes do modelo digital de elevação são utilizadas para estimar a área alagada na

planície de inundação baseando-se no desvio padrão da altitude na célula e no volume excedente àquele comportado pela calha do rio. Paz e Collischonn (2007) também utilizam informações extraídas de modelo digital de elevação (MDE) com resoluções diferentes para estimar direções de fluxo, fluxo acumulado, comprimento do canal na célula e declividade.

2.2.1.3 Fontes de dados para modelos hidrológicos distribuídos

Uma vez que os modelos hidrológicos distribuídos consideram a variabilidade espacial dos processos é de se esperar que operem sobre uma base que representa o espaço em estudo. De fato, um modelo desse tipo considera o espaço como uma matriz cujas células são elementos de área. Cada célula, portanto, possui uma posição no espaço (georreferenciamento) e valores médios relativos às variáveis em estudo. Os dados alimentam o modelo como uma matriz de valores para cada variável, como se fosse um “mapa de valores”. Em geral, a superfície base utilizada por um modelo como esse para simular o fluxo de água é um mapa de elevação do terreno, uma vez que a topografia condiciona o escoamento sobre a superfície.

O mapa de elevação do terreno fornece a base para o cálculo da declividade entre células adjacentes e esta determinará os caminhos a serem percorridos pela água e qual a área drenada por cada rio. O mapa de elevação do terreno pode ser obtido por meio dos modelos digitais de elevação – MDE, que são representações matriciais do terreno com valores de altimetria para cada elemento de área.

Existem diversas fontes para obtenção de um MDE, como por exemplo:

- ETOPO1 Global Relief Model, produzido pela National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, o qual possui resolução de 1 grau de latitude e longitude e cujos dados podem ser acessados pelo site www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html;
- ASTER GDEM – Global Digital Elevation Model Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, produzido por uma parceria entre o governo do Japão e a National Aeronautics and Space Administration

– NASA, com resolução espacial de 30 m e disponível para o público desde meados de 2009, por meio do site www.gdem.aster.ersdac.or.jp;

- SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, um projeto internacional liderado pela National Geospatial-Intelligence Agency – NGA e pela NASA, possui resolução espacial de 90 m para o globo e resolução de 30 m para o território dos Estados Unidos. Os dados gerados pelo SRTM são distribuídos pelo Earth Resources Observation and Science Center – EROS, do United States Geological Survey – USGS, e podem ser acessados por meio dos sites www.eros.usgs.gov/#/Home e www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download.

Outra fonte para obtenção de dados de elevação, bem como de mapas de direção de fluxo e fluxo acumulado, é o banco de dados HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), produzido pelo World Wildlife Fund – WWF (LEHNER et al., 2008). Os dados estão disponíveis nas resoluções espaciais de 3 segundos de arco e 15 segundos de arco e foram produzidos utilizando técnicas específicas para tratamento de dados para aplicações em recursos hídricos. Os dados estão disponíveis no site www.worldwildlife.org/hydrosheds.

Os dados hidrometeorológicos utilizados em modelos hidrológicos distribuídos devem ser espacializados, ou seja, cada célula da superfície em estudo deve possuir um valor para cada variável. Segundo Pinto et al. (2009), existem três métodos básicos para a geração de banco de dados espacializados de variáveis hidrometeorológicas: a interpolação de dados obtidos em estações; a técnica de reanálise e a combinação de dados de estações com dados de sensoriamento remoto.

As fontes primárias de dados hidrometeorológicos, em geral, estão associadas às instituições governamentais, ligadas à pesquisa ou ao gerenciamento de recursos hídricos. No Brasil as principais fontes de dados diretamente mensurados em estações, em nível nacional, são a Agência Nacional de Águas – ANA, o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. As informações hidrometeorológicas obtidas por meio do sensoriamento remoto no Brasil são fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, mais especificamente pelo CPTEC. A precipitação, temperatura e

umidade do ar, nevoeiros, nuvens, ventos e radiação solar podem ser mensurados indiretamente por meio de dados de satélites meteorológicos.

Em nível internacional, as fontes de informações hidrometeorológicas são várias. O Brasil faz uso de informações fornecidas, em especial, pelas seguintes instituições: NASA, NOAA e pela Climatic Research Unit – CRU. Outra fonte de grande importância para estudos atmosféricos e hidrológicos é o National Center for Atmospheric Research – NCAR. Quando os dados se referem a previsões de mudanças climáticas, uma das fontes mais importantes é o Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, o qual possui um banco de dados sobre as previsões relativas ao aquecimento global. Outra fonte de dados é o Met Office Hadley Centre (www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/hadleycentre). Esse centro produz modelos climáticos voltados para previsão de mudanças climáticas e seus resultados têm sido utilizados pelo IPCC para produção de seus relatórios.

2.2.2 Modelo hidrológico em estudo: THMB

O Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB é um modelo de propagação de vazões, espacialmente distribuído e de base física (Seção 2.1.3), construído para prever vazões de sistemas fluviais, a distribuição espacial, área e nível d'água de grandes lagos e planícies de inundação.

O protótipo do modelo THMB foi o modelo Surface Water Model – SWAM (COE, 1997), o qual foi utilizado para a simulação hidrológica de períodos paleo-climáticos na África (COE, 1997) e também para simular a distribuição espacial de rios, lagos e pântanos em sete regiões continentais (COE, 1998). Em seguida, com algumas modificações, foi nomeado como Hydrological Routing Algorithm – HYDRA e aplicado a simulações hidrológicas integradas a modelos de circulação geral da atmosfera (COE, 2000), bem como para modelagem da vazão e cheias na Bacia Amazônica (COE et al., 2002). Outras aplicações do modelo incluem a simulação do transporte de nitratos na água (DONNER et al., 2002) e a modelagem dos impactos hidrológicos das mudanças de uso da terra no oeste da África (LI et al., 2005; 2007). Em seguida, o modelo foi aprimorado com a inserção de parâmetros morfológicos

nas fórmulas de velocidade da água e no cálculo da área alagada e nível d'água das planícies de inundação e foi renomeado para Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry – THMB (COE et al., 2008).

Recentemente, o THMB, acoplado ao modelo ecossistêmico Integrated Biosphere Simulator – IBIS (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000) e ao modelo atmosférico Community Climate Model – CCM3 (desenvolvido pelo NCAR), foi aplicado para avaliar o efeito do desmatamento sobre o balanço hídrico da bacia do rio Amazonas (COE et al., 2009). Para isso, foram utilizadas projeções do desmatamento para o ano 2050 segundo cenários político-econômicos, um dos quais representa uma situação na qual as práticas de desmatamento usuais permanecem em atividade, cenário denominado “business as usual”. Esses cenários foram produzidos por Soares-Filho et al. (2006), através do modelo SimAmazonia, o qual foi desenvolvido na plataforma de modelagem Dinamica EGO. Esse estudo demonstrou que sem acoplar o modelo atmosférico, ou seja, sem os feedbacks climáticos em resposta ao desmatamento, as vazões aumentam em quase todas as sub-bacias da Amazônia. No entanto, quando os modelos são acoplados e o modelo atmosférico passa a ser executado respondendo às taxas de desmatamento, um efeito contrário é observado: as vazões diminuem em quase todas as sub-bacias e a proporção dessa redução guarda uma relação com o percentual de área desmatada na bacia e a localização dela.

Nesse tipo de estudo, o modelo de ecossistemas simula os processos físicos de superfície, fisiologia e dinâmica vegetacional, trocas de energia, carbono e água. O modelo THMB utiliza, então, os dados gerados por esse modelo para o balanço hídrico vertical e simula o balanço hídrico horizontal, ou seja, a propagação das vazões na rede de drenagem.

O cálculo do fluxo e armazenamento de água no THMB é feito com base em um modelo de reservatório linear já utilizado em outros estudos hidrológicos (e.g. VÖRÖSMARTY et al., 1989; MILLER et al., 1994; BUYTAERT et al., 2004). Na Figura 2.1 é apresentado um fluxograma geral do THMB representando os dados de entrada, os processos modelados e os resultados produzidos. Nessa figura são feitas

algumas referências às equações que são utilizadas no modelo, as quais estão enumeradas na figura segundo a ordem de apresentação no texto dessa seção.

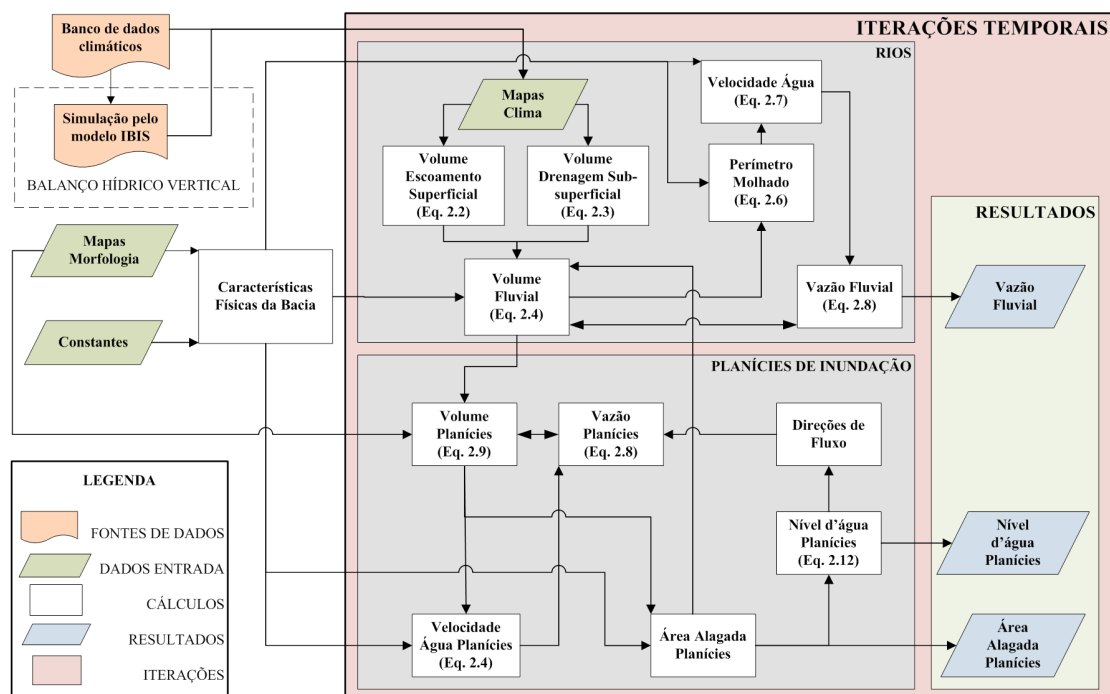


Figura 2.1 – Fluxograma geral do modelo THMB.

Os processos representados na Figura 2.1 estão organizados em duas partes: uma se refere aos cálculos relativos ao fluxo de água na rede de drenagem e a outra trata dos cálculos relativos às planícies de inundação. Ambas as partes se encontram representadas dentro das iterações temporais porque são variáveis no tempo.

Dois tipos de dados na forma de mapas raster são utilizados: mapas com informações relativas à superfície da bacia, representados na Figura 2.1 por “Mapas Morfologia”; e os mapas de dados meteorológicos, tais como precipitação, evaporação etc, representados na Figura 2.1 por “Mapas Clima”.

Os dados relativos à superfície necessários para o modelo são: um modelo digital de elevação (MDE) em resolução superior a que será utilizada na execução, mapa do desvio padrão da altitude do MDE de alta resolução em relação à resolução da execução; mapa de direções de fluxo; mapa de área de drenagem acumulada; mapa das áreas potencialmente alagáveis da bacia. Na versão em estudo, utiliza-se também uma imagem classificada de áreas densamente vegetadas e não vegetadas da bacia

porque as simulações executadas no IBIS são feitas para essas duas classes de cobertura do solo. Todos esses dados devem ser espacialmente distribuídos e estar no formato raster. Na Seção 2.2.2.5 são descritas algumas operações básicas comumente executadas para produção e tratamento de dados utilizados no THMB e em modelos semelhantes.

O espaço é tratado como uma malha de células quadradas e a área de cada célula é calculada com base na resolução das imagens raster utilizadas e na latitude em que a célula se encontra. O mapa de direções de fluxo indica, para cada célula, qual é a sua vizinha mais baixa entre as oito vizinhas adjacentes a ela. A partir disso, é calculada a distância em linha reta entre os centros das células. Em seguida, o MDE é utilizado no cálculo da declividade entre o centro da célula e o de sua vizinha mais baixa.

São também utilizadas relações empíricas para o cálculo de parâmetros que são difíceis de serem mensurados diretamente, como, por exemplo, largura e altura médias do canal principal do rio, as quais são calculadas com base em relações estatísticas entre esses parâmetros e a área de drenagem a montante da seção considerada. Outra relação empírica é utilizada para estimar a área alagada nas planícies de inundação com base nos valores de desvio padrão das altitudes na célula.

Os dados climáticos utilizados no THMB são os valores médios mensais da precipitação, evaporação potencial, escoamento superficial e drenagem sub-superficial. Esses dados devem ser espacializados, ou seja, cada célula da área de estudo deve possuir um valor médio para cada variável climática. A evaporação potencial sobre superfícies de água é calculada por meio da equação de Penman (PENMAN, 1948) utilizando dados climáticos e os dados de escoamento superficial e drenagem sub-superficial que são produtos de simulações feitas pelo modelo ecossistêmico Integrated Biosphere Simulator – IBIS (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000). O modelo IBIS é brevemente descrito na Seção 2.2.2.1.

2.2.2.1 Balanço hídrico vertical

O balanço hídrico vertical, componente necessária ao modelo THMB para o cálculo das contribuições em volume de água de cada célula da superfície, é calculado pelo

IBIS (FOLEY et al., 1996), modelo que simula processos físicos de superfície, fisiologia e dinâmica vegetacional, trocas de energia, carbono e água. O IBIS, em sua segunda versão (KUCHARIK et al., 2000), faz parte de uma nova classe de modelos, conhecida como Dynamic Global Ecosystem Models (DGEM), utilizada principalmente para simulações das interações atmosfera-biosfera. O modelo permite o acoplamento com modelos atmosféricos, como, por exemplo, o modelo CCM3 do National Center for Atmospheric Research, cuja versão 3.6.16 foi acoplada à versão 2.6.4 do IBIS, dando origem ao CCM3-IBIS. Esse acoplamento favorece a simulação da resposta climática às mudanças de uso e cobertura da terra (e.g. COE et al., 2009).

O modelo IBIS 2.6.4, offline, assim como a versão acoplada, CCM3-IBIS, foi calibrado e validado para o bioma Amazônico por Senna et al. (2009).

O módulo de cálculo dos processos da superfície terrestre simula o balanço de energia, água e carbono entre solo, vegetação e atmosfera. A modelagem das trocas de energia e fluxos de ar próximos às camadas da vegetação é utilizada para o cálculo da evapotranspiração, a qual inclui a evaporação advinda da superfície do solo, a transpiração da vegetação e a evaporação da água interceptada pelas plantas (KUCHARIK et al., 2000). A representação dos processos que ocorrem no solo é feita por meio de 8 camadas que abrangem os 12 primeiros metros de profundidade e as principais variáveis nesse processo são a temperatura do solo e o conteúdo volumétrico de água.

De acordo com Kucharik et al. (2000), para o cálculo do fluxo vertical de água no perfil do solo, a equação de Richards e a Lei de Darcy são utilizadas. O balanço vertical da água é controlado pelas taxas de infiltração, evaporação e transpiração, bem como pela redistribuição da água no perfil do solo.

Como dados de saída relativos a esse balanço hídrico vertical o IBIS disponibiliza o volume de água, em função do tempo, que entra no sistema por meio do escoamento superficial e drenagem sub-superficial na célula. Esses dados são utilizados no modelo THMB para calcular o volume e trânsito da água na célula, a propagação das vazões na rede de drenagem e o volume de água disponível para formação das planícies de inundação.

2.2.2.2 Modelagem dos processos fluviais

Os cálculos dos volumes de água e vazão em cada passo de tempo e célula do espaço, no THMB, são feitos baseando-se na equação de continuidade, a relação que determina que a variação do estoque no tempo é igual ao volume que entra menos o volume que sai, conforme Equação 2.1:

$$Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}} = \frac{dW}{dt} \quad (2.1)$$

na qual, Q_{entra} é a vazão que entra na célula considerada, Q_{sai} é a vazão que sai e dW a variação do volume estocado no intervalo de tempo dt .

Os tempos de trânsito da água na célula e na rede de drenagem regulam a variação de volume ao longo do tempo. Para representar isso, o modelo considera que cada célula do espaço contém três reservatórios que armazenam volume de água e cuja vazão de saída é regulada pelo tempo de residência ou “tempo de retardo” característico de cada um. Dois reservatórios caracterizam o escoamento superficial e sub-superficial no interior da célula e o terceiro, que recebe contribuição dos dois primeiros, representa o escoamento na rede de drenagem.

Inicialmente, o THMB calcula o balanço hídrico célula a célula. Nas parcelas alagadas, ou seja, em áreas cobertas por água, o balanço hídrico é feito considerando-se a precipitação (P) menos a evaporação potencial (E_v). Nas parcelas secas da célula, ou seja, nas áreas não cobertas por água, o balanço hídrico é representado por dois reservatórios lineares que utilizam os dados de escoamento superficial e drenagem sub-superficial produzidos pelo IBIS: o reservatório de escoamento superficial, cujo volume é representado por W_S ; e o reservatório de drenagem sub-superficial, cujo volume é representado por W_D . O THMB calcula o fluxo de água que sai desses reservatórios estabelecendo tempos de residência que funcionam como parâmetros de retardo da vazão na célula. Na Figura 2.2 é apresentado um esquema ilustrando as vazões de entrada (S_{in} e D_{in}), simuladas pelo IBIS e as vazões de saída (S_{out} e D_{out}) dos reservatórios, cujos volumes são representados por W_S e W_D , calculadas pelo THMB, célula a célula, para as áreas não cobertas por água.

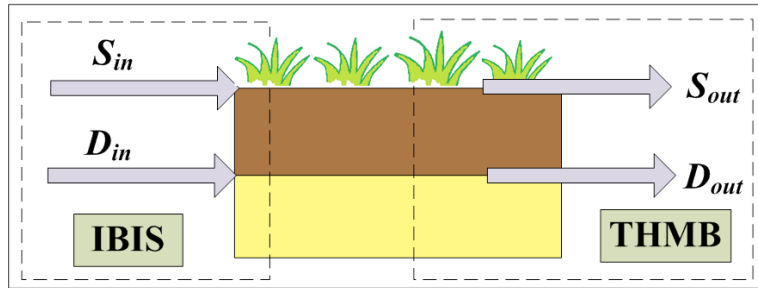


Figura 2.2 – Escoamento superficial e drenagem sub-superficial na célula.

A variação temporal dos volumes [m^3] dos dois reservatórios, controlada pelo tempo de residência em cada um (T_S e T_D), é definida pelas seguintes equações diferenciais (COE et al., 2002):

$$\frac{d(W_S)}{dt} = S_{in} - \frac{W_S}{T_S} \quad (2.2)$$

$$\frac{d(W_D)}{dt} = D_{in} - \frac{W_D}{T_D} \quad (2.3)$$

Os termos (W_S/T_S) e (W_D/T_D) são as taxas de saída de água de ambos os reservatórios, S_{out} e D_{out} , respectivamente.

As contribuições em termos de volume de água no tempo, calculadas para cada célula, atingem a rede de drenagem, a qual é representada por um terceiro reservatório: o reservatório fluvial, cujo volume é representado por W_R . Esse reservatório recebe as taxas de saída dos dois primeiros reservatórios nas áreas secas e o saldo $P-E_v$ nas áreas cobertas por água. Além dessas duas contribuições, o reservatório fluvial de cada célula recebe água das vizinhas adjacentes mais altas que a célula local ($FLUX_{in}$). A taxa de saída do reservatório fluvial, denominada $FLUX_{out}$, é regulada pelo tempo de residência da água nesse reservatório (T_R).

As áreas alagadas são obtidas utilizando-se um componente de cálculo que corresponde à fração de área coberta por água (A_w) em relação à área total da célula. Por convenção, como em COE et al. (2002), essa fração (A_w) varia de 1 (área totalmente coberta por água: por exemplo, lagos) a 0 (total ausência de água).

Portanto, o cálculo da área seca da célula é $(1-A_w) \cdot (A_t)$ e a área coberta por água é $(A_w) \cdot (A_t)$, sendo A_t a área total da célula.

Na Figura 2.3 são mostradas esquematicamente as entradas e saídas do reservatório fluvial, cujo volume é representado por W_R como descrito anteriormente nesta seção.

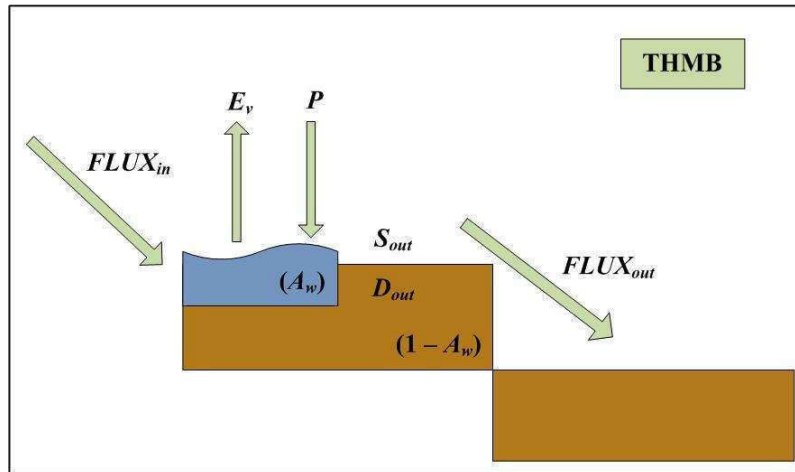


Figura 2.3 – Reservatório fluvial e seus componentes no modelo THMB.

O balanço hídrico no reservatório fluvial é representado pela variação do volume no tempo, dada pela Equação 2.4 (COE et al., 2002):

$$\frac{d(W_R)}{dt} = \left(\frac{W_S}{T_S} + \frac{W_D}{T_D} \right) \times (1 - A_w) + (P - E_v) \times A_w - \left(\frac{W_R}{T_R} \right) + \sum FLUX_{in} \quad (2.4)$$

na qual, o termo W_R/T_R representa a vazão de saída do reservatório fluvial (denominada $FLUX_{out}$ na Figura 2.3), P corresponde à precipitação; E_v à evapotranspiração; T_S , T_D e T_R aos tempos de residência em cada um dos reservatórios; $\sum FLUX_{in}$ à soma dos fluxos de água das células a montante (em m^3/s); W_S , W_D e W_R aos volumes dos respectivos reservatórios (em m^3); A_w à fração de área alagada na célula.

O tempo de residência da água no reservatório do sistema fluvial (T_R) não é pré-determinado, como no caso de T_S e T_D , mas definido como a razão entre a distância percorrida pela água (D) e a velocidade do fluxo (u) (COE et al., 2002). A distância percorrida pela água é definida como o produto da distância em linha reta entre os centros de duas células comunicantes pelo índice de sinuosidade da célula (COE et

al., 2008). Esse último é definido como a razão entre o comprimento de um rio entre duas células comunicantes, que é medido em um mapa, e o comprimento em linha reta entre os centros das duas células (COSTA et al., 2002; COE et al., 2008). Nas versões anteriores do THMB, como em Coe et al. (2002), a velocidade da água era dada em função apenas da declividade. No entanto, para uma representação mais realística das vazões, na versão mais recente do modelo (COE et al., 2008) a velocidade passa a sofrer influência de forças de atrito.

A inserção da componente referente às forças de atrito na fórmula da velocidade requer que alguns parâmetros morfológicos dos canais sejam estabelecidos, como o perímetro molhado. Para isso e para alguns cálculos relativos às planícies de inundação, é necessário conhecer a largura e altura dos canais, algo que dificilmente é feito para toda a extensão de uma bacia hidrográfica. Normalmente, esses dados só estão disponíveis para algumas estações fluviométricas e para o restante da superfície da bacia eles devem ser estimados de forma indireta. No THMB, uma relação estatística entre esses parâmetros e a área de drenagem a montante do trecho é estabelecida com base em dados observados. Obtém-se uma equação que é utilizada para estimar os valores para cada célula da superfície e que assume a seguinte forma:

$$X = \alpha A^\beta \quad (2.5)$$

na qual X é o parâmetro em questão, sendo ele a altura ou largura do canal; A é a área de drenagem a montante do trecho; α e β , coeficiente e expoente, respectivamente, definem a relação entre X e A. Essa relação foi utilizada para estimar os valores de altura e largura dos canais na bacia Amazônica em Coe et al. (2008), com dados observados de 287 estações fluviométricas na bacia, além de medições in situ. A associação existente entre a área de drenagem e os parâmetros físicos da morfologia da calha dos rios é uma relação comumente utilizada em modelos hidrológicos (e.g. nos modelos WATFLOOD e MGB).

Estabelecidas essas relações, obtém-se os parâmetros necessários para calcular o perímetro molhado médio de cada célula a cada passo de tempo, uma vez que o nível d'água considerado leva em conta o volume variável presente no canal. Para isso, calcula-se, inicialmente, a área de leito do canal multiplicando-se a largura média do

canal pela distância percorrida pela água na célula (D). Em seguida, o perímetro molhado é calculado pela seguinte equação:

$$p_c = 2 * (W_R / A_R) + [W_R / (H * D)] \quad (2.6)$$

na qual p_c é o perímetro molhado; W_R é o volume fluvial; A_R é a área do leito na célula; H é altura do canal principal do rio, estimada por meio da Equação 2.5; e D é o comprimento percorrido pela água entre duas células vizinhas comunicantes.

A razão entre o perímetro molhado real (p_c), em metros, e um perímetro molhado de referência ($p_o = 60$ m) define a variável aqui chamada de razão do perímetro (R), a qual integra a seguinte equação da velocidade adotada no modelo (COE et al., 2008):

$$u = u_{o1} (R * S)^{0.5} \quad (2.7)$$

na qual u_{o1} é uma velocidade mínima de referência (0,27 m/s); R é a razão do perímetro; e S é a razão entre o gradiente topográfico (declividade) i_c e um gradiente de referência, i_o . R e S são adimensionais.

A vazão (fluxo da água) que abandona o reservatório fluvial na célula, $FLUX_{out}$, é calculada por:

$$FLUX_{out} = W_R * \frac{u}{D} \quad (2.8)$$

na qual W_R é o volume do reservatório fluvial, u é a velocidade do fluxo e D é a distância percorrida pela água.

2.2.2.3 Planícies de inundação

As planícies de inundação são consideradas no THMB como um quarto reservatório. Elas recebem o volume que excede aquele do canal principal dos rios. No entanto, no THMB, as planícies de inundação não influenciam o transporte da água no canal, pois elas são como um compartimento independente cuja relação com o canal está apenas no volume que recebem dele. Inicialmente, calcula-se o volume máximo que o canal do rio pode comportar e, a partir desse volume, o excedente é transportado para as planícies de inundação. O volume máximo é calculado com base nas mesmas

relações estatísticas utilizadas para calcular o perímetro molhado médio na célula (COE et al., 2008).

A variação do volume de água no reservatório da planície de inundação é dada pela seguinte equação (COE et al., 2008):

$$\frac{dW_f}{dt} = F_R + \sum F_{fi} + (P - E_v)(A_w) - \frac{W_f}{T_f} \quad (2.9)$$

na qual W_f é o volume do reservatório das planícies de inundação; F_R é o fluxo de água do rio para a planície; $\sum F_{fi}$ é a soma dos fluxos recebidos das células da planície a montante da célula considerada; $(P - E_v)(A_w)$ é o produto da precipitação menos evaporação pela fração de área de superfície de água; e W_f/T_f é a vazão que deixa a célula da planície de inundação de acordo com o tempo de residência da água (T_f), o qual, por sua vez, é definido como a razão entre a distância percorrida pela água e a velocidade do fluxo na planície (detalhes adicionais podem ser obtidos em COE et al., 2008).

Os cálculos da fração de área alagada na célula e do nível d'água nas planícies de inundação são estimados em função do volume de água presente nas planícies e do desvio padrão das altitudes na célula. Isso é feito da seguinte forma (conforme COE et al., 2008):

- a) a imagem raster da elevação do terreno com resolução espacial de 1 km é reamostrada para a resolução de execução do modelo (5 minutos de arco), a partir da média das elevações; a mesma imagem também é utilizada para gerar o mapa de desvio padrão da elevação para a reamostragem feita;
- b) assume-se que as elevações na imagem de alta resolução seguem uma distribuição normal, na qual todos os valores de altitude dentro de uma célula (na resolução da simulação) se encontram dentro do intervalo -4σ a $+4\sigma$;
- c) o volume necessário para inundar uma célula inteira é considerado proporcional ao desvio padrão das altitudes na célula, uma vez que uma célula “achatada” demandaria menor volume de água para ser totalmente

coberta, enquanto uma célula com alto desnível interno demanda maior volume de água para ser totalmente coberta; portanto, o volume necessário para inundar metade da área da célula (W_{50}) é expresso pela seguinte equação:

$$W_{50} = \frac{\sigma \times A_t \times 0,39894228}{2} \quad (2.10)$$

na qual σ é o desvio padrão da altitude na célula; A_t é a área total da célula e 0,39894228 é a probabilidade da altitude média;

- d) calcula-se um valor crítico z , a partir de uma relação entre o volume de água presente na célula de planície, W_f e W_{50} , da seguinte forma (COE et al., 2008):

$$z = \log(W_f / W_{50}) \quad (2.11)$$

O valor de z será negativo quando $W_f < W_{50}$, positivo quando $W_f > W_{50}$ e igual a zero quando esses valores forem iguais.

- e) a fração de área alagada na célula é calculada por meio da probabilidade da função de distribuição acumulada $P(z)$;
- f) a altura da coluna d'água nas planícies (D_f) é calculada em função da área alagada na célula ($A_w * A_t$) utilizando a seguinte equação (COE et al., 2008):

$$D_f = \frac{W_f}{(A_w * A_t)} \quad (2.12)$$

Definida a altura da coluna d'água na célula, a cota do nível d'água, em metros acima do nível do mar, é estabelecida pela soma da altura da coluna d'água com a cota de altitude local. A diferença de nível d'água entre células de planície adjacentes é utilizada para definir as direções de fluxo em substituição às direções pré-estabelecidas com base no mapa de elevação do terreno. Portanto, de forma diferente ao caso dos rios, cujas direções de escoamento são pré-definidas, nas planícies de inundação as direções de fluxo são estabelecidas dinamicamente, a cada passo de tempo, com base na diferença de nível d'água entre células.

Os fluxos nas planícies de inundação são preferencialmente direcionados para células potencialmente alagáveis que ainda não atingiram a área alagável máxima, sendo que esta pode ser estimada por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, como por exemplo, através da análise de reflectância e da classificação de imagens de radar (e.g. HESS et al., 2003). No modelo THMB, aplicado à bacia Amazônica (COE et al., 2008; 2009), foi utilizada uma imagem temática da área alagável máxima da bacia produzida por Hess et al. (2009). A imagem original é uma máscara binária, na resolução de 1km, que classifica as células nos valores 0 (ausência de área alagável) e 1 (área alagável).

A vazão que abandona o reservatório de planície de inundação em direção à célula vizinha mais baixa em nível d'água é definida da mesma forma que para os rios (Equação 2.8).

Detalhes adicionais sobre os cálculos efetuados no modelo THMB para as planícies de inundação podem ser obtidos por meio da literatura de referência: COE et al., 2002, 2008, 2009.

2.2.2.4 Parâmetros do modelo

Para executar uma simulação no THMB é necessário ajustar seus parâmetros, os quais incluem aspectos do tempo de execução e da morfologia fluvial. Na versão FORTRAN, os parâmetros que tratam do recorte de área da bacia também necessitam ser ajustados, no entanto, esses parâmetros não serão mencionados aqui porque a versão implementada no Dinamica EGO não requer a declaração desses valores. Os parâmetros do modelo que necessitam de ajuste são os seguintes:

- **parâmetros de tempo:** ano inicial da série histórica (relativo ao conjunto de dados a ser acessado); ano inicial da simulação; número de anos da simulação;
- **parâmetros dos reservatórios de escoamento superficial e drenagem sub-superficial:** tempo de residência no reservatório de drenagem sub-superficial (T_d); tempo de residência no reservatório de escoamento superficial (T_s);

- **parâmetros do reservatório fluvial:** velocidade mínima de referência para rios (u_{0l}); perímetro molhado de referência; coeficiente para equação empírica que determina largura dos canais; expoente para equação empírica que determina largura dos canais; coeficiente para equação empírica que determina altura máxima dos canais; expoente para equação empírica que determina altura máxima dos canais;
- **parâmetros do reservatório das planícies de inundação:** velocidade mínima de referência da água nas planícies de inundação; parâmetro de ajuste da velocidade nas planícies de inundação; parâmetro de ajuste do início da inundação;
- **outros parâmetros:** valor de truncamento; valor de referência da declividade.

Dentro desse conjunto de parâmetros a velocidade mínima de referência para rios influencia diretamente na forma dos hidrogramas. Os parâmetros relativos à velocidade nas planícies de inundação influenciam no tempo necessário para a água atingir as planícies.

2.2.2.5 Tratamento de dados

Nesta seção é apresentada uma descrição do tratamento dos dados necessários ao modelo THMB para a representação da superfície em estudo. Esses dados incluem a altimetria da bacia e dados que caracterizam o escoamento, como o mapa de direções de fluxo e mapa da área de drenagem acumulada.

O modelo digital de elevação (MDE) é o mapa básico para a geração da maioria dos mapas de caracterização da superfície. O MDE é uma imagem raster cujos valores representam a altitude média de cada célula da superfície. No modelo THMB, um MDE de resolução superior à resolução espacial de execução do modelo é utilizado para gerar dois outros mapas: um MDE na resolução de execução com base na média das altitudes das células reamostradas para a nova resolução e um mapa de desvio padrão das altitudes que foram convertidas na altitude média. Esses dois

procedimentos, representados na Figura 2.4 pelas letras A e B, podem ser feitos por meio de softwares de geoprocessamento e processamento digital de imagens, como o ArcGIS (Esri®), o ERMapper (ERDAS, Inc.), o SPRING (desenvolvido pelo INPE), entre outros. O processo de mudança de resolução da imagem por reamostragem também pode ser executado no software Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002).

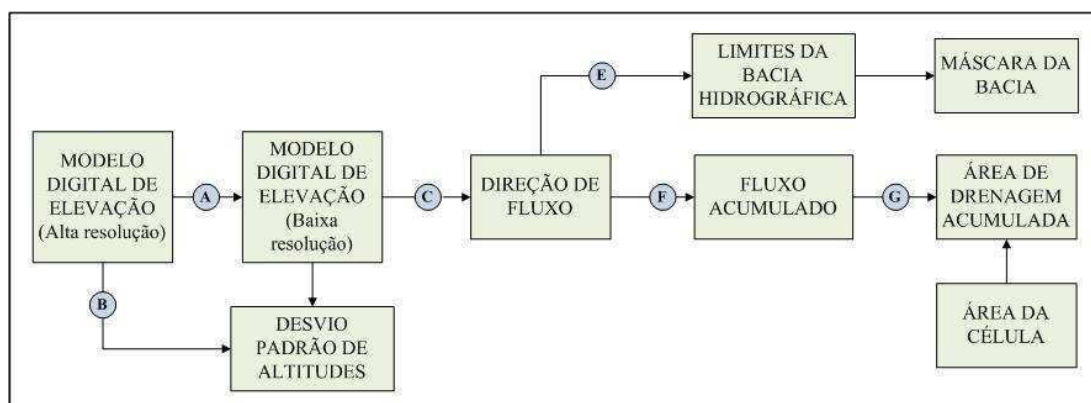


Figura 2.4 – Fluxograma do tratamento dos dados de caracterização da superfície.

Após a geração do MDE na resolução do modelo (Figura 2.4 – A), o MDE passa por alguns processamentos para a geração do mapa de direção de fluxo (Figura 2.4 – C). O mapa de direção de fluxo é essencial para qualquer modelo hidrológico e consiste em uma matriz cujos valores indicam a célula vizinha a jusante de cada célula, ou seja, entre oito células vizinhas a uma célula central, o valor da direção de fluxo indica aquela que receberia água da célula central. A célula vizinha que receberá água é aquela que possui maior declividade entre as oito vizinhas da célula central. A declividade é calculada pela diferença entre a altitude da célula central e da célula vizinha, dividida pela distância entre os centros de ambas as células. Os valores de direção de fluxo são normalmente representados por potências de 2, variando de 2^0 a 2^7 . No entanto, na versão original do modelo THMB, a opção escolhida foi numerar as oito vizinhas de 1 a 8. Na Figura 2.5(a) são apresentadas as oito direções possíveis, representadas por potências de 2 (Figura 2.5(b)) e representadas de 1 a 8, como no THMB (Figura 2.5(c)).

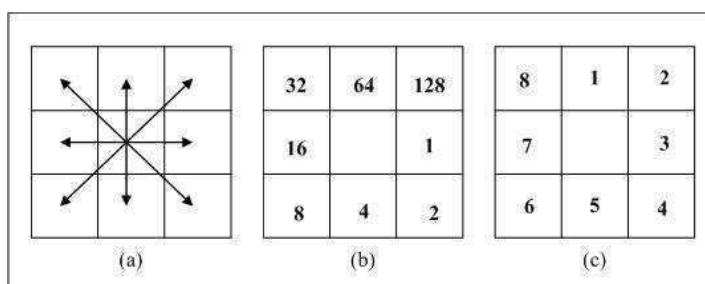


Figura 2.5 – (a) Direções possíveis de fluxo; (b) Representação em potências de 2; (c) Representação no THMB.

O tratamento necessário ao MDE para geração do mapa de direção de fluxo (Figura 2.4 – C) consiste na aplicação de um algoritmo que faz uma varredura no mapa de elevação em busca de depressões no terreno que possam introduzir erros no mapa de direção de fluxo. Em seguida, a altura das células correspondentes a pontos com depressão é alterada para remover as depressões (conhecidas como sinks ou pits). As depressões em um MDE podem ser fruto de feições naturais, erros na imagem ou mesmo depressões criadas pelo processo de reamostragem da imagem. Essas depressões criam pontos em que as direções de fluxo entram em conflito (se opoendo uma à outra, por exemplo), o que não permite que o fluxo representado siga seu curso natural em direção à foz da bacia. Por esse motivo, o procedimento de remoção de depressões é essencial. Atualmente, os softwares comerciais apresentam algoritmos de remoção de depressões, como, por exemplo, o ArcGIS, o qual possui um pacote de algoritmos para execução de funções de geoprocessamento relativas a recursos hídricos.

Após o processo de criação do mapa de direção de fluxo, procede-se a delimitação da área da bacia (Figura 2.4 – E). Um algoritmo, também disponível em softwares comerciais, é utilizado para identificar as cotas mais altas da bacia, as quais funcionam como divisores de águas entre uma bacia e outra. A delimitação da bacia é útil para definir a área de simulação, atuando como uma máscara que indica quais células passarão pela simulação e quais serão desconsideradas.

Em seguida, o mapa de fluxo acumulado e o mapa de área de drenagem acumulada (Figura 2.4 – F e G) são criados com base no mapa de direção de fluxo. O fluxo acumulado consiste no somatório gradual do número de células que contribuem para

o fluxo de uma dada célula. O mesmo procedimento é feito para o cálculo da área de drenagem acumulada, porém, ao invés de ser considerado o somatório do número de células, considera-se o somatório das áreas de cada célula contribuinte. O cálculo do fluxo acumulado pode ser executado em softwares comerciais de geoprocessamento, ou mesmo na plataforma de modelagem Dinamica EGO (Capítulo 3 – Seção 3.1).

Se os mapas utilizados forem apresentados em coordenadas geográficas, sendo a resolução espacial da célula indicada por graus ao invés de unidades métricas e se a área a ser modelada for grande (por exemplo, extensão semelhante à da bacia do rio Madeira – Amazonas), é recomendável calcular a área de cada célula considerando a variação no valor de área decorrente das diferentes latitudes. Isso ocorre porque na representação esférica da Terra, a largura de uma faixa longitudinal varia conforme a latitude, sendo gradualmente menor em direção aos pólos e máxima na altura da linha do Equador.

Para a correção da área das células, considerando uma representação esférica da Terra, divide-se o valor da circunferência da Terra (em metros) por 360° e, em seguida, multiplica-se pelo valor da resolução do mapa (em graus decimais). O valor obtido é o comprimento médio entre as latitudes que delimitam a célula (aqui definido como dy), cujo valor será igual para todas as células do mapa. Em seguida, define-se a largura média da célula (em metros, aqui definida como dx) de acordo com a latitude do centro da célula, uma vez que o comprimento em metros da circunferência delimitada pelo plano de uma dada latitude equivale ao comprimento da circunferência máxima da Terra multiplicado pelo cosseno da latitude. Dessa forma, um mapa com as diferentes áreas de célula pode ser criado. Essa operação pode ser feita no Dinamica EGO. O mapa de área de célula servirá para diversos cálculos posteriores, como, por exemplo, o cálculo da distância entre os centros de células vizinhas e o cálculo do mapa de área de drenagem acumulada.

Os mapas mencionados anteriormente são utilizados como dados de entrada para o modelo THMB, juntamente com o mapa de vegetação, o mapa de áreas alagáveis máximas e os mapas climáticos.

Para introduzir o processo de implementação da versão do modelo THMB apresentada neste trabalho, é necessário, inicialmente, apresentar alguns conceitos relativos às plataformas de modelagem e outros meios possíveis de implementação de modelos. No Capítulo 3 são apresentados, de forma sucinta, estes conceitos e uma descrição da plataforma de modelagem Dinamica EGO, utilizada neste trabalho.

3 PLATAFORMAS DE MODELAGEM

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão geral sobre algumas formas de implementação de modelos, dando ênfase às plataformas de modelagem, e uma descrição da plataforma Dinamica EGO, utilizada neste trabalho.

A construção e implementação de modelos demanda o uso de um ambiente computacional. Desta forma, os modelos podem ser construídos e implementados utilizando linguagens de programação de propósito geral, como C++, FORTRAN, Java, ou linguagens de domínio específico para modelagem, como a linguagem EGO (do inglês, Environment for Geoprocessing Objects) que é a linguagem textual da plataforma Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002). Além disso, os modelos podem ser implementados e executados por meio de interfaces gráficas ou em linhas de comando. Alguns modelos possuem código aberto, de forma que o usuário pode alterar suas funções e equações; outros apenas permitem que o usuário declare os valores dos parâmetros para a execução.

Uma possibilidade para a construção de modelos é por meio do uso de bibliotecas de funções específicas para modelagem (como no MATLAB[®], R, C++). Além disso, existem programas que se apresentam como plataformas para desenvolvimento e execução de modelos escritos em linguagens de domínio específico (Vensim[®], Simulink[®], TerraME, Dinamica EGO). Esses tipos de programas serão genericamente denominados por plataforma de modelagem para a finalidade deste trabalho.

As plataformas de modelagem se apresentam como um espaço de trabalho no qual o usuário constrói modelos a partir da combinação de funções pré-definidas existentes nas bibliotecas do programa. As funções podem ser fechadas, nas quais o usuário insere apenas os valores dos parâmetros necessários para sua execução, ou abertas, nas quais o usuário tem a liberdade de definir uma expressão matemática ou lógica de seu interesse.

Algumas plataformas possuem interfaces gráficas por meio das quais o usuário pode construir os modelos, sendo uma opção às linhas de comando. No caso do Vensim[®]

(Ventana Systems, Inc., 2009), Simulink[®] (Mathworks, Inc., 2010), Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002) e Stella[®] (isee Systems, n.d.), por exemplo, os modelos podem ser construídos utilizando uma combinação de blocos e conectores, formando uma espécie de fluxograma que representa os processos que estão sendo modelados.

Os softwares Stella[®] (iee Systems, n.d.), TerraME (CARNEIRO, 2006) e Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002) são plataformas de modelagem específica para modelos ambientais. Em especial, o TerraME e o Dinamica EGO permitem uma abordagem espacial dos fenômenos.

Neste trabalho foi escolhido Dinamica EGO para a implementação do modelo THMB por sua facilidade no processamento de mapas raster e pela existência de funções típicas de modelagem ambiental já implementadas neste ambiente. A seguir é apresentada uma breve descrição desse software.

3.1 Dinamica EGO

O Dinamica EGO (SOARES-FILHO et al., 2002) é uma plataforma de modelagem desenvolvida para modelos espacialmente explícitos, também conhecidos como modelos de paisagem, modelos espaciais, ou mesmo modelos distribuídos. A sigla EGO significa Environment for Geoprocessing Objects (Ambiente para Objetos de Geoprocessamento).

Além de funções típicas de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), tais como as operações relativas à álgebra de mapas, o Dinamica EGO possui uma série de funcionalidades destinadas à modelagem e simulação de modelos espaciais. Isso viabiliza a construção de cenários futuros relativos a problemas ambientais e suas consequências a longo prazo, como é o caso dos problemas relativos à dinâmica de áreas urbanas (ALMEIDA, 2003), influência da pavimentação de estradas sobre o avanço do desmatamento (SOARES-FILHO et al., 2004) e modelagem probabilística de incêndios florestais (SILVESTRINI et al., 2007). Além disso, o Dinamica EGO também oferece várias ferramentas aplicadas ao cálculo de direções de fluxo de água,

emissões de carbono por desmatamento, métricas de paisagem, entre outros (SOARES-FILHO et al., 2009).

A construção de modelos no Dinamica EGO se dá por meio de uma interface gráfica ou de sua linguagem de programação, EGO. Os modelos podem receber como entradas mapas no formato raster, tabelas e constantes. As ferramentas oferecidas pelo Dinamica EGO se encontram disponíveis na interface por meio de operadores que executam funções específicas, chamados functors, os quais são representados graficamente por polígonos, similares aos utilizados para fluxogramas, cuja forma varia de acordo com a classe a que pertencem e são separados por tipos em abas presentes na janela library da interface.

Os functors processam os dados recebidos por meio de seus portos de entrada e disponibilizam os dados resultantes nos portos de saída. Para construir um modelo, o usuário seleciona os functors de seu interesse e arrasta-os até o painel de desenho da interface. O fluxo dos dados se dá por meio das conexões que são estabelecidas entre os portos compatíveis de saída e entrada dos functors e representadas graficamente por setas. O modelo, então, se estabelece pela combinação de um conjunto de operadores visando um resultado específico.

As funções relativas à simulação são possíveis graças aos functors especialmente desenvolvidos para isso, os quais permitem o estabelecimento de dependências temporais para representação de processos que envolvem retroalimentações, repetições e associações de estados presentes a estados precedentes. Operadores adicionais permitem ainda o controle do fluxo de dados, por exemplo, condicionando a continuidade ou a escolha de um entre vários caminhos de execução.

Os resultados gerados pelo modelo são disponibilizados na forma de mapas raster, tabelas e valores. Ferramentas de visualização favorecem a apresentação dos dados, como é o caso do Visualizador de Mapas (Map Viewer), por meio do qual é possível exibir uma imagem e ajustar o histograma, além de alterar a paleta de cores utilizada para a visualização.

Na Figura 3.1 é apresentada uma ilustração da interface gráfica do software Dinamica EGO. E na Figura 3.2 é apresentado um exemplo do Visualizador de Mapas (Map Viewer).

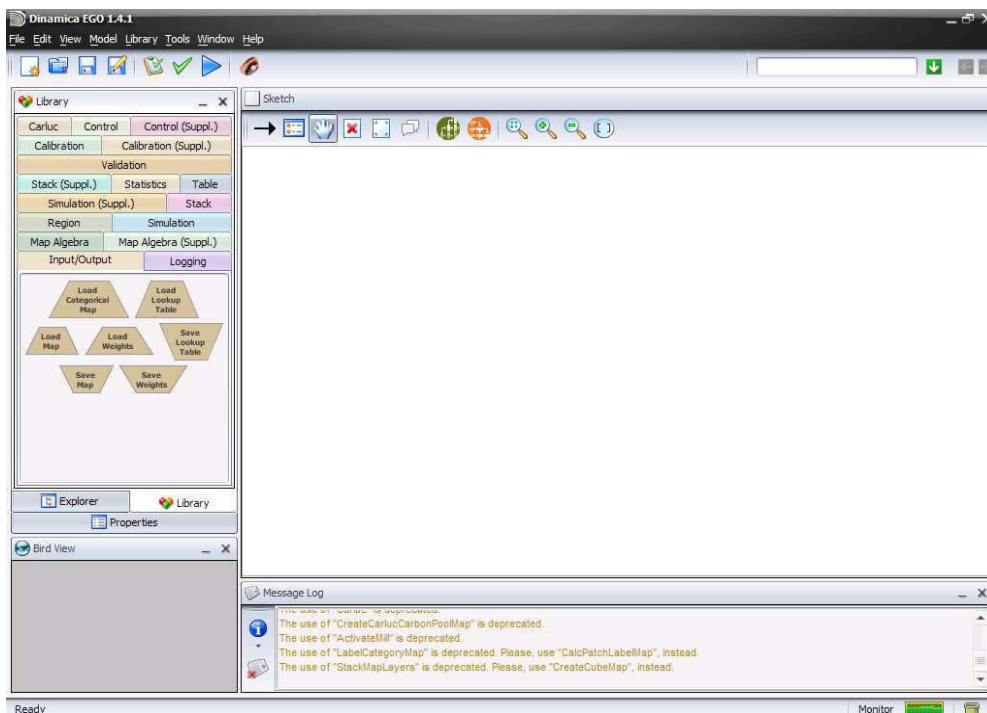


Figura 3.1 – Interface gráfica do Dinamica EGO.

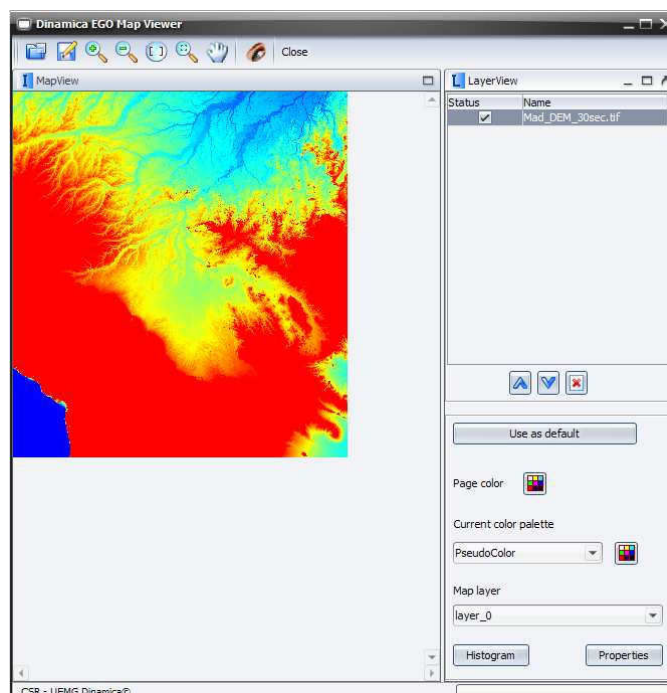


Figura 3.2 – Visualizador de imagens do Dinamica EGO.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

O modelo THMB (Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry), originalmente implementado na linguagem FORTRAN, foi implementado na plataforma de modelagem Dinamica EGO (descrita no Capítulo 3 - Seção 3.1) tendo como objetivo facilitar seu uso por meio de uma interface gráfica acessível, amigável e de fácil instalação e, também, facilitar seu futuro acoplamento a modelos de mudanças de uso da terra desenvolvimento nessa plataforma. A abordagem das duas versões difere em alguns aspectos que dizem respeito às especificidades das linguagens de programação referentes a cada uma das versões. Neste capítulo são apresentados alguns tópicos relativos ao processo de construção da versão no Dinamica EGO (tratamento dos dados de entrada, iterações temporais, reservatórios lineares e armazenamento de dados) de forma simplificada, comparando-a com a versão FORTRAN.

A versão implementada no Dinamica EGO não apresenta a parte referente à simulação de lagos. Essa componente do modelo original foi deixada de lado em virtude do fato de que, na resolução espacial original do modelo (5 minutos de arco) os lagos brasileiros não apresentam proporções significativas considerando a simulação sobre bacias do porte da bacia Amazônica, por exemplo.

4.1 Tratamento dos dados de entrada

A declaração de variáveis em FORTRAN é feita no início do programa, agrupando-as por tipo, como real, inteiro, caracteres. Ademais, os parâmetros iniciais do modelo são também listados, com os valores definidos para a execução do programa. No Dinamica EGO, as variáveis só precisam ser declaradas no ponto em que são lidas, acessadas ou utilizadas para cálculo. Dentro dos functors do Dinamica EGO, há portos onde nome, valor e comentário para a variável são inseridos ou definidos por meio da conexão com outros functors. Para facilitar o acesso aos parâmetros iniciais do modelo, ou seja, valores que não se alterarão durante a execução, mas que podem ser ajustados em cada caso de aplicação, um functor do tipo container Group é utilizado para agrupá-los em um ponto externo aos cálculos do modelo. Dessa forma,

o usuário não precisa recorrer aos diversos pontos em que os parâmetros são utilizados para alterá-los, bastando modificá-los nesse ponto inicial.

Duas categorias de mapas são utilizadas no modelo THMB: os mapas que retratam as características físicas, aqui chamados de “morfológicos” (como modelo digital do terreno e cobertura vegetal), e os mapas climáticos (séries de mapas com valores de médias mensais, por exemplo, para variáveis como precipitação e evaporação).

No THMB – versão FORTRAN os mapas se encontram no formato Network Common Data Format – netCDF, o qual comporta uma combinação de mapas inter-relacionados. O formato netCDF é comumente utilizado entre os pesquisadores da modelagem climatológica. Para a interpretação das informações no arquivo netCDF e associação com as respectivas variáveis uma sub-rotina é chamada e seus argumentos são declarados.

A utilização dos arquivos nesse formato impõe algumas desvantagens, como a dificuldade na manipulação dos dados, a necessidade do usuário ser familiarizado com sub-rotinas necessárias para a leitura e processamento dos arquivos e com a organização interna de um arquivo netCDF. Além disso, o usuário deve converter dados de outras fontes para o referido formato. Por outro lado, grande parte dos modelos atmosféricos e dos bancos de dados climatológicos disponibilizam dados no formato netCDF. Além disso, o netCDF possibilita a compactação de muitos mapas em um só arquivo e, também, a associação de várias variáveis para uma mesma célula.

O Dinamica EGO suporta, atualmente, mapas raster nos seguintes formatos de arquivo: TIFF (Tagged Image File Format), com extensões .tif e .tiff, ASCII (American Standard Code for Information Interchange), com extensões .asc e .ers (arquivo no formato ASCII do software ERMapper). A plataforma ainda não trabalha com arquivos netCDF e, portanto, as camadas de mapas nesse formato devem ser extraídas e convertidas para um dos formatos suportados pelo software.

Duas resoluções espaciais diferentes são utilizadas no THMB – versão FORTRAN e alguns cálculos são feitos para correlacionar os pontos nas duas resoluções. O THMB

admite também trabalhar com mapas de tamanhos diferentes desde que sejam declaradas as coordenadas dos limites da área sobre a qual o modelo será aplicado. Dessa forma, o mapa da América do Sul, por exemplo, pode ser utilizado para executar o modelo sobre a bacia Amazônica ou sobre a bacia do rio São Francisco, bastando que sejam indicadas as coordenadas da área de estudo entre os parâmetros iniciais do modelo.

No Dinamica EGO, todos os mapas devem ter as mesmas dimensões em termos de linhas e colunas, a mesma resolução e ser recortados para a mesma região. Isso faz com que a versão nessa plataforma não apresente a mesma flexibilidade do THMB – versão FORTRAN quanto a mudança da área a ser modelada no mapa sem mudar os arquivos de entrada e também combinar mapas com diferentes resoluções. No entanto, a abordagem do Dinamica EGO simplifica a utilização dos mapas e o entendimento do processo pelo usuário, mesmo os dados de entrada tendo que ser pré-processados.

Para padronizar os mapas de entrada do THMB – versão Dinamica EGO, as camadas de interesse dos arquivos netCDF devem ser extraídas e os mapas correspondentes devem ser convertidos para um dos formatos suportados pelo Dinamica EGO (utilizando um algoritmo externo de conversão). O recorte dos mapas e a resolução podem ser uniformizados utilizando o functor Resample Map do Dinamica EGO, o qual permite executar essas operações em um mapa, ou conjunto de mapas, tendo um outro como modelo, exigindo apenas que estejam na mesma projeção cartográfica.

Os mapas são acessados pelo Dinamica EGO por meio de functors Load Map, os quais requerem a declaração do caminho para acesso ao arquivo e o valor nulo a ser considerado no mapa (para células com ausência de valor). Um container Workdir pode também ser utilizado para englobar todos os Load Maps fornecendo um caminho único para o diretório que contém os arquivos a serem acessados. O Load Map também oferece um campo de comentário para detalhes a respeito do mapa e o campo alias permite estabelecer um nome para a variável associada ao mapa.

Os mapas morfológicos foram agrupados em um container Group externo aos cálculos para facilitar a troca de mapas, de forma que o usuário não tenha que

percorrer o modelo em busca dos pontos onde os mapas são acessados pelo modelo. O mesmo não pôde ser feito para os mapas climáticos, uma vez que sua leitura depende do passo de tempo em que se encontra o modelo, o que é estabelecido dentro dos containers Repeat, os quais são descritos na Seção 4.2.

4.2 Iterações temporais

Dentre os parâmetros iniciais do modelo estão os dados relativos a tempo, para execução do modelo, como ano inicial e número total de anos da execução. Na versão FORTRAN esses dados são fornecidos num arquivo-texto externo. No Dinamica EGO, eles são junto com os parâmetros iniciais da execução, no Group de tabelas e valores constantes (abordado na Seção 4.1).

O passo de tempo do modelo THMB está ajustado para 1 hora. No entanto, os mapas climáticos que alimentam o modelo se referem a valores médios mensais, de forma que a obtenção de valores horários se dá extraindo e interpolando linearmente os valores mensais. Além disso, os valores finais do modelo também são disponibilizados em termos de médias mensais. No entanto, ambas as versões permitem que o usuário obtenha resultados diários ou anuais, bastando que o mesmo saiba utilizar as respectivas linguagens e compreenda as limitações do modelo. O modelo necessita entre alguns meses a 2 anos para entrar em equilíbrio, dependendo da extensão e resolução dos mapas.

Diversas funções são executadas de acordo com a sua extensão temporal, seja ela horária, diária, mensal ou anual. Isso requer que o modelo execute um conjunto de iterações aninhadas para representação desses ciclos. Na versão FORTRAN isso é feito utilizando o comando **Do** para cada repetição, como no exemplo simplificado apresentado na Figura 4.1, no qual **anostotais** se refere ao número total de anos da execução; **ndpmes(mes)** é o número de dias do mês (de acordo com o mês); e **nppdia** se refere ao número de passos de tempo por dia.

Do ano = inicial, anostotais	Repetição anual
Do mes = 1,12	Repetição mensal
Do dias = 1, ndpmes(mes)	Repetição diária
Do passo = 1, nppdia	Repetição horária
Calculos	Cálculos
Continue	Fecha repetição horária
Continue	Fecha repetição diária
Continue	Fecha repetição mensal
Continue	Fecha repetição anual

Figura 4.1 – Exemplo de implementação de iterações temporais no modelo THMB – versão FORTRAN.

No Dinamica EGO, essas repetições podem ser representadas aninhando-se os containers Repeat, um para cada **Do** correspondente. Esses containers permitem que uma série de operações internas seja executada várias vezes consecutivas, de acordo com o número de repetições estipuladas pelo usuário. O número de repetições pode ser inserido manualmente (por exemplo, a repetição mensal pode ser estabelecida em 12) ou ser ajustada de acordo com outros cálculos (por exemplo, o número de repetições diárias é dado em função do número de dias de cada mês). Em ambos os casos, o número de repetições é definido no porto de entrada Iterations, seja inserindo o valor ou ligando um conector advindo de um functor Calculate Value. Na Figura 4.2 é apresentado esquematicamente como as iterações temporais do modelo THMB foram estruturadas na interface gráfica do Dinamica EGO utilizando os containers Repeat.

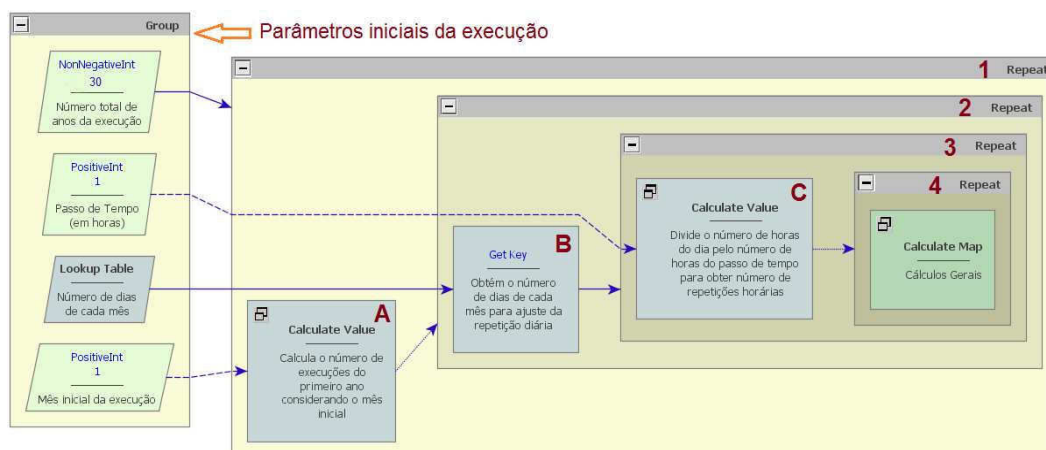


Figura 4.2 – Exemplo de estruturação e implementação de iterações temporais no Dinamica EGO.

Na Figura 4.2, à esquerda, alguns parâmetros iniciais do modelo, como número total de anos da simulação e mês inicial da execução, são agrupados no container Group externamente aos cálculos iterativos, como descrito na Seção 4.1. De 1 a 4, na Figura 4.2, estão os containers Repeat aninhados que modelam as iterações anuais, mensais, diárias e horárias, respectivamente. Os blocos definidos como A, B e C, nessa figura, representam os functors responsáveis pelo ajuste do número de iterações, de acordo com os parâmetros iniciais da execução, lançando seus valores calculados por meio da conexão dos portos de saída com os portos Iterations dos containers Repeat. O Calculate Value A define o número de meses da execução para cada ano, permitindo a execução de anos completos ou incompletos; o functor Get LookupTable Value B obtém o número de dias de cada mês utilizando uma tabela pré-estabelecida e no modelo THMB, um cálculo para os anos bissextos ajusta o número de dias do mês de fevereiro. O Calculate Value C, por sua vez, divide as 24 horas do dia pelo valor do passo de tempo horário para obter o número de iterações a serem feitas por dia.

4.3 Operações matemáticas no Dinamica EGO

As operações matemáticas no Dinamica EGO são feitas sobre três tipos de variáveis: valores, tabelas e mapas. As tabelas se assemelham aos vetores, ou seja, um conjunto de elementos identificados por chaves. Os mapas são como matrizes onde cada posição (linha, coluna) é georreferenciada num sistema de coordenadas definido e possui um valor médio relativo ao aspecto que está sendo abordado, representando uma fração da área da superfície terrestre. No Dinamica EGO, os cálculos sobre valores, tabelas e mapas são feitos utilizando, respectivamente, três functors, a saber: Calculate Value, Calculate Table e Calculate Map. O fluxo de dados se dá por meio de conectores que associam diferentes functors através de seus portos de entrada e de saída. Detalhes adicionais sobre a forma como as operações algébricas no Dinamica EGO podem ser obtidos em Rodrigues et al. (2007).

A execução de operações matemáticas sobre um mapa no FORTRAN se dá utilizando-se o comando Do sobre linhas, seguido do mesmo comando sobre colunas aninhado no primeiro, com o objetivo de percorrer as células do mapa. Uma série de

cálculos pode ser definida para uma mesma célula antes de se passar para a célula seguinte e a variável, uma vez alterada, não pode ter seu valor anterior conservado, a não ser que se declare outra variável para essa finalidade. Na Figura 4.3 é mostrado um exemplo de como os cálculos são feitos sobre um mapa no código FORTRAN, percorrendo linhas e colunas. O exemplo também demonstra a necessidade de se declarar uma segunda variável (histórico) para armazenar um valor que não se deseja perder (Equação A) antes de executar outros cálculos (Equação C) sobre a variável que continha um valor inicialmente.

<pre> Do i = 1, TotalLinhas Do j = 1, TotalColunas calculo(i,j) = calculo(i,j) + 100 historico(i,j) = calculo(i,j) calculo(i+1,j+2) = calculo(i,j) - 50 calculo(i,j) = calculo(i,j)*2 end Do end Do </pre>	<pre> Definindo linhas a percorrer Definindo colunas a percorrer Equação A Armazena valor da 1ª equação Equação B Equação C Fecha varredura sobre colunas Fecha varredura sobre linhas </pre>
--	---

Figura 4.3 – Exemplo código FORTRAN para execução de operações algébricas.

Ao utilizar functor Calculate Map do Dinamica EGO, cuja função é executar cálculos sobre um mapa, não é necessário escrever um algoritmo para percorrer linhas e colunas, pois o próprio functor executa essa ação. Portanto, dentro de um Calculate Map, uma expressão algébrica é escrita e executada sobre todo o mapa, célula a célula. O armazenamento de valores de cálculos prévios é facilmente resolvida no Dinamica EGO: o design do fluxo de dados permite que o resultado obtido em um operador possa ser utilizado em caminhos diferentes de cálculo e sempre resgatado ao estabelecer uma conexão entre o functor que gerou o valor inicial e qualquer ponto do modelo em que se queira trabalhar com esse valor, sem a necessidade de criar uma variável para armazenamento como no FORTRAN. Na Figura 4.4 é apresentada uma representação simplificada do cálculo da vazão fluvial com o objetivo de facilitar a compreensão da construção do fluxo de dados na interface gráfica do Dinamica EGO. Nessa figura, à esquerda, são apresentados alguns mapas iniciais, como de altitude, área de célula e direção de fluxo da água. Esses mapas são conectados a dois Calculate Maps, externos às iterações do container Repeat à direita, uma vez que se referem ao cálculo de mapas cujos valores permanecerão constantes durante a execução do modelo. Em seguida, o container

Repeat define as iterações temporais nas quais estão contidos os cálculos que geram valores variáveis a cada passo de tempo. Um Group representa os cálculos do volume de água do sistema fluvial e, junto com o mapa de declividade, é utilizado para calcular a velocidade da água. Por último, a vazão é calculada relacionando velocidade e volume.

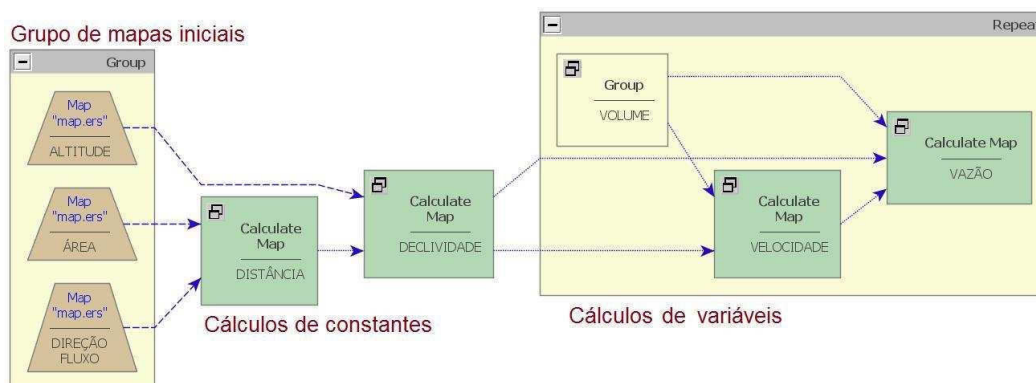


Figura 4.4 – Exemplo de estruturação e implementação de operações algébricas no Dinamica EGO.

4.4 Implementação de um reservatório linear

O aninhamento de iterações em um modelo exige um cuidado para com aquelas variáveis que são cumulativas e que, portanto, requerem que o valor da iteração precedente seja utilizado para gerar o da iteração atual. Essa situação acontece no modelo THMB, por exemplo, na abordagem do reservatório linear (Capítulo 2 – Seção 2.2.2.2), quando aplicado para o reservatório do escoamento superficial na célula.

Na Figura 4.5 é reproduzido, de forma simplificada, um trecho do código em FORTRAN do modelo THMB em sua versão original. Nesse trecho de código é apresentada a implementação da Equação 2.2 do modelo (Capítulo 2 – Seção 2.2.2.2), referente à variação de volume do reservatório do escoamento superficial na célula.

1	Do ano = inicial, anostotais	Repetição anual
2	Do mes = 1,12	Repetição mensal
3	Do dias = 1, ndpmes	Repetição diária
4	Do passo = 1, nppdia	Repetição horária
5	Sout = Ws(i,j)/Ts	Cálculos
6	Ws(i,j)=Ws(i,j)+(Sin-Sout)*timestep	Cálculos
7	Continue	Fecha repetição horária
8	Continue	Fecha repetição diária
9	Continue	Fecha repetição mensal
10	Continue	Fecha repetição anual

Figura 4.5 – Exemplo de representação e implementação do reservatório fluvial no THMB – versão FORTRAN.

A linha 5 do script da Figura 4.5 representa o último termo da Equação 2.2, sendo **Sout** a taxa de saída de água do reservatório de escoamento superficial que é regulada pelo tempo de residência **Ts**. O volume presente nesse reservatório é definido pela variável **Ws**, a qual consiste no volume do passo de tempo precedente, somado ao volume que ela recebe no passo de tempo corrente menos o volume que deixa a célula, o que é expresso por **(Sin - Sout)*timestep**, sendo **Sin** a taxa de entrada de água no reservatório do escoamento superficial.

Assim, o volume do passo corrente (tempo **t**) está em função do volume do passo precedente (no tempo **t-1**). A variável **Ws** não perde o último valor armazenado em nenhum ponto da execução porque não é zerada durante as iterações. No Dinamica EGO, como os functors não guardam valores de cálculos precedentes, não seria possível escrever em um mesmo Calculate Map expressões como **Volume(t) = Volume(t-1) + Δvolume(t)**. Para resolver isso, existem três functors que são utilizados para armazenar o valor produzido na iteração imediatamente anterior à atual: Mux Value, Mux Table e Mux Map, cada qual utilizado para cada um dos três tipos de variáveis no Dinamica EGO. Na Figura 4.6 são apresentados os quatro Repeats referentes às iterações temporais aninhadas (1 a 4), um Mux Map para cada Repeat (A a D), um Load Map que carrega os dados de entrada do escoamento superficial calculado pelo IBIS (b), um mapa de valores zerados (a), um Calculate Map para o cálculo do volume **Ws**, representado no modelo por **SVOL (Z)** do reservatório, e outro (Y) para o cálculo da taxa de saída da água do reservatório de escoamento **S_{out}**, representado no modelo por **SOUT**, com base no volume do tempo (t - 1) e no tempo de residência **Ts**, representado na figura por **RES. TIME**.

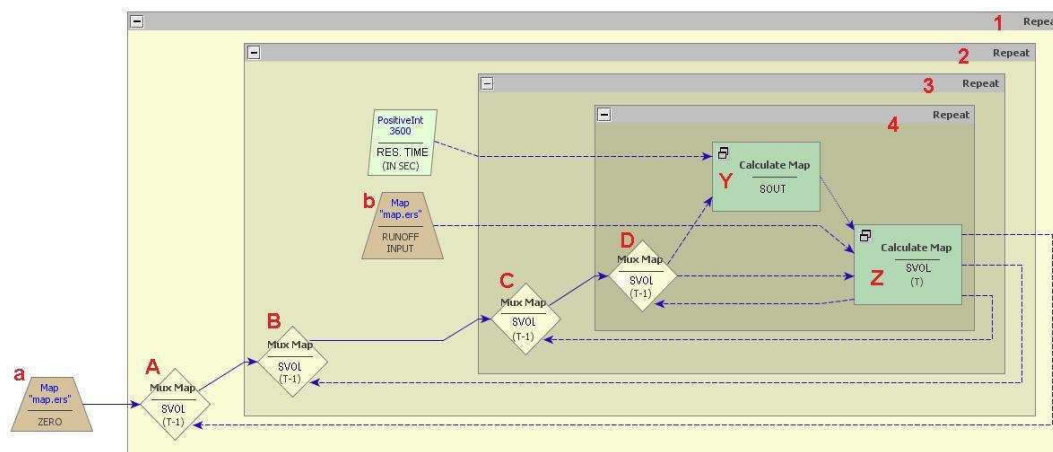


Figura 4.6 – Exemplo da conservação de valores entre iterações temporais aninhadas no Dinamica EGO.

O Calculate Map Z, da Figura 4.6, efetua o cálculo referente às linhas 6 e 7 da Figura 4.5. O Mux Map D guarda no tempo t o volume calculado pelo referido functor. No passo seguinte, $(t+1)$, o Mux Map D retorna ao Calculate Map Z o valor armazenado no tempo precedente, para se somar ao novo volume. Ao término das repetições horárias, o valor do volume deve ser ainda armazenado para iniciar as repetições referentes ao dia seguinte e é por isso que outros Mux Maps são conectados em cadeia, garantindo que os valores sejam conservados durante toda a execução do modelo. No início de uma nova execução do modelo, o mapa a zera os valores de volume. O mapa b, referente à entrada de escoamento superficial calculado pelo IBIS, encontra-se dentro da estrutura do Repeat 2, conforme a Figura 4.6. Isso porque no modelo THMB, os mapas climáticos são compostos por médias mensais, sendo, então, um mapa por mês. A cada passo da iteração mensal o modelo lê-se o mapa correspondente ao mês que está sendo executado. Para isso, um outro functor que não aparece na Figura 4.6 é utilizado: o Step, responsável por obter o número da iteração corrente. Além dele, sufixos são adicionados ao final de cada mapa em ordem crescente, de forma que o valor capturado pelo Step possa ser usado como chave para acesso ao mapa correto da vez.

A estrutura apresentada na Figura 4.6, para solução da Equação 2.2 (Capítulo 2 – Seção 2.2.2.2) na plataforma Dinamica EGO, é utilizada também para o reservatório de drenagem sub-superficial, cuja variação de volume é dada pela Equação 2.3

(Capítulo 2 – Seção 2.2.2.2). Estrutura semelhante, porém mais complexa, é utilizada para solução da Equação 2.4 (Capítulo 2 – Seção 2.2.2.2), referente à variação de volume no reservatório do sistema fluvial.

4.5 Cálculo da vazão e direções de fluxo

Após o cálculo do volume e da velocidade, a vazão que deixa cada célula em direção à célula a jusante é calculada. Em seguida, o mapa de direções de fluxo, previamente gerado, é utilizado em um algoritmo para transportar a água célula a célula.

O mapa de direções de fluxo, no THMB – versão FORTRAN possui as direções numeradas de 1 a 8, o que facilita o cálculo das coordenadas da célula que receberá a água. Uma célula envia água apenas a uma vizinha; no entanto, ela pode receber água de várias. A direção de escoamento corresponde àquela que indica para a célula de menor altitude entre as 8 vizinhas imediatas. A célula que recebe água de outra será chamada de vizinha mais baixa. Dois vetores, com 8 elementos cada, representam a posição, em termos de linha e coluna da célula vizinha em relação à célula a montante. Em seguida, a coordenada da célula vizinha que receberá a água é definida com base no mapa de direções relacionado aos vetores das posições relativas. Na Figura 4.7 é reproduzido um trecho do código do THMB – versão FORTRAN referente à propagação das vazões na rede de drenagem.

1	Do j = 1, jfinal	Comando para percorrer linhas
2	Do i = 1, ifinal	Comando para percorrer colunas
3	Fluxout(i,j) = volume(i,j)*veloc(i,j)/dist(i,j)	Vazão que sai da célula
4	data ioff /0,1,1,1,0,-1,-1,-1/	Vetores que associam a numeração de 1 a 8 do mapa com a posição da célula vizinha mais baixa em relação à célula que enviará a água.
5	data joff /-1,-1,0,1,1,1,0,-1/	
6	i2 = i + ioff(direção(i,j))	Coordenada de coluna da célula vizinha
7	j2 = j + joff(direção(i,j))	Coordenada de linha da célula vizinha
8	fluxin(i2,j2) = fluxin(i2,j2) + fluxout(i,j)	Vazão cumulativa que entra na célula. Uma célula pode receber de várias vizinhas mais próximas e em maior altitude que ela.
9	end Do	
10	end Do	

Figura 4.7 – Trecho de código em FORTRAN para propagação das vazões no THMB – versão FORTRAN.

Duas diferenças são significativas entre as duas linguagens e implicam em algumas mudanças na lógica do processamento dos dados. Na versão Dinamica EGO, assim como na versão FORTRAN, cada célula possui sua “vez” de ser alterada. A diferença entre ambas as linguagens reside nas possibilidades advindas dessa ordem de alteração: (a) no Dinamica EGO, uma célula só pode ser alterada se estiver na sua vez, porém, no FORTRAN, pode-se alterar uma célula vizinha ainda na vez da célula corrente; (b) no Dinamica EGO, o valor atualizado de uma célula não influencia na alteração da célula seguinte durante a mesma varredura do mapa, mas na versão FORTRAN a alteração que é feita na célula corrente já poder fazer efeito na vizinha na mesma varredura.

Na Figura 4.7 é apresentado na linha 8 um exemplo onde o resultado do cálculo sobre uma célula (i, j) pode influenciar o cálculo sobre a célula vizinha (i2, j2) antes que os cálculos sejam finalizados para a célula corrente (i, j). Essa facilidade apresentada pelo FORTRAN não é viável com a utilização do functor Calculate Map. No Dinamica EGO, uma vez que uma equação ou sequência de equações é aplicada sobre um mapa, o programa executa as funções célula a célula até o final do mapa e não permite que, durante essa varredura, o valor atualizado de uma célula influencie na operação a ser feita sobre outra. É como se cada célula tivesse a sua vez e isso implica no fato de que na vez da célula corrente, ela pode ser alterada com referência ao valor de uma vizinha, mas a vizinha não pode ser alterada até que seja a vez dela.

Essa diferença implica em mudanças no raciocínio de cálculo e pode ser justificada por um motivo: o Dinamica EGO faz uso de técnicas de “paralelização” para melhorar o desempenho da plataforma em termos de velocidade de processamento. Portanto, a execução de uma equação sobre um mapa pode ser feita simultaneamente sobre trechos diferentes ou não ser iniciada do topo ao final, estabelecendo uma ordem diferente de varredura.

No THMB – versão Dinamica EGO, a propagação de vazões se inicia com um Calculate Map que calcula a vazão de saída do reservatório fluvial de cada célula (como na linha 3 da Figura 4.7). Um segundo Calculate Map é responsável por

direcionar o fluxo para jusante, o qual utiliza o algoritmo seguinte para essa finalidade, utilizando o mapa de direções de fluxo. No algoritmo da Figura 4.8, a soma das condições if se dá para garantir que a célula a jusante possa receber contribuições de mais de uma vizinha. O mapa de direções de fluxo foi alterado para a notação mais usual, onde as 8 vizinhas são expressas como potências de 2 (20 a 28). Isso foi feito considerando o fato de que muitos softwares comerciais geram mapas de direções de fluxo com essa notação. Na Figura 4.8 é reproduzido o algoritmo do Calculate Map responsável por propagar as vazões célula a célula no THMB – versão Dinamica EGO.

<pre>(if i2[line - 1, column - 1] != 2 then 0 else i1[line - 1, column - 1]) + (if i2[line - 1, column] != 4 then 0 else i1[line - 1, column]) + (if i2[line - 1, column + 1] != 8 then 0 else i1[line - 1, column + 1]) + (if i2[line, column + 1] != 16 then 0 else i1[line, column + 1]) + (if i2[line + 1, column + 1] != 32 then 0 else i1[line + 1, column + 1]) + (if i2[line + 1, column] != 64 then 0 else i1[line + 1, column]) + (if i2[line + 1, column - 1] != 128 then 0 else i1[line + 1, column - 1]) + (if i2[line, column - 1] != 1 then 0 else i1[line, column - 1])</pre>	<p>in[line, column] – notação para célula genérica de um mapa no Dinamica EGO</p> <p>onde:</p> <p>i2 – mapa de direções de fluxo i1 – mapa de valores da vazão que deixa a célula</p> <p>O somatório de ifs garante que a célula pode acumular contribuições de mais de uma célula mais próxima e mais alta.</p>
---	--

Figura 4.8 – Algoritmo de propagação da vazão célula a célula no THMB – versão Dinamica EGO.

No THMB, os cálculos para planícies de inundação simulam a porcentagem de área alagada por célula e nível d'água, derivadas de relações estatísticas baseadas na morfologia das planícies de inundação, conforme Coe et al. (2008). As direções de fluxo nas planícies de inundação não são prescritas como no caso do fluxo em rios, porém são definidas a cada passo de tempo comparando-se os níveis d'água entre células vizinhas. Para essa comparação, é utilizado um operador de vizinhança do

Dinamica EGO. Os operadores de vizinhança são funções aplicáveis a um conjunto de células vizinhas.

A sintaxe simplificada dos operadores de vizinhança é a seguinte (SOARES-FILHO et al., 2009): nbN(iX, h, w), na qual nb inicia a sintaxe para chamada do operador de vizinhança (neighborhood); N é o nome do operador; i representa uma imagem e X é o número identificador da imagem; h é o número de linhas da janela de vizinhança; e w é o número de colunas da janela de vizinhança.

Para o cálculo das direções de fluxo na planície de inundação, algumas condições foram estabelecidas, de acordo com Coe et al. (2008): (a) a célula receptora deve estar contida em uma área previamente mapeada para inundação (wetmask); (b) o percentual de área alagada da célula receptora deve ser menor do que o máximo previsto para aquela célula; (c) entre as oito vizinhas a uma célula, aquela que receberá água deve ser a mais baixa em nível d'água; (d) a célula que cederá água deve ser necessariamente mais alta que a receptora; (e) as direções pré-estabelecidas para o escoamento nos rios não podem indicar sentido contrário ao que foi estabelecido dinamicamente. Para definir a condição (c) o operador nbMin foi utilizado para indicar, em uma janela de vizinhança 8 a uma central (janela 3x3) a de menor valor em nível d'água.

4.6 Armazenamento dos dados produzidos

Os dados gerados no THMB – versão Dinamica EGO consistem em mapas de valores médios mensais para três variáveis: vazões do sistema fluvial, percentual de área alagada por célula e nível (altura) d'água (relativo às planícies de inundação). Outras variáveis podem ser calculadas e armazenadas em arquivo na forma de mapas, de tabelas e de valores, requerendo para isso que o usuário conecte os functors do tipo Save nos pontos corretos do fluxo de dados. Um functor Save Map deve ter sua posição criteriosamente escolhida, uma vez que se ele se encontra dentro de um container Repeat, por exemplo, os mapas serão armazenados a cada passo de tempo correspondente àquele Repeat.

Os functors Save Map oferecem a facilidade de inserção de sufixos que podem ser ajustados para uma numeração sequencial de mapas de acordo com o passo de tempo. Definidos o ano e o mês inicial da execução nos parâmetros iniciais do modelo, pode-se obter, utilizando functors Calculate Value, a cada passo de tempo mensal, o ano e o mês corrente. Isso pode ser utilizado para “nomear” o sufixo. Para isso, conecta-se o Calculate Value responsável pelo número ano/mês no porto Step do functor Save Map e estabelece no campo suffix digits o número de casas que terá o sufixo do “nome” do mapa.

O software possibilita uma série de cálculos úteis no THMB: hidrogramas sazonais, médias anuais, dentre outros, requerendo apenas que o usuário utilize os functors disponíveis, estabeleça as expressões algébricas corretas e compreenda como se dá o fluxo de dados para posicionar os functors nos pontos corretos do modelo.

Na Figura 4.9 é apresentada uma ilustração da interface gráfica do software Dinamica EGO com a representação gráfica de parte do modelo hidrológico implementado nesse ambiente.

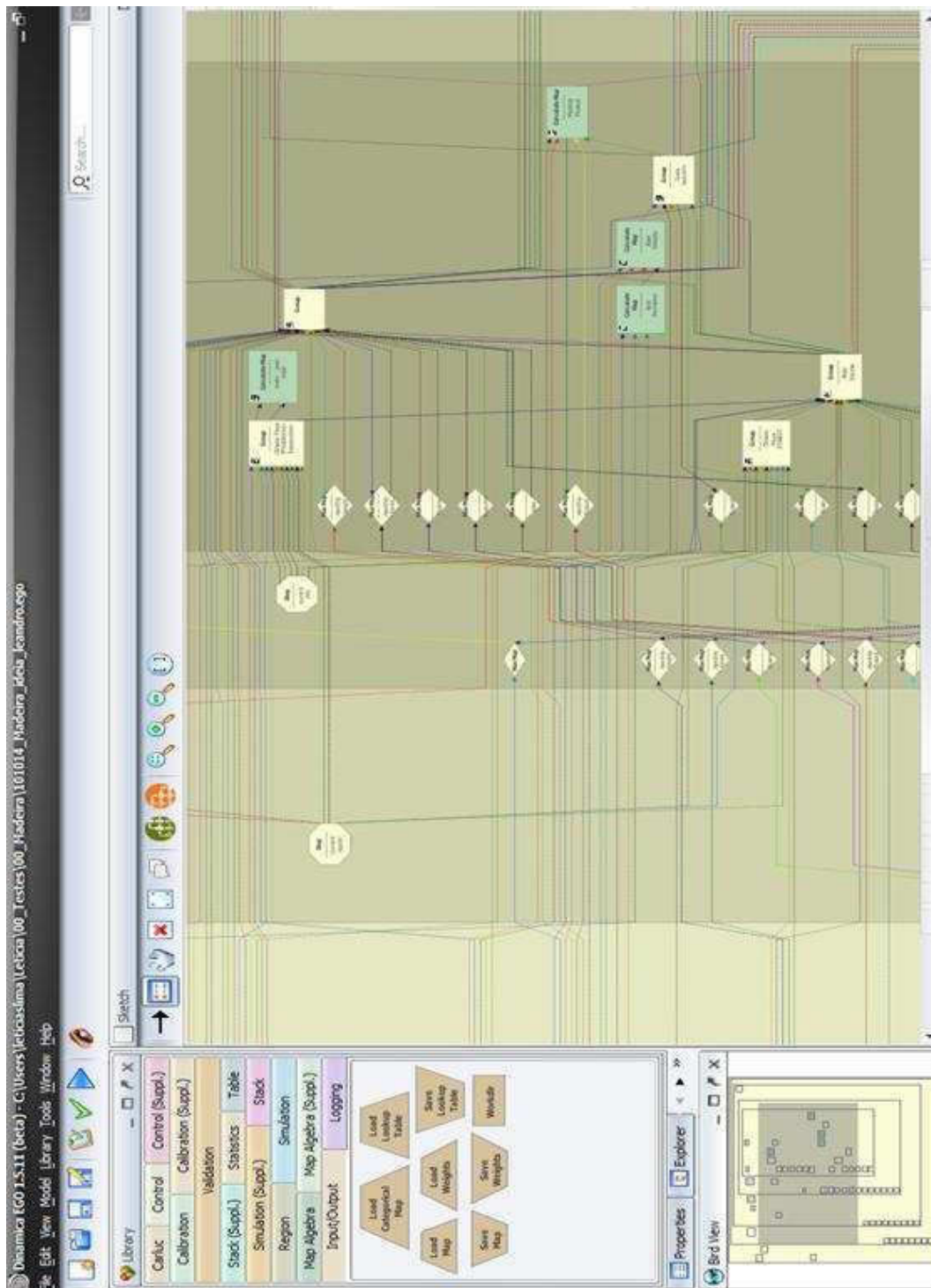


Figura 4.9 – Interface gráfica do Dinamica EGO exibindo parte do modelo THMB – versão Dinamica EGO.

5 VALIDAÇÃO DO MODELO: BACIA DO RIO MADEIRA

A versão do modelo THMB, construída na plataforma de modelagem Dinamica EGO, foi avaliada por meio de uma simulação hidrológica para a bacia hidrográfica do rio Madeira, sub-bacia da bacia Amazônica, considerando um cenário de uso da terra aproximadamente igual ao do ano 2000, baseado no mapa de vegetação de Eva et al., 2002. O conjunto de dados utilizados, descrito a seguir, é o mesmo utilizado em Coe et al. (2009) para o cenário “modern”. Os dados foram recortados para a bacia do rio Madeira, porém sem considerar a sub-bacia do Rio Aripuanã: a simulação contemplou apenas a área da bacia a montante da estação fluviométrica de Porto Velho (ver Tabela 5.1), deixando de lado o trecho do Baixo Madeira. A simulação foi feita em resolução espacial de 5 minutos de arco, o que corresponde a 9 km, aproximadamente, na altura da linha do Equador. O período simulado foi de 1970 a 1999. A escolha desse período se deve à disponibilidade de dados observados de vazão, uma vez que a maior parte das estações fluviométricas existentes na bacia entrou em operação a partir de meados da década de 1970. Os resultados foram comparados com dados observados e com as simulações no THMB – versão FORTRAN. Foram avaliadas as vazões anuais e mensais, o nível d’água e a área alagada na bacia.

A escolha da bacia do rio Madeira para a validação do modelo se deu pelos seguintes motivos: (a) disponibilidade de banco de dados (COSTA et al., 2002); (b) existência de simulação precedente, realizada pelo THMB – versão FOTRAN (COE et al., 2008; 2009); (c) interesse em dar continuidade ao trabalho, dando enfoque aos empreendimentos projetados e em andamento na região, como, por exemplo, os aproveitamentos hidrelétricos no rio Madeira.

5.1 Caracterização da bacia do rio Madeira

A bacia do rio Madeira, sub-bacia da bacia Amazônica, drena uma área de 1.420.000 km², aproximadamente, abrangendo territórios de três países: Peru, Bolívia e Brasil. Na Figura 5.1 é apresentada a localização dessa bacia. Os principais formadores do rio Madeira são o rio Guaporé, que faz fronteira entre Brasil e Bolívia; o rio Mamoré,

que percorre território boliviano; e o rio Beni, que percorre território boliviano e peruano. Os dois últimos nascem nos Andes. Além deles, outros dois rios se destacam na formação dessa bacia: o rio Madre de Dios e o rio Abunã.

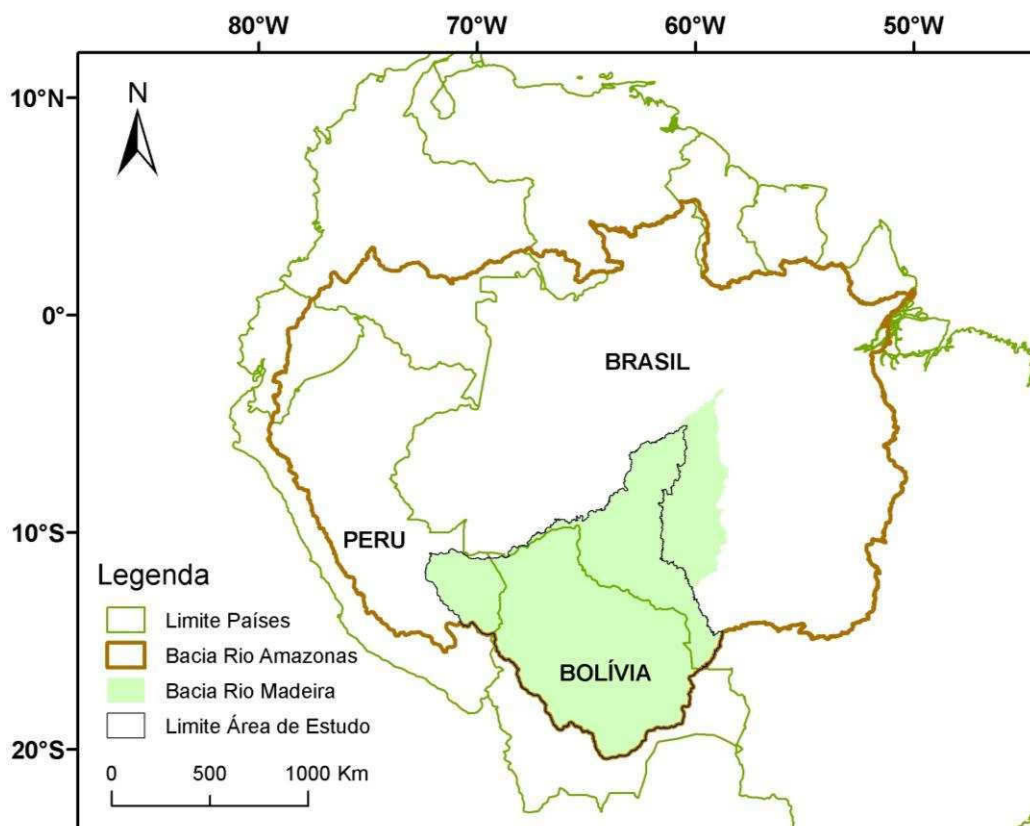


Figura 5.1 – Localização da bacia do rio Madeira.

O rio Madeira é um dos principais tributários da bacia Amazônica. Sua vazão média histórica (1967 a 1997) na Estação Porto Velho é cerca de $19.000\text{m}^3/\text{s}$ e na sua foz é cerca de $31.200\text{m}^3/\text{s}$ (ANEEL, 1999), o que corresponde a cerca de 15% da vazão do rio Amazonas na foz. Próximo a Porto Velho, os meses com maiores vazões são fevereiro, março e abril, e os meses com menor vazão são agosto, setembro e outubro. A precipitação média anual na bacia é de aproximadamente 2.000 mm.

As altitudes na bacia variam entre 50 e 5.000 m, aproximadamente. O relevo da bacia é suave em sua maior parte, sendo acidentado apenas nos limites a Oeste, onde se encontra parte da cordilheira dos Andes; 80% da área da bacia possui altitudes

inferiores a 500 m (Neto, 2006). Na Figura 5.2 é apresentado um mapa do relevo e principais rios da área de estudo.

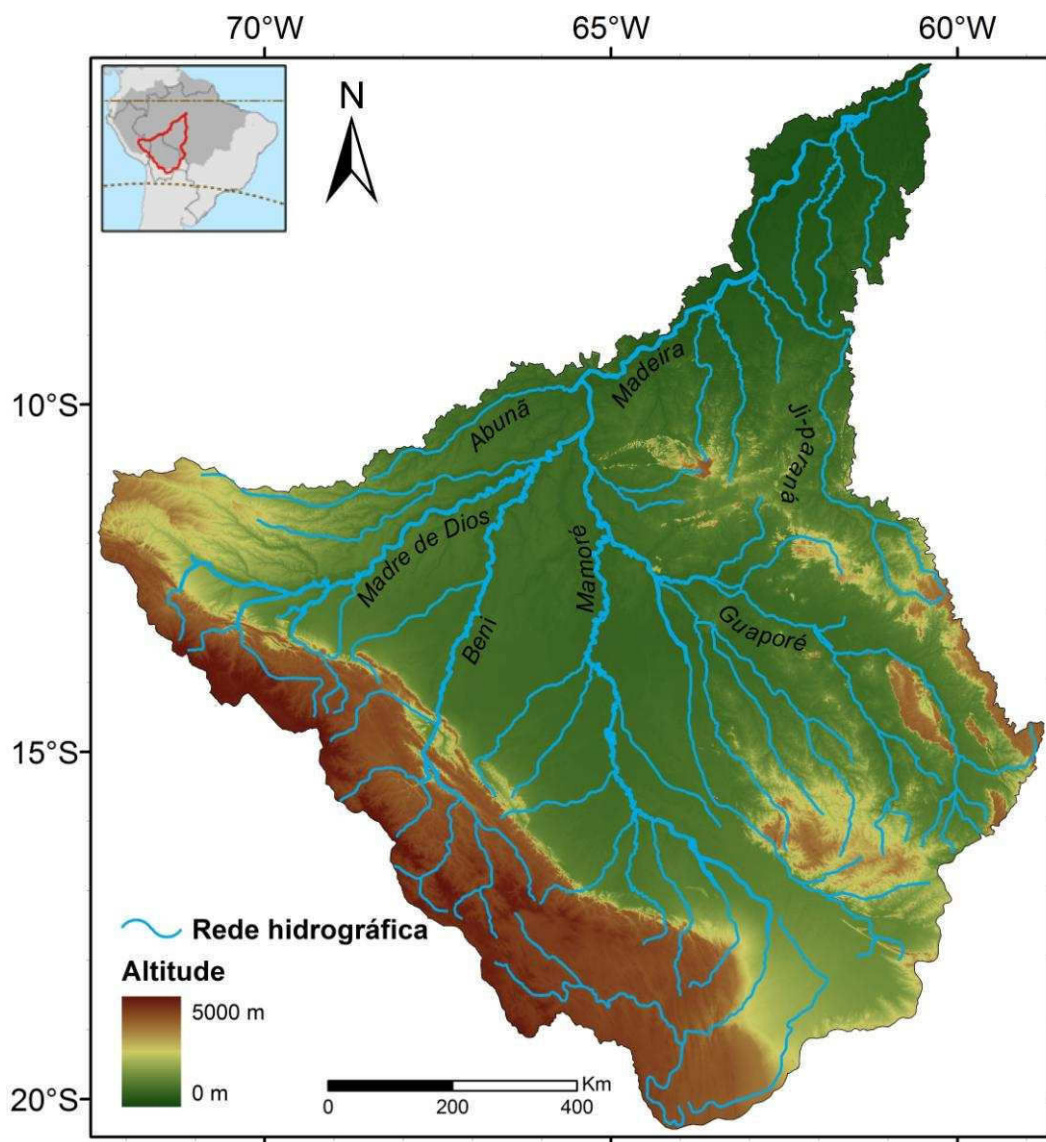


Figura 5.2 – Área de estudo: relevo e principais rios.

5.2 Dados de entrada para a simulação

Os mapas necessários para a simulação, relativos às características morfológicas da bacia, são os seguintes:

- MDE;

- b) mapa de desvio padrão da elevação do terreno derivado de um MDE de resolução mais alta que o MDE utilizado no modelo;
- c) mapa da área de drenagem acumulada;
- d) mapa de direções de fluxo;
- e) mapa de sinuosidade dos canais;
- f) mapa de área de cada célula;
- g) mapa de áreas densamente vegetadas e não vegetadas da bacia;
- h) máscara de áreas potencialmente alagáveis (aqui referida como wetmask).

Os mapas de direções de fluxo, área de drenagem acumulada e sinuosidade foram obtidos por meio do banco de dados organizado por Costa et al. (2002), no âmbito do projeto Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia – LBA. A mesma fonte foi utilizada para obtenção dos dados observados das vazões médias mensais, tendo sido gerados a partir de vazões diárias, originalmente medidas nas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas. Os mapas utilizados foram recortados para a área de simulação. Na Figura 5.3 é apresentado um mapa de fluxo acumulado, o qual representa também a área de drenagem acumulada, uma vez que quanto mais intenso o azul, maior é a área de drenagem a montante do trecho.

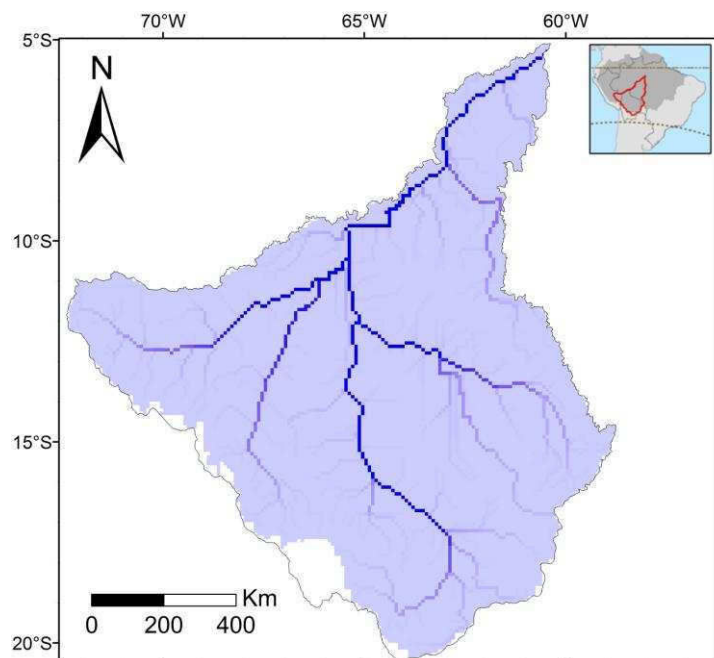


Figura 5.3 – Mapa de fluxo acumulado.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2002).

Na elaboração do mapa de sinuosidade (COSTA et al., 2002), os valores obtidos para o canal principal em cada trecho foram extrapolados para seus tributários nas respectivas sub-bacias. O mapa de sinuosidade, na resolução espacial de 5 minutos de arco, foi recortado para a área de estudo e é apresentado na Figura 5.4.

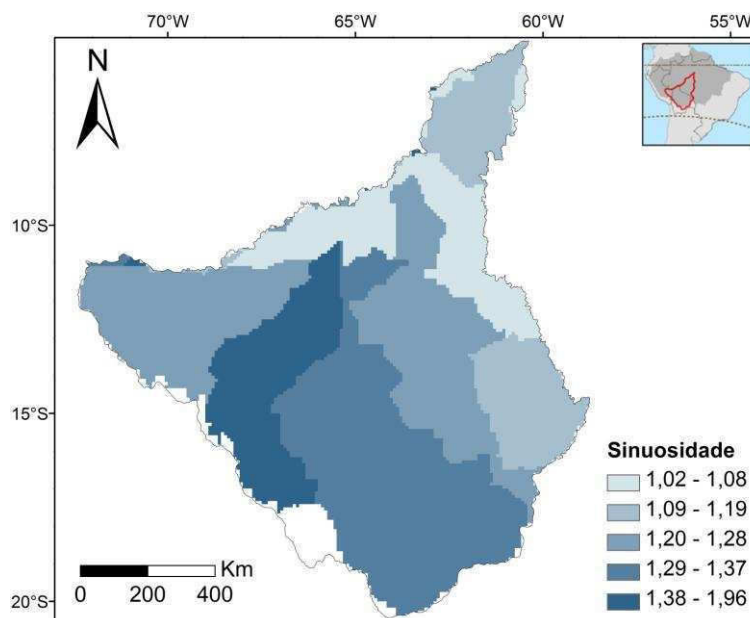


Figura 5.4 – Mapa de sinuosidade.

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2002).

O modelo digital de elevação utilizado foi o mesmo utilizado por Coe et al. (2008), originalmente baseado em dados da Shuttle Radar Topography Mission – SRTM, em resolução de 90 m, tratado para remoção da influência da vegetação e preenchimento de discontinuidades (conhecidas como sinks) que poderiam trazer problemas na geração do mapa de direções de fluxo. O modelo digital de elevação foi reamostrado para a resolução de 5 minutos de arco (~ 9 km) e também foi gerado o mapa do desvio padrão da altitude na célula.

O mapa de vegetação da América do Sul – ano 2000, produzido por Eva et al. (2002), na resolução de 1 km, foi utilizado para geração de uma imagem temática, em formato raster, na resolução de 5 minutos de arco, das áreas densamente vegetadas e não vegetadas da bacia. Embora o mapa original representasse os vários tipos de biomas, a imagem final produzida é uma reclassificação na qual valores de 0 a 1 representam as frações densamente vegetadas de cada célula da imagem. Essa

imagem reclassificada, apresentada na Figura 5.6, é a mesma utilizada em Coe et al. (2009) para a simulação hidrológica da bacia Amazônica em um contexto atual, cenário que recebeu o nome de “modern”.

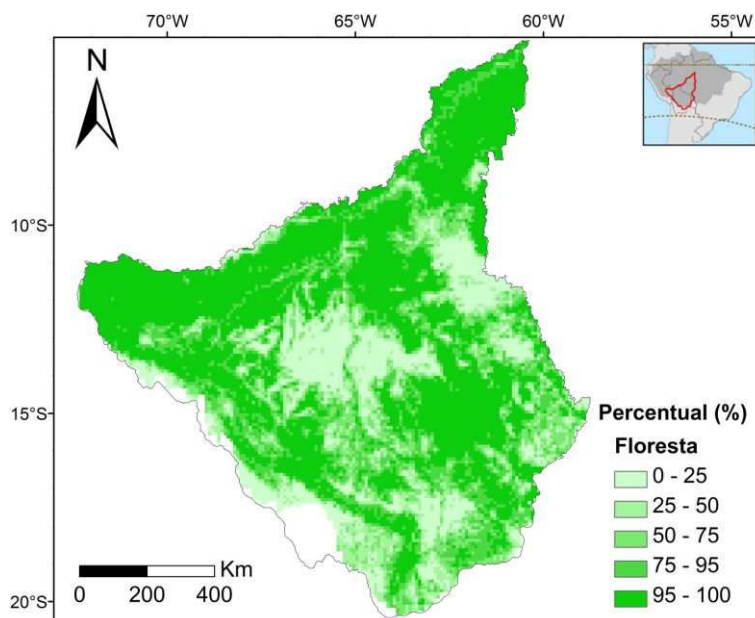


Figura 5.5 – Porcentagem de floresta (áreas densamente vegetadas) para a área de estudo, baseado em Eva et al. (2002), reamostrado para resolução espacial de 5 minutos de arco.
Fonte: Coe et al. (2009).

O mapa de áreas potencialmente alagáveis, apresentado na Figura 5.7, consiste em uma estimativa da área máxima alagável na Amazônia, preparada por Hess et al. (2009) com base em imagens do sistema radar *Japanese Earth Resources Satellite-1* (JERS-1), resolução de 1 km. O mapa consiste inicialmente em uma máscara binária, onde *pixels* com valor igual a 0 se referem a áreas não alagáveis e *pixels* iguais a 1, o oposto. Esse mapa foi reamostrado para a resolução de 5 minutos de arco (~ 9 km) e os novos valores dos *pixels* passaram a representar a fração de área alagável na célula (valores entre 0 e 1). Esse mapa é utilizado no THMB para manter o fluxo da água nas planícies de inundação preferencialmente restrito a essas áreas.

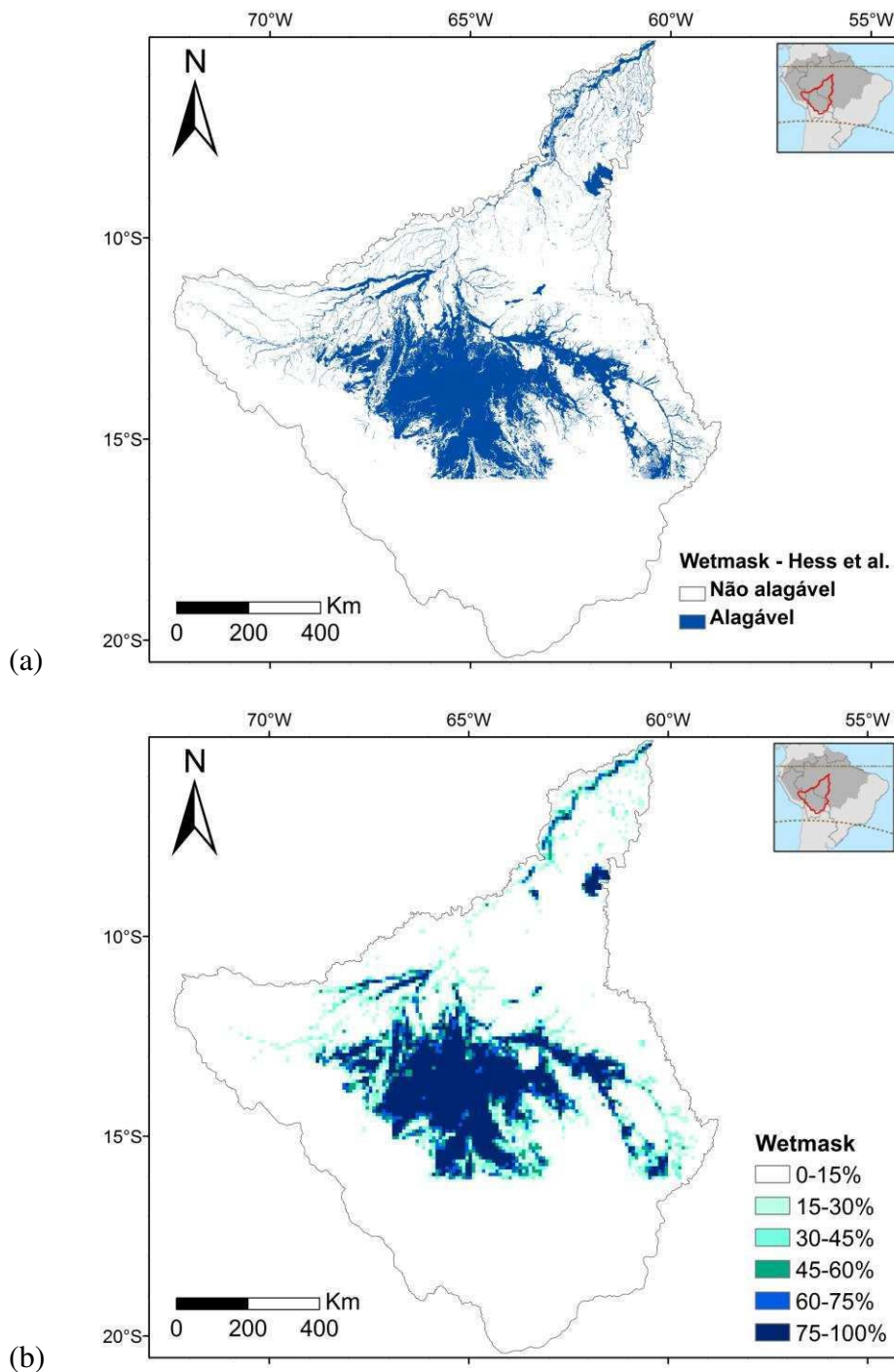


Figura 5.6 – Imagens temáticas das áreas potencialmente alagáveis: (a) Recorte da imagem original (HESS et al., 2009) para a bacia, em resolução espacial de 3 segundos de arco; (b) Imagem reamostrada para a resolução de 5 minutos de arco.

Os dados climáticos utilizados são: precipitação, evaporação, escoamento superficial e drenagem sub-superficial. Os dados são os mesmos utilizados por Coe et al. (2009).

Os dados de precipitação foram obtidos do banco de dados da CRU (NEW et al., 2000) e são discutidos na Seção 5.3. A evaporação para superfícies de água foi calculada por Coe et al. (2009) por meio da equação de Penman para os espelhos d'água. Os dados climáticos foram recortados para a bacia do rio Madeira. Duas simulações do IBIS para a bacia Amazônica foram utilizadas para gerar os dados de entrada de escoamento superficial e drenagem para o THMB: uma considerando a bacia Amazônica coberta completamente por florestas, sem interferência humana e outra considerando a bacia completamente desmatada. Foi feita uma interpolação linear entre os dados gerados para o cenário de desmatamento e de floresta, considerando a porcentagem de área desmatada em cada célula, da mesma forma que em Coe et al. (2009), segundo a Equação 5.1:

$$S_{in} = F_f \times S_{POT} + (1 - F_f) \times S_{DESM} \quad (5.1)$$

na qual S_{in} se refere à taxa de escoamento superficial por célula; F_f é a fração de área de floresta por célula; S_{POT} se refere ao escoamento superficial para a situação controle (sem desmatamento); e S_{DESM} é o escoamento superficial calculado para a ausência de florestas na célula. Portanto, o escoamento superficial total de uma célula é calculado segundo uma interpolação entre o escoamento para ambas as situações mencionadas e o resultado final é proporcional à área desmatada na célula. A mesma interpolação é feita para os dados de drenagem superficial.

Para estimar os valores das feições morfológicas dos rios da bacia, como largura e altura dos canais de rios, são utilizadas relações empíricas entre área de drenagem acumulada e as feições. Para esse estudo, foram mantidos os mesmos coeficientes utilizados em Coe et al. (2009). A calibração do modelo também foi mantida conforme o estudo citado.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as estações fluviométricas cujos dados observados foram utilizados para a validação da simulação. A coluna “Ano Inicial” refere-se ao ano que as medições começaram a ser registradas nas referidas estações. Uma vez que a maioria das estações fluviométricas na bacia entrou em operação a partir de meados da década de 1970, a simulação se restringiu ao período de 1970 a 1999.

Tabela 5.1 – Estações fluviométricas utilizadas para validação do modelo THMB – versão Dinamica EGO.

N.	Código ANA	Estação Rio (Município)	Área Drenagem (km ²)	Coordenadas Geográficas		Ano Inicial
				Latitude	Longitude	
23	15150000	Guaporé (Pedras Negras)	116731	12,83° S	62,93° W	1981
24	15250000	Mamoré (Guajará-Mirim)	589500	10,80° S	65,38° W	1971
25	15320002	Madeira (Abunã)	899761	9,70° S	65,35° W	1977
26	15325000	Abunã (Morada Nova)	30807	9,83° S	65,57° W	1982
27	15400000	Madeira (Porto Velho)	954285	8,77° S	63,92° W	1968
28	15560000	Ji-paraná (Ji-paraná)	32806	10,88° S	61,95° W	1978
29	15580000	Ji-paraná (Tabajara)	60212	8,92° S	62,10° W	1978
30	15630000	Madeira (Humaitá)	1066240	7,50° S	63,02° W	1972
31	15700000	Madeira (Manicoré)	1123670	5,82° S	61,30° W	1968
70	15120001	Guaporé (Mato Grosso)	18412	15,02° S	59,97° W	1977
71	15340000	Madeira (Palmeiral)	936801	9,53° S	64,82° W	1979
72	15430000	Jamari (Ariquemes)	7295	9,93° S	63,07° W	1971
73	15440000	Jamari (São Carlos)	9884	9,70° S	63,13° W	1978
74	15450000	Jamari (São Pedro)	12733	8,98° S	63,28° W	1978
75	15460000	Jamari (Cachoeira do Samuel)	14135	8,75° S	63,47° W	1971
76	15550000	Candeias (Santa Isabel)	12728	8,80° S	63,72° W	1977
77	15556010	Pimenta Bueno (Cachoeira Primavera)	9705	11,90° S	61,23° W	1994
78	15558000	Pimenta Bueno (Pimenta Bueno)	10114	11,65° S	61,20° W	1981

A distribuição espacial das estações fluviométricas, da Tabela 5.1, é apresentada na Figura 5.7.

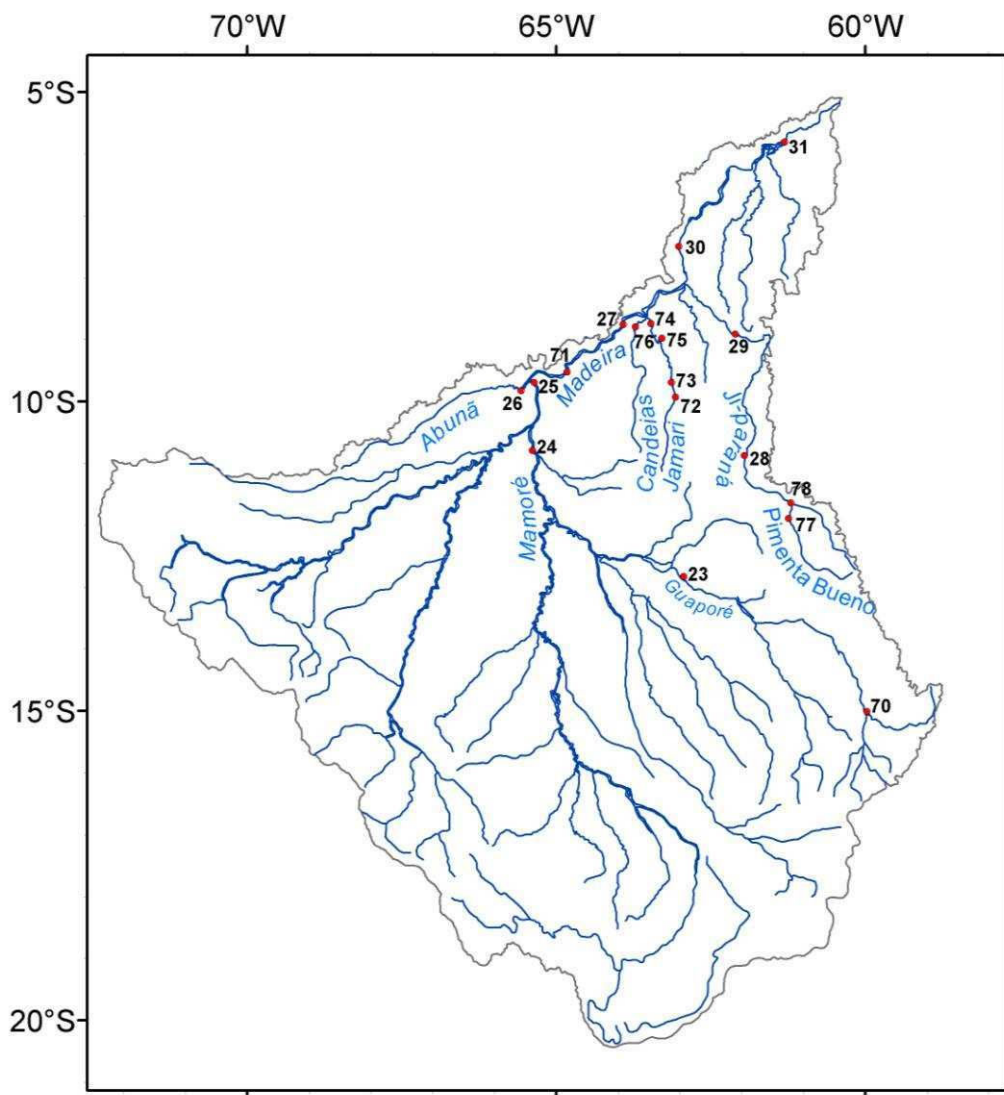


Figura 5.7 – Distribuição espacial das estações fluviométricas e respectivos rios da Tabela 5.1.

5.3 Dados de precipitação

Os modelos hidrológicos são muito dependentes dos dados de precipitação disponíveis. Nem sempre é possível obter séries históricas longas e com distribuição espacial adequada para a simulação hidrológica em algumas bacias. Muitas vezes, os fatores econômicos e geográficos contribuem para dificultar a aquisição sistemática de dados hidrometeorológicos (PINTO et al., 2009).

Os dados de precipitação utilizados nessa simulação são provenientes do banco de dados da Climate Research Unit – CRU (NEW et al., 2000) denominado CRU-TS2 e consistem em uma série histórica (1901-2000) de precipitação mensal distribuída em mapas com resolução espacial de 0.5 grau de arco. Esse banco de dados foi criado com base na interpolação de dados obtidos em estações hidrometeorológicas.

Na bacia do rio Madeira existe um fator que interfere na qualidade dos dados hidrometeorológicos disponíveis que é o fato da bacia estar compreendida em territórios de três países: Brasil, Peru e Bolívia. Por esse motivo, o levantamento de dados hidrometeorológicos para a bacia é difícil, uma vez que os órgãos responsáveis não trabalham de forma homogênea (NETO et al., 2008).

Os dados do projeto CRU-TS2 subestimam a precipitação para as porções ocidentais da bacia Amazônica (COE et al., 2009) e é provável que isso esteja relacionado à falta de dados de precipitação e à técnica de interpolação utilizada (COE et al., 2008). Por esse motivo, foi aplicada uma correção aos dados de escoamento e drenagem superficial produzidos pelo modelo IBIS de acordo com as observações das vazões anuais, da mesma forma que em Coe et al. (2009).

5.4 Resultados da simulação

5.4.1 Vazões anuais

A primeira análise realizada se refere à comparação entre as vazões anuais observadas e simuladas pelo modelo THMB – versão Dinamica EGO. Os resultados são apresentados na Tabela 5.2, sendo apresentado também o erro relativo e o número de anos comparados. Para essa comparação foram considerados apenas os anos que apresentavam pelo menos 10 meses com dados observados. O erro relativo para as vazões anuais foi calculado dividindo-se a diferença entre valor simulado e observado pelo valor observado e, em seguida, multiplicando-se por 100.

Tabela 5.2 – Vazões anuais observadas e simuladas e respectivos erros relativos.

N.	Estação Rio (Município)	Vazão Anual Observada (m ³ /s)	Vazão Anual Simulada (m ³ /s)	Erro Relativo (%)	Número de Anos Comparados
24	Mamoré (Guajará-Mirim)	8465,5	9356,5	10,5	26
23	Guaporé (Pedras Negras)	914,7	2130,2	132,9	15
70	Guaporé (Mato Grosso)	142,6	298,4	109,3	18
25	Madeira (Abunã)	18523,4	18306,7	-1,2	20
27	Madeira (Porto Velho)	19890	19530,3	-1,2	28
30	Madeira (Humaitá)	21829,3	22377,8	2,5	21
31	Madeira (Manicoré)	24726	24133,1	-2,4	24
71	Madeira (Palmeiral)	20788,6	18988,5	-8,65	8
28	Ji-paraná (Ji-paraná)	713	558,3	-21,7	16
29	Ji-paraná (Tabajara)	1406,6	1353,1	-3,8	16
26	Abunã (Morada Nova)	730,3	549,9	-24,7	4
72	Jamari (Ariquemes)	173,2	169,1	-2,3	26
73	Jamari (São Carlos)	228,7	241,6	5,6	9
74	Jamari (São Pedro)	324,4	322,7	-0,5	10
75	Jamari (Cachoeira do Samuel)	346,1	368,2	6,4	12
76	Candeias (Santa Isabel)	320,4	307,8	-3,9	20
77	Pimenta Bueno (Cachoeira Primavera)	220,0	174,2	-20,8	3
78	Pimenta Bueno (Pimenta Bueno)	205,7	181,3	-11,9	14

A comparação das vazões anuais demonstra que o modelo produziu bons resultados em relação aos dados observados para dezesseis estações das dezoito comparadas, considerando um erro relativo menor que 25%. A simulação para a sub-bacia do rio Guaporé apresenta erros significativos que se reproduzem nas duas estações da bacia (estações 23 e 70) e as possíveis fontes desses erros são discutidas após a análise das vazões mensais na seção seguinte.

5.4.2 Vazões mensais

As vazões mensais simuladas para as dezoito estações foram comparadas com as vazões observadas. Para efeito de comparação, foram considerados apenas os meses com dados observados disponíveis. Na Tabela 5.3 são apresentados, para cada estação, o erro em volume (ΔV , em porcentagem) e o Coeficiente de Nash (R^2),

ambos em termos de porcentagem. O número de meses comparados é apresentado na última coluna da tabela.

O Coeficiente de Nash foi calculado por meio da Equação 5.2:

$$R^2 = \frac{\sum (Q_o - Q_s)^2}{\sum (Q_o - \overline{Q_o})^2} \quad (5.2)$$

na qual Q_o se refere aos valores de vazão observados para cada mês da série histórica, a qual possui n elementos; Q_s se refere aos valores simulados para cada mês correspondente e $\overline{Q_o}$ se refere à média dos valores observados.

O erro em volume (ΔV , em porcentagem), foi calculado por meio da Equação 5.3:

$$\Delta V = \frac{\sum Q_s - Q_o}{\sum Q_o} \times 100 \quad (5.3)$$

Tabela 5.3 – Avaliação das vazões mensais.

N.	Estação Rio (Município)	Coefficiente de Nash R ²	Erro de Volume ΔV (%)	Número de Meses Comparados
24	Mamoré (Guajará-Mirim)	0,028	12,63	319
23	Guaporé (Pedras Negras)	-11,480	157,69	180
70	Guaporé (Mato Grosso)	-5,340	128,17	231
25	Madeira (Abunã)	0,633	1,511	249
27	Madeira (Porto Velho)	0,726	-1,23	326
30	Madeira (Humaitá)	0,748	7,08	270
31	Madeira (Manicoré)	0,760	-5,46	295
71	Madeira (Palmeiral)	0,733	-1,27	100
28	Ji-paraná (Ji-paraná)	0,484	-21,84	208
29	Ji-paraná (Tabajara)	0,663	-4,57	209
26	Abunã (Morada Nova)	0,084	-31,90	63
72	Jamari (Ariquemes)	0,347	0,33	323
73	Jamari (São Carlos)	0,328	6,93	124
74	Jamari (São Pedro)	0,391	4,55	128
75	Jamari (Cachoeira do Samuel)	0,236	21,77	145
76	Candeias (Santa Isabel)	0,418	-6,71	252
77	Pimenta Bueno (Cachoeira Primavera)	0,633	-3,89	48
78	Pimenta Bueno (Pimenta Bueno)	0,491	-13,65	187

Os hidrogramas das vazões médias mensais simuladas comparadas às observadas das dezoito estações são apresentados na Figura 5.8. Os valores apresentados foram produzidos calculando-se a média dos valores de cada mês ao longo dos anos simulados e observados. A comparação foi feita considerando apenas os meses em que se dispunha de dados observados. O número de meses considerados na comparação encontra-se na Tabela 5.3.

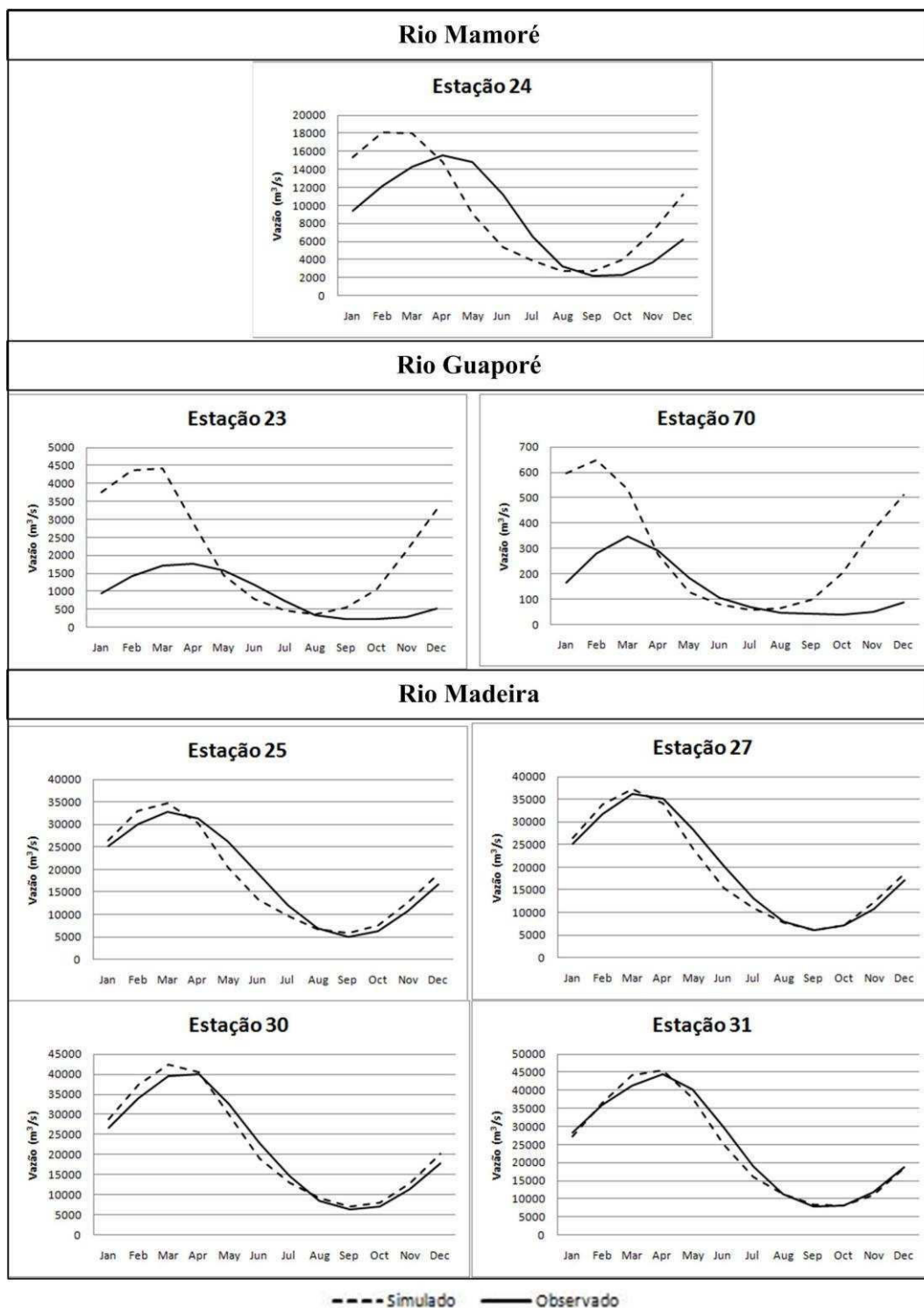


Figura 5.8 – Hidrogramas sazonais das vazões médias mensais (m^3/s) observadas e simuladas.

(continua)

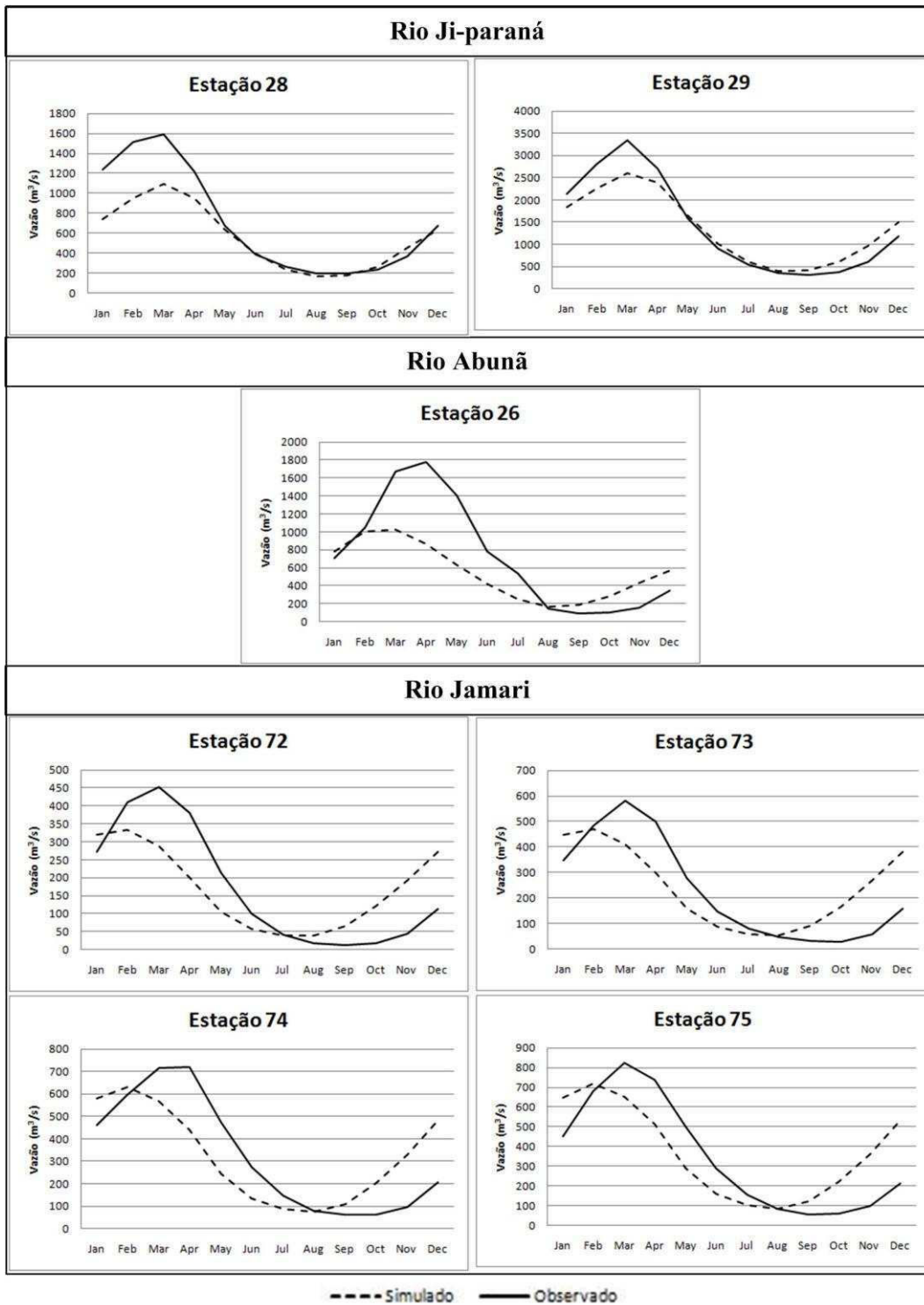


Figura 5.8 – Continuação.

(continua)

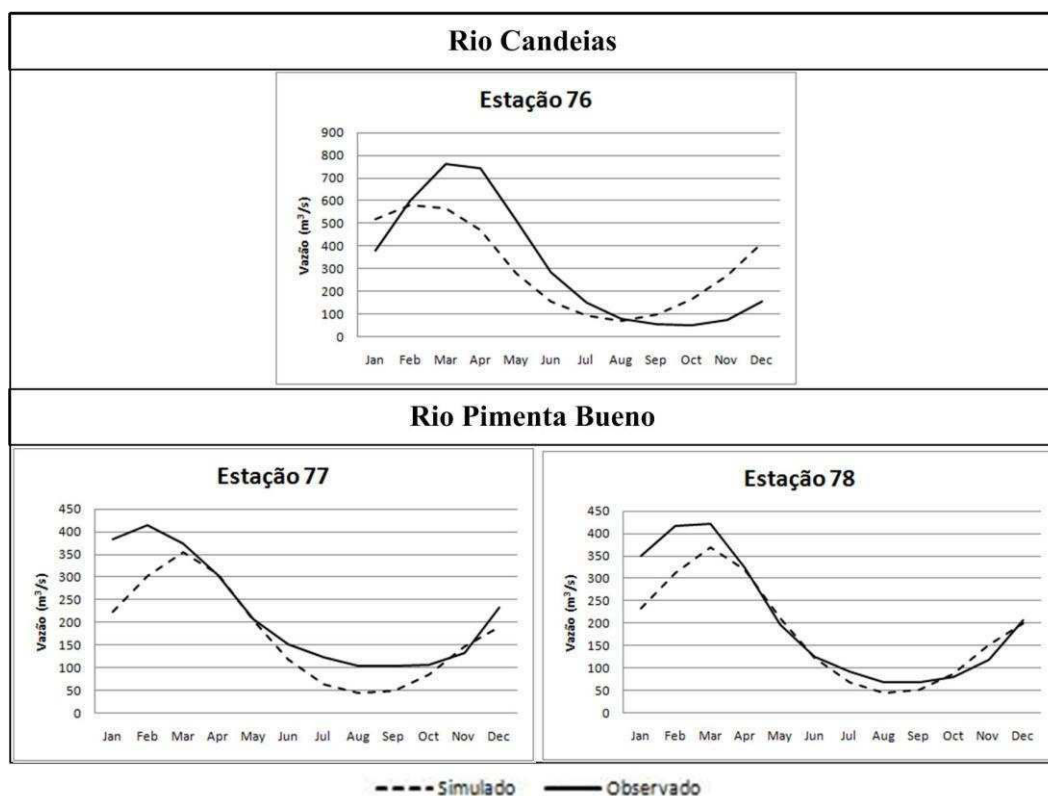


Figura 5.8 – Conclusão.

A análise dos coeficientes de Nash e erro em volume demonstra que o modelo, da forma como se encontra calibrado e utilizando os dados produzidos pelo modelo IBIS, produz resultados próximos das vazões observadas para dez das dezoito estações comparadas (admitindo um coeficiente de Nash acima de 0.4). Considerando o erro em volume, os rios Guaporé e Abunã apresentam erros significativos (acima de 30%). Os melhores resultados são os do rio Madeira, onde as cinco estações apresentaram coeficiente de Nash acima de 0.6 e erros de volume inferiores a 7%. Os hidrogramas simulados demonstram o mesmo com relação ao rio Madeira: são os que melhor se ajustam aos dados observados. Em geral, uma tendência para subestimar as vazões nos períodos de cheias é observada na simulação para a maioria das estações e isso provavelmente se deve à qualidade dos dados de precipitação para essa região. Os rios Mamoré, Abunã, Candeias e Jamari apresentam um deslocamento dos hidrogramas simulados com relação aos períodos de cheia e seca. Esse fator pode estar relacionado à calibração dos parâmetros relativos à

velocidade da água no rio ou às taxas de drenagem e escoamento calculadas pelo modelo IBIS.

Na Figura 5.9 é apresentado o diagrama de dispersão das vazões mensais simuladas versus as vazões observadas. Ao todo foram consideradas 3362 observações de vazões mensais distribuídas nas dezoito estações avaliadas. O diagrama de dispersão demonstra que no contexto geral da bacia, as vazões mensais se encontram relativamente bem representadas, ainda que seja necessário recorrer a uma calibração mais apurada para melhorar a simulação.

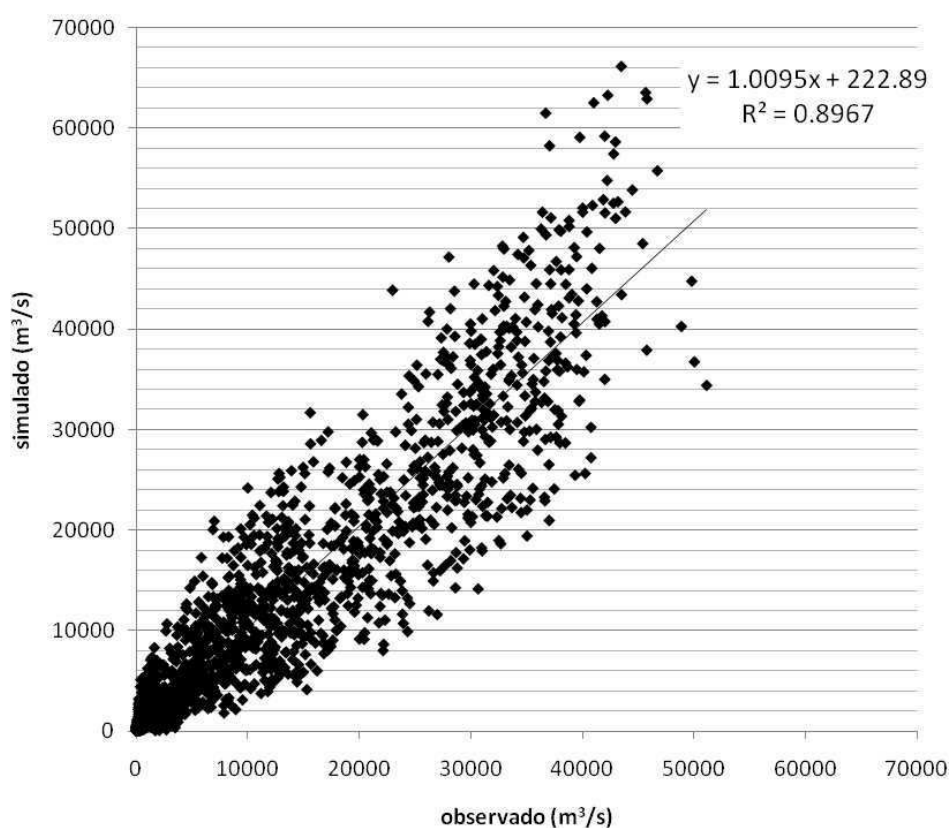


Figura 5.9 – Diagrama de dispersão: vazões mensais observadas versus simuladas.

Algumas fontes de erros podem estar associadas às imprecisões constatadas nas vazões mensais, sendo que uma delas, já mencionada, se refere à calibração dos parâmetros do modelo, uma vez que se recorreu a uma calibração feita para um grupo de estações fluviométricas da bacia Amazônica (Coe et al., 2009), ao invés de parâmetros calibrados especificamente para a bacia do rio Madeira. Isso foi feito

porque um dos objetivos era comparar os resultados da nova versão do modelo com resultados anteriormente produzidos pelo THMB – versão FORTRAN.

Outros fatores que podem inserir erros significativos nos resultados são os seguintes:

- imprecisões no balanço hídrico calculado célula a célula pelo modelo IBIS, cujos resultados são utilizados como dados de entrada para o THMB;
- imprecisões nos dados de precipitação utilizados, uma vez que são produzidos por meio da combinação de técnicas de sensoriamento remoto com dados de estações pluviométricas, os quais podem conter erros;
- limitações relativas à representatividade da resolução utilizada, pois os dados climáticos originais se encontram na resolução espacial de 0,5 grau de latitude/longitude e o modelo é executado na resolução de 5 minutos;
- limitações da representação das regiões vegetadas e não-vegetadas da bacia na resolução considerada.

5.4.3 Comparação das vazões entre as versões do THMB

Com o objetivo de verificar se a versão do THMB construída na plataforma Dinamica EGO produz resultados semelhantes aos da versão original, os hidrogramas das Estações 24, 27, 75 e 31, produzidos por ambas as versões foram comparados entre si e também com as vazões observadas. Na Figura 5.10 são apresentados os hidrogramas para as referidas estações, nos quais pode-se observar que, apesar de pequenas diferenças, as duas versões produzem hidrogramas semelhantes.

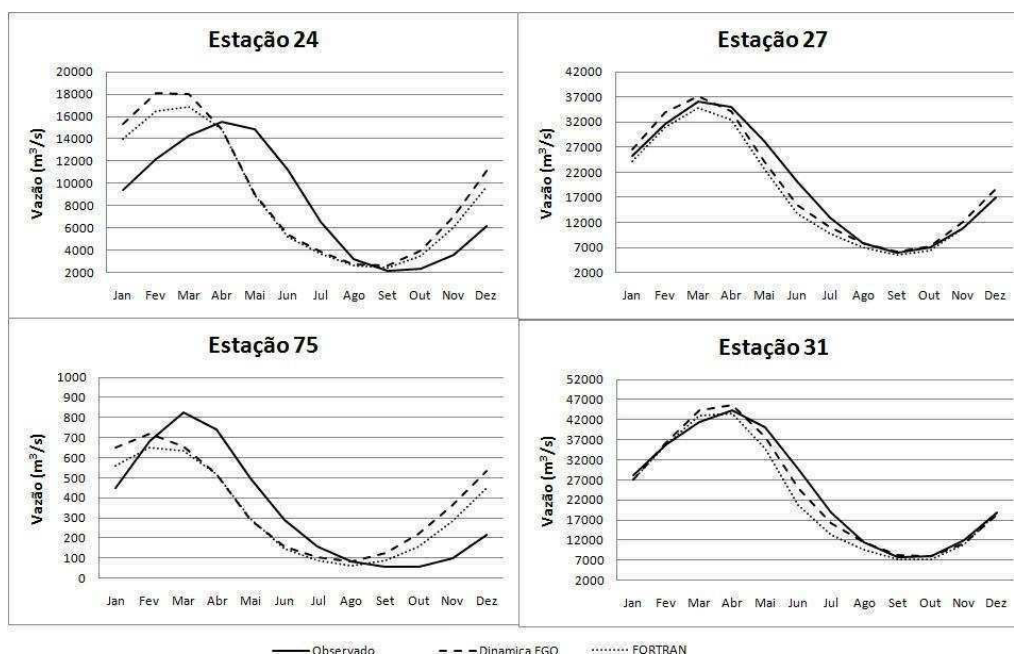


Figura 5.10 – Comparação das vazões mensais observadas com as simuladas pelo THMB – versão FORTRAN e versão Dinamica EGO.

As vazões simuladas pelo THMB – versão Dinamica EGO apresentam valores bastante próximos dos resultados da versão FORTRAN; no entanto, apresenta uma leve tendência a valores maiores nas vazões mensais. Em geral, a diferença relativa entre as versões, para as vazões mensais simuladas nas referidas estações, está entre 7% e 20%. As vazões anuais simuladas foram também comparadas e a diferença relativa encontrada está entre 0% e 3%.

A semelhança entre os hidrogramas confirma que o THMB foi reproduzido, na plataforma Dinamica EGO, de acordo com o modelo original.

5.4.4 Simulação das planícies de inundação

Na Figura 5.11 são apresentadas as simulações das áreas alagadas para outubro de 1995 (mês seco) e fevereiro de 1996 (mês chuvoso). A intensidade do azul indica o percentual de área alagada em cada célula, sendo o azul mais claro correspondente às células com ausência de superfícies de água. Nessa simulação não foi incluída a sub-bacia a nordeste do rio Madeira, bacia do rio Aripuanã, a qual se encontra representada pela cor cinza na Figura 5.11. A baixa disponibilidade de estudos e

mapeamento das planícies de inundação e sua sazonalidade na bacia do rio Madeira dificultam o trabalho de modelagem pela carência de parâmetros de comparação da simulação com a realidade.

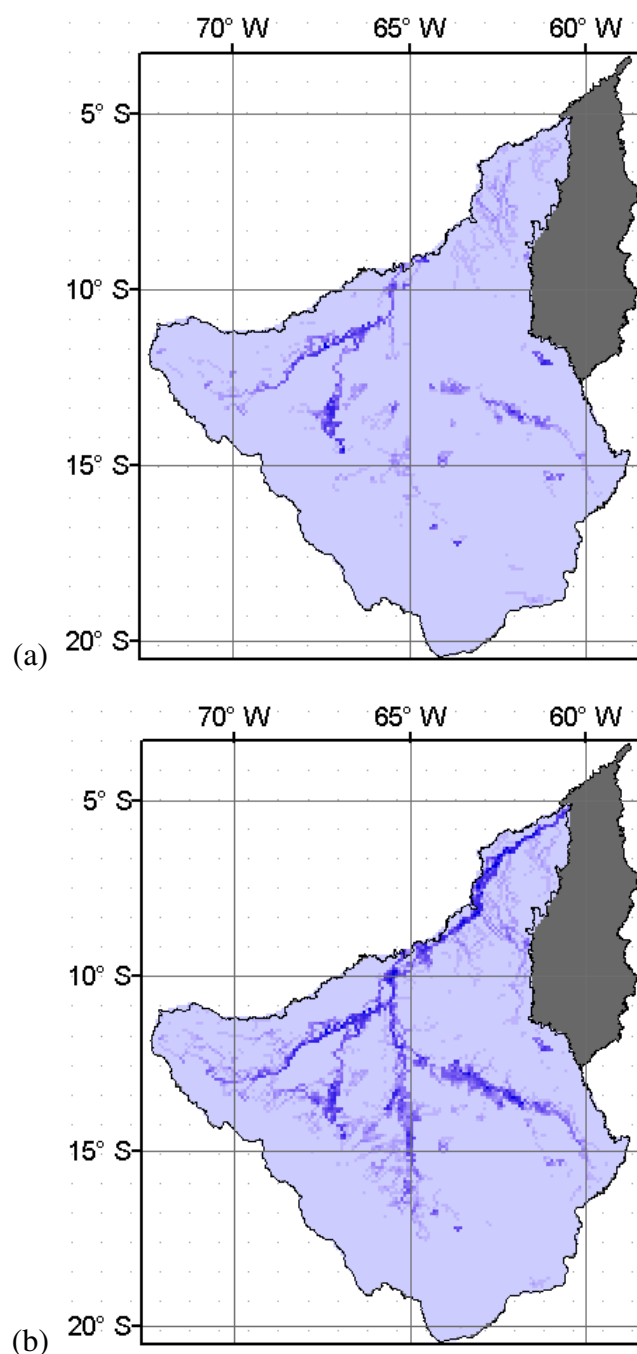


Figura 5.11 – Simulação das áreas alagadas – bacia do rio Madeira: (a) outubro/1995; (b) fevereiro/1996.

O mapa de áreas alagáveis máximas na resolução de cinco minutos de arco (Figura 5.6, b), derivado de Hess et al. (2009) foi utilizado para comparação da área alagada simulada para o mês de fevereiro de 1996. Considerando as limitações impostas pela resolução espacial utilizada nesta simulação e a acurácia da técnica utilizada no modelo para simulação das áreas alagadas, apresenta-se aqui apenas uma análise simplificada da simulação. Na Figura 5.12 é apresentado o mapa resultante da sobreposição do mapa da área alagada simulada com a imagem temática das áreas alagáveis máximas, produzida por Hess et al. (2009) e reamostrada para uma resolução espacial de 5 minutos de arco.

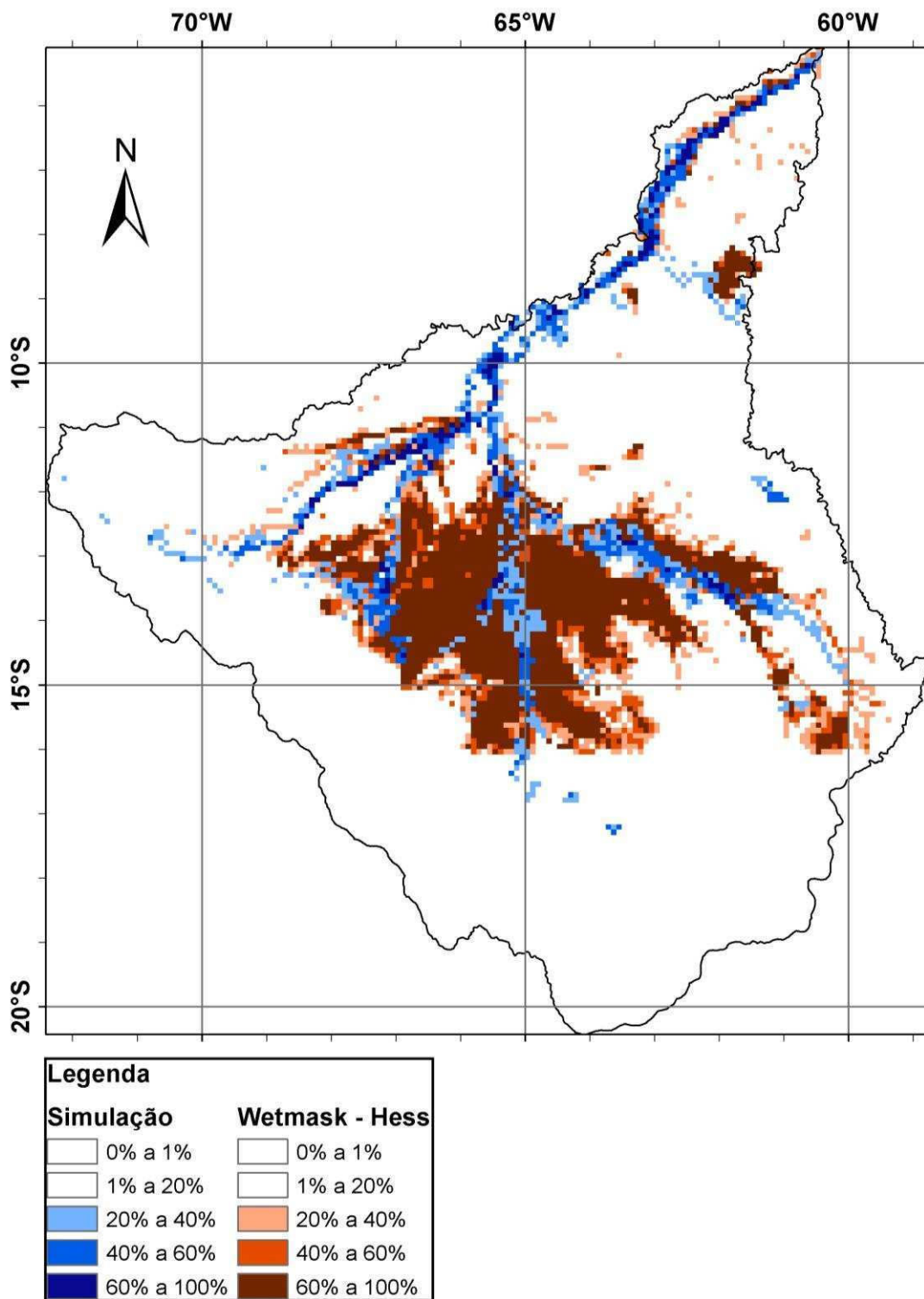


Figura 5.12 – Comparação entre áreas alagadas simuladas e área alagável máxima (Wetmask, HESS et al., 2009).

A comparação entre as áreas alagadas simuladas e “observadas” utilizando como base de comparação o mapeamento produzido por Hess et al. (2009) demonstra que a área simulada se aproxima relativamente bem da área observada, no entanto, a área central da bacia apresenta uma região que se encontra alagada no mapa utilizado para comparação que não foi reproduzida na simulação pelo THMB. Esse fato demonstra que o modelo ainda necessita de ajustes para representar de forma mais fidedigna as áreas alagáveis.

Na área delimitada pelas latitudes 10°S e 15°S e pelas longitudes 60°W e 65°W as áreas alagadas simuladas apresentam um deslocamento em relação às áreas observadas. Isso pode ser resultado de erros de registro em algum dos mapas de caracterização da bacia, uma vez que esse efeito só é observado nessa área.

Devido a escassez de dados observados para planícies de inundação, recorreu-se às comparações apresentadas como forma de executar uma avaliação mínima dos resultados da simulação. É necessário considerar também que o mapa de área alagável máxima produzido por Hess et al. (2009) considera todas as áreas passíveis de alagamento, mesmo que não caracterizem áreas que se encontram regularmente alagadas. Além disso, a resolução espacial da simulação introduz imprecisões típicas da limitação imposta por esse fator.

5.4.5 Simulação dos níveis d’água nas planícies de inundação

Para avaliar a simulação dos níveis d’água nas planícies foram utilizados dados observados em cinco trechos do rio Madeira obtidos por meio de um estudo de Birkett et al. (2002) através do uso do radar altimétrico TOPEX/POSEIDON.

O radar altimétrico emite microondas para a superfície e registra o tempo de retorno das ondas refletidas, por meio do qual ele calcula a distância entre sua antena e a superfície. A combinação desses registros com dados geofísicos permite derivar a topografia da superfície e também registrar as cotas de níveis d’água em grandes rios. Uma vez que o satélite passa repetidas vezes por uma mesma órbita, é possível construir uma série histórica da variação dos níveis d’água num dado ponto durante o tempo de operação do satélite (Birkett et al., 2002).

Embora os dados observados possam contribuir para a análise dos níveis d'água simulados, existe uma série de limitações que se impõem nessa comparação, as quais são resumidas a seguir:

- O modelo THMB registra os valores de nível d'água inferiores à altura máxima da água na calha do rio como altura zero uma vez que está ajustado para calcular apenas os níveis d'água referentes ao volume excedente ao da calha. No entanto, cada célula de superfície correspondente a um trecho de rio possui uma altura máxima de calha diferente, o que dificulta a comparação com os dados observados;
- A altitude do terreno representada no MDE (um dos dados requeridos pelo modelo) se refere à altitude média da célula em questão e não à altitude em um ponto específico do espaço e, por isso, sua acurácia está relacionada às técnicas de produção do MDE e, também, à sua resolução espacial. Uma vez que no modelo as direções de fluxo na planície, bem como o nível d'água, são calculados com base no MDE a precisão desses cálculos está condicionada à qualidade desse dado, o qual não inclui informações batimétricas;
- A altitude declarada do radar não se refere especificamente a um ponto, mas sim a uma faixa pela qual o satélite passa e, portanto, para comparar os resultados do modelo com os resultados do satélite, foi necessário recorrer a um ponto que correspondesse aproximadamente ao centro da faixa percorrida pelo satélite e que coincidissem com uma célula da superfície do mapa de níveis d'água gerados pelo THMB;
- Os dados produzidos pelo radar estão condicionados por suas limitações técnicas;
- Por fim, o cálculo do nível d'água nas planícies no THMB é feito com base em uma relação empírica relativa à porcentagem de área alagada na célula e, portanto, seu cálculo está condicionado à representatividade da técnica utilizada.

Devido a esses fatores, a avaliação dos dados simulados é apresentada aqui como de caráter qualitativo, através do qual será possível analisar a amplitude da variação dos níveis d'água e também o timing entre as águas altas e baixas, mas não será possível avaliar os dados simulados em termos de valores definitivos.

Os dados utilizados constituem uma série de registros para vários pontos da bacia Amazônica, registrados a cada 10 dias, aproximadamente, entre setembro de 1992 até fevereiro de 2000, processados e analisados por Birkett et al. (2002).

Os dados simulados foram comparados com as médias mensais dos dados observados para o período de janeiro de 1993 a dezembro de 1999, em cinco pontos do rio Madeira. Recorreu-se à comparação da variação relativa de níveis d'água uma vez que o satélite opera com um datum vertical próprio e o modelo executa as simulações com base no modelo digital de elevação, o qual expressa as altitudes em função do nível do mar. Foi necessário recorrer a uma normalização vertical dos dados simulados em relação aos observados, alinhando os períodos de cheias entre ambas as séries utilizando um fator constante. Esse procedimento também foi executado em Birkett et al. (2002) na comparação dos dados gerados pelo radar com aqueles medidos em estações limnimétricas da ANEEL em virtude do fato de que não havia, na época, uma padronização dos referenciais de altitude nas estações. Na Tabela 5.4 são apresentados os pontos (em coordenadas geográficas) que foram utilizados para avaliação dos níveis d'água e a Figura 5.13 apresenta a localização dos respectivos pontos no rio Madeira.

Tabela 5.4 – Pontos de avaliação dos níveis d'água.

Ponto	Latitude	Longitude
63	5,50° S	60,75° W
76	5,60° S	61,05° W
178	9,50° S	65,30° W
241-2	10,15° S	65,31° W
254	8,20° S	62,95° W

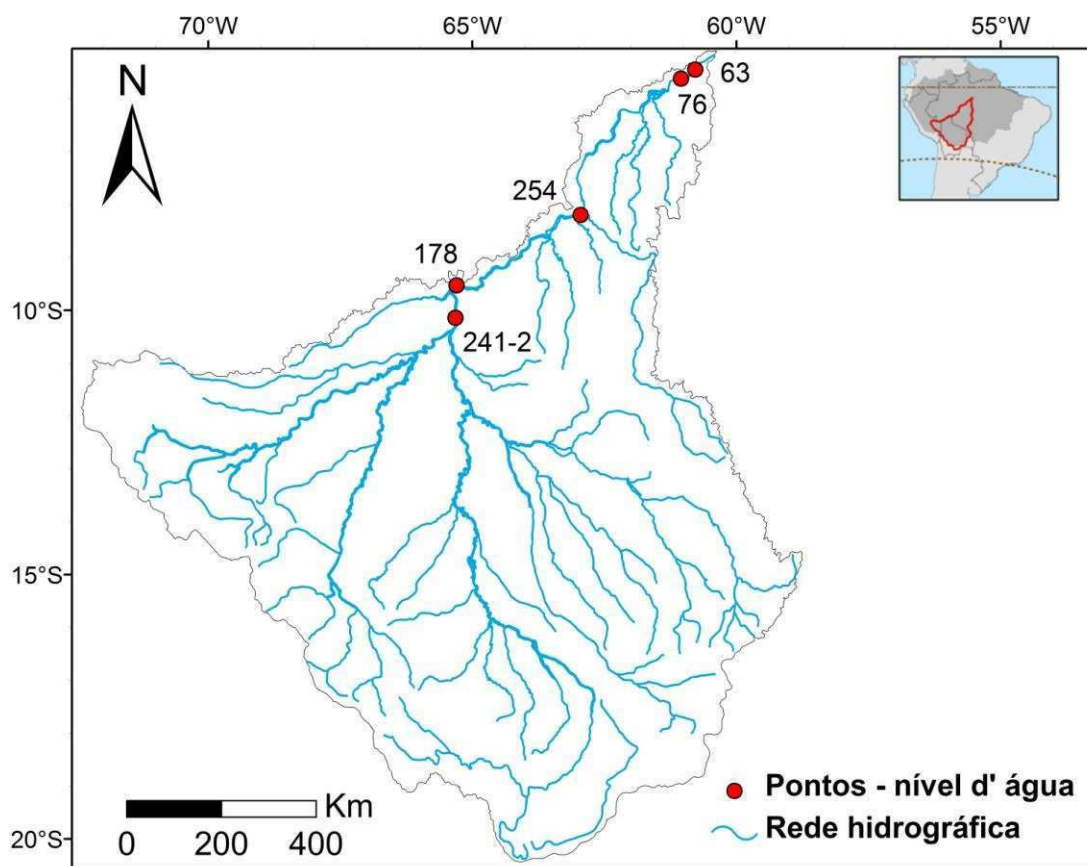


Figura 5.13 – Localização dos pontos de avaliação dos níveis d'água.

Na Figura 5.14 são apresentados os níveis d'água relativos observados e simulados para o período de janeiro de 1993 a dezembro de 1999 para os pontos da Tabela 5.4.

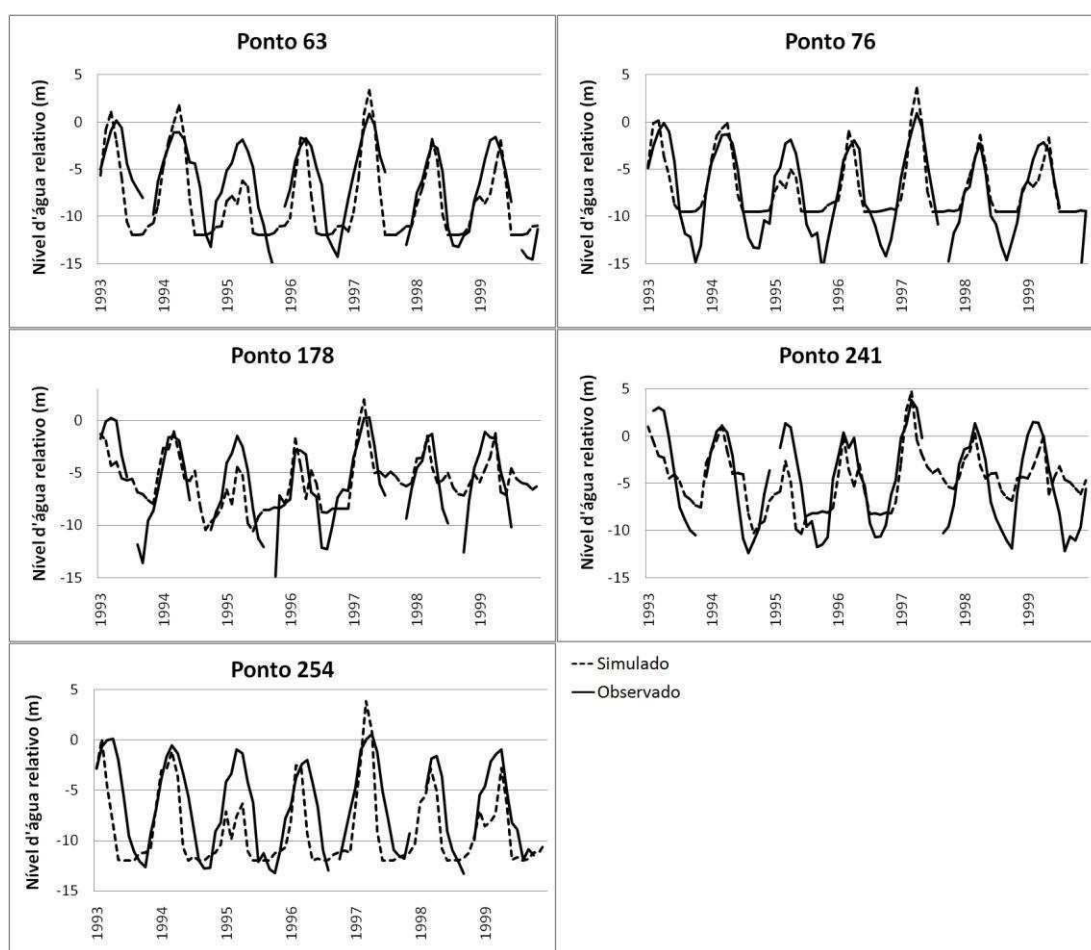


Figura 5.14 – Comparação de níveis d'água relativos no rio Madeira.

A comparação dos níveis d'água relativos demonstra que para os cinco pontos verificados, o modelo reproduz a amplitude entre épocas de cheia e seca, embora, como previamente mencionado, os níveis d'água abaixo do nível d'água máximo das calhas dos rios são representados como nível zero pelo modelo, o que pode ser nitidamente observado no gráfico do ponto 76. Os gráficos demonstram ainda que o tempo de ascensão e diminuição dos níveis d'água está bem representado nos dados simulados para os pontos verificados, com exceção ao ponto 254 na qual se verifica que as épocas de transição de cheia para seca estão adiantadas em relação aos dados observados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento do ciclo hidrológico e de suas interações com o sistema ambiental terrestre é de extrema importância para inúmeras finalidades na vida do ser humano, incluindo a previsão de eventos hidrológicos que possam oferecer risco às comunidades e a antecipação às respostas hidrológicas devido a alterações no uso e cobertura da superfície terrestre. Nessa perspectiva, é necessário difundir os conhecimentos relativos aos sistemas ambientais e o ciclo hidrológico, e viabilizar o acesso aos modelos hidrológicos como ferramentas de aprendizado e aplicação prática. O presente trabalho se enquadra nesse esforço e para isso se propôs a implementar uma versão do modelo THMB na plataforma de modelagem Dinamica EGO, com o objetivo de facilitar o acesso e uso de um modelo hidrológico distribuído, disponível por meio deste trabalho em uma plataforma com interface gráfica (recursos visuais) que permite a manipulação e execução de modelos de maneira mais intuitiva e de fácil compreensão. Desta forma, os recursos gráficos se configuram como uma alternativa ao uso das linguagens de programação de propósito geral. Alguns aspectos da implementação e validação do modelo são considerados a seguir.

Implementação, acesso e uso do modelo na interface

Na perspectiva da implementação, do acesso e do uso do modelo hidrológico implementado na plataforma de modelagem Dinamica EGO, as seguintes características do software utilizado foram consideradas vantajosas:

- a) facilidade de instalação: os requisitos de instalação do software são simples e de fácil compreensão; apenas um executável é necessário para a instalação;
- b) visualização do fluxo de dados: o modelo é representado por meio de blocos de funções e setas que indicam o fluxo de dados num arranjo intuitivo;
- c) organização modular: os recursos gráficos permitem o agrupamento de componentes do modelo e a inserção de comentários para facilitar a organização;

- d) execução do modelo: ferramentas de verificação de erros destacam os pontos em conflito no modelo; a execução pode ser feita através da interface ou através de um console que executa o modelo em background;
- e) ferramenta de visualização de mapas: os mapas gerados pelo modelo podem ser visualizados e seu histograma pode ser ajustado diretamente no visualizador do software;
- f) ferramenta Wizard editável: o software conta com uma ferramenta que auxilia no processo de criação de um assistente de uso específico para cada modelo;
- g) linguagem textual integrada: o modelo pode ser implementado também através de uma linguagem textual própria, a linguagem EGO, gerando um script.

Essas características, quando comparadas às características inerentes à programação por meio de linguagem textual contínua e execução em linha de comando, colaboram para facilitar a compreensão do modelo por parte do usuário. No entanto, quando o nível de complexidade do modelo aumenta, a visualização na interface fica prejudicada, o que requer do modelador que utilize todos os recursos possíveis para melhorar o nível de organização do modelo e facilitar a compreensão pelo usuário.

Em comparação aos modelos implementados em softwares com interfaces gráficas, os modelos construídos através de linguagens de programação de propósito geral, como o FORTRAN, apresentam uma vantagem em relação aos anteriores: a velocidade de execução. Em geral, a presença de uma interface gráfica e de toda uma estrutura de software por trás do modelo implica em custos computacionais altos que se traduzem na redução da velocidade de processamento. Dessa forma, é necessário ponderar os objetivos, escala de aplicação do modelo e o público que o utilizará.

A portabilidade direta do THMB – versão FORTRAN para o ambiente do Dinamica EGO não é possível em função das características computacionais desses dois ambientes, os quais se diferem principalmente pelo fato de que o FORTRAN é uma linguagem de programação de propósito geral e o Dinamica EGO é um software que faz uso de uma linguagem especialmente desenvolvida para modelagem de

fenômenos espacialmente distribuídos. Por esse motivo, para a implementação do modelo no Dinamica EGO é necessária uma mudança de abordagem em relação à forma com que ambos os programas executam os passos da simulação, principalmente nos processos que envolvem a interação entre células vizinhas, como exemplificado no Capítulo 4 – Seção 4.5.

Ponderados esses fatores, as plataformas de modelagem com interfaces gráficas figuram como uma alternativa às linguagens de programação de propósito geral, apresentando vantagens em relação ao acesso e usabilidade dos modelos hidrológicos, embora as desvantagens também devam ser ponderadas.

Validação do modelo THMB: bacia do rio Madeira

A implementação do modelo THMB na plataforma de modelagem Dinamica EGO foi utilizada para simulação de vazões na bacia do rio Madeira. Os dados de entrada utilizados bem como os valores constantes e relações empíricas foram os mesmos utilizados em Coe et al. (2008; 2009). Isso foi feito com o objetivo de comparar os resultados obtidos não somente com os dados observados, mas também com a simulação executada na versão original, em FORTRAN. Os resultados indicam que a versão Dinamica EGO do modelo está em concordância com a versão original, apresentando diferenças da ordem de 0 a 3% nos valores de vazões anuais e entre 7% a 20% para vazões mensais.

Os resultados obtidos para vazões indicam que o modelo está em boa concordância quando consideradas as vazões anuais e em relativa concordância na simulação das vazões mensais. Algumas estações apresentam erros significativos em relação aos dados observados, o que também foi observado na versão FORTRAN, indicando que essa imprecisão pode ter origem em erros nos dados de entrada do modelo ou mesmo nos valores paramétricos utilizados relacionados à velocidade da água. As possíveis fontes de erros foram apresentadas junto aos resultados no Capítulo 5.

A simulação de áreas alagadas apresentou resultados que indicam uma relativa concordância com os dados utilizados para comparação, porém a carência de mapeamentos das áreas alagadas, considerando sua dinâmica, dificultam as etapas de

calibração e validação da modelagem. O mesmo pode ser dito em relação à comparação de níveis d'água nas planícies de inundação. Além disso, o modelo THMB faz uso de relações empíricas para estimar as áreas alagadas e níveis d'água, de forma que possui limitações próprias da técnica utilizada. Por isso, para avaliações mais precisas em relação às áreas alagadas é necessário recorrer a métodos mais complexos. No entanto, dentro dos objetivos para os quais o modelo tem sido aplicado (Li et al., 2007; COE et al., 2008; 2009), ele tem sido considerado satisfatório.

O desempenho do modelo na simulação das vazões, áreas alagadas e nível d'água é fortemente influenciado pela disponibilidade dos dados necessários para a simulação, bem como para a validação. Nem sempre é possível ter acesso a dados com resolução espacial adequada ou mesmo bases de dados climáticos com boa precisão.

O balanço hídrico vertical necessário ao modelo THMB é realizado pelo modelo IBIS. Se por um lado o modelo IBIS possui uma estrutura complexa o bastante para simular com boa precisão o balanço hídrico vertical, por outro, é desvantajoso que o modelo THMB seja dependente do referido modelo devido ao fato de que isso limita seu uso por parte dos usuários que não possuem acesso ao modelo IBIS. Por esse motivo, recomenda-se considerar a possibilidade de desenvolver, futuramente, um módulo de simulação do balanço hídrico vertical que possa ser incorporado à estrutura do modelo THMB. Embora não seja possível reproduzir o mesmo nível de complexidade do modelo IBIS, acredita-se que é possível obter uma simulação satisfatória do balanço hídrico vertical fazendo uso de relações simplificadas.

Por fim, com base nas considerações feitas, espera-se que a versão do modelo THMB, implementada na plataforma de modelagem Dinamica EGO, contribua para a difusão e uso dos modelos hidrológicos e que possa, futuramente, ser utilizada de forma acoplada aos modelos de uso e cobertura da terra desenvolvidos na plataforma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the european system: Systeme Hydrologique Europeen (SHE). **Journal of Hydrology**, n. 87, p. 61-77, 1986.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) [coord.]. **Atlas hidrológico do Brasil**. Brasília: ANEEL, IBAMA, SRH, 1999.

_____. **Sistema de informações georreferenciadas de energia e hidrologia: HIDROGEO**. Brasília: ANEEL, 2000.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento**: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP). 2004. 351 p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

ALSDORF, D. E.; DUNNE, T.; MELACK, J. M.; SMITH, L.; HESS, L. L. Diffusion modeling of recessional flow on central Amazonian floodplain. **Geophysical Research Letters**, n. 32, 2005.

_____; BATES, P. D.; MELACK, J. M.; WILSON, M. D.; DUNNE, T. The spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. **Geophysical Research Letters**, n. 34, 2007.

ANDERSSON, L.; WILK, J.; TODD, M. C.; HUGHES, D. A.; EARLE, A.; KNIVETON, D.; LAYBERRY, R.; SAVENIJE, H. H. G. Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River. **Journal of Hydrology**, n. 331, p. 43-57, 2006.

BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, n. 236, p. 54-77, 2000.

BEDIENT, R. B.; HUBER, C. W. **Hydrology and floodplain analysis**. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 763 p.

BERGER, T. Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. **Agricultural Economics**, n. 25, p. 245-260, 2001.

BEVEN, K.; KIRKBY, M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v.24, p. 43-69, 1979.

BIRKETT, C. M.; MERTES, L. A. K.; DUNNE, T.; COSTA, M. H.; JASINSKI, M. J. Surface water dynamics in the Amazon Basin: application of satellite radar altimetry. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 1-21, 2002.

BIRKHEAD, A. L.; JAMES, C. S. Muskingum river routing with dynamic bank storage. **Journal of Hydrology**, n. 264, p. 113-132, 2002.

BRATLEY, P.; FOX, B. L.; SCHRAGE, L. E. **A guide to simulation**. 2nd ed. Chicago: Springer-Verlag, 1987. 424 p.

BRINSON, M. M.; LUGO, A. E.; BROWN, S. Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. **Annual Review of Ecology and Systematics**, n. 12, p. 123-161, 1981.

BUYTAERT, W.; DE BIÈVRE, B.; WYSEURE, G.; DECKERS, J. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 8, v. 1, p. 108-114, 2004.

CARNEIRO, T. G. S. **Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change**. 2006. 109 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

COE, M. T. Simulating continental surface waters: an application to Holocene northern Africa. **Journal of Climate**, n. 10, p. 1680-1689, 1997.

_____. A linked global model of terrestrial hydrologic processes: simulation of modern rivers, lakes, and wetlands. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D8, p. 8885-8899, 1998.

_____. Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: testing the accuracy of an atmospheric GCM. **Journal of Climate**, v. 13, p. 686-703, 2000.

_____; COSTA, M. H.; BOTTA, A.; BIRKETT, C. Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 107, n. D20, p. 1-17, 2002.

_____; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Long-term simulations of surface waters of the Amazon river basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, n. 22, p. 2542-2553, 2008.

_____; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon river: land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, n. 369, p. 165-174, 2009.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001, 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

_____; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

COSTA, M. H.; OLIVEIRA, C. H. C.; ANDRADE, G.; BUSTAMANTE, T. R.; SILVA, F. A.; COE, M. T. A macroscale hydrological data set of river flow routing parameters for the Amazon basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 1-9, 2002.

_____; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, n. 283, p. 206-217, 2003.

CRAWFORD, M; LINSLEY, R. **Digital simulation in Hydrology Stanford Watershed Model IV**. Technical Report, n. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, 1966.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; VAN DEURSEN, W. P. A. Physically-based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. **Hydrological Processes**, n. 14, p. 1981-1992, 2000.

DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Technical Bulletin, n. 1468. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington DC, 1973. 327 p.

EVA, H. D.; DE MIRANDA, E. E.; DI BELLA, C. M.; GOND, V. **A vegetation map of South America**. EUR 20159 EN, European Commission, Luxembourg, 2002.

FOLEY, J. A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603-628, 1996.

FREEZE, R. A.; HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. **Journal of Hydrology**, n. 9, p. 237-258, 1969.

GALLAND, J. C.; GOUTAL, N.; HERVOUERT, J. M. TELEMAT: a new numerical model for solving shallow-water equations. **Advances in Water Resources**, n. 14, v. 3, p. 138-148, 1991.

Hess, L. L.; Affonso, A. A.; C. Barbosa, C.; Gastil-Buhl, M.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. M. LBA-ECO LC-07 **Basinwide Amazon Wetlands 100m Mask based on JERS SAR Images** (versão Abr. 2008). Data set. Disponível em <<http://lba.cptec.inpe.br/>> LBA Data and Information System, Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, Sao Paulo, 2009.

_____; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, n. 87, p. 404-428, 2003.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite element approach. **Hydrological Processes**, n. 15, p. 825-842, 2001.

ISEE SYSTEMS. **Stella® 9.1.4**. Lebanon: ISee Systems, [n.d.]. Disponível em: <<http://www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx>> Acesso em: 31 jan. 2011.

JAIN, M. K.; SINGH, V. P. DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. **Journal of Hydrology**, n. 302, p. 107-126, 2005.

- JOHANSON, R. C.; IMHOFF, J. C.; DAVIS, H. H. **User's manual for the Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF)**. Version N^o. 5.0. EPA-600/9-80-105. Athens: U.S. EPA Environmental Research Laboratory, 1980.
- KEDDY, P. A.; FRASER, L. H.; SOLOMESHCH, A. I.; JUNK, W. J.; CAMPBELL, D. R.; ARROYO, M. T. K.; ALHO, C. J. R. Wet and wonderful: the world's largest wetlands are conservation priorities. **BioScience**, v. 59, n. 1, p. 39-51, 2009.
- KOUWEN, N. **WATFLOOD/SPL**: hydrological model and flood forecasting system. Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2000. Disponível em: < www.civil.uwaterloo.ca/watflood/>. Acesso em Jan. 2011.
- KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; LENTERS, J. D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, n. 3, p. 795-825, 2000.
- LEHNER, B.; DÖLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, n. 296, p. 1-22, 2004.
- _____; VERDIN, K.; JARVIS, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 89, n. 10, p. 93-94, 2008.
- LI, K. Y.; COE, M. T.; RAMANKUTTY, N.; DE JONG, R. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. **Journal of Hydrology**, n. 337, p. 258-268, 2007.
- _____. Investigation of hydrological variability in West Africa using land surface models. **Journal of Climate**, v. 18, p. 3173-3188, 2005.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGERS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.
- LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for engineers**. New York: McGraw-Hill, 1975. 482 p.
- LIU, Q. Q.; CHEN, L.; SINGH, V. P. Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. **Journal of Hydrology**, n. 291, p. 28-41, 2004.
- MATHWORKS. **Simulink® 7.6**. Natick: Mathworks, 2010. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/simulink/>>. Acesso em: 31 jan. 2011.
- MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote sensing of wetlands on a global scale. **SIL News**, Societas Internationalis Limnologiae Theoreticae et Applicatae, v. 42, p. 1-5, 2004.
- _____; FORSBERG, B. Biogeochemistry of Amazon floodplain lakes and associated wetlands. In: **The biogeochemistry of the Amazon basin and its role in a**

changing world. McClain, M. E.; Victoria, R. L.; Richey, J. E. (Ed), p. 235-276, New York: Oxford University Press, 2001.

MENDES, C. A .B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.1, n.1, p. 47-66, 1996.

MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B. Modelação de grandes planícies de inundação por um esquema de células: aplicação ao Pantanal do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia: Caderno de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 35-65, 1994.

MILLER, J. R.; RUSSELL, G. L.; CALIRI, G. Continental-scale river flow in climate models. **Journal of Climate**, n. 7, p. 914– 928, 1994.

MOFFATT, I.; HANLEY, N. Modelling sustainable development: systems dynamic and input–output approaches. **Environmental Modelling and Software**, n. 16, p. 545–557, 2001.

NETO, A. R. **Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira.** 2006, 195 p. Tese – (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.

_____. Simulação na bacia Amazônica com dados limitados: Rio Madeira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 47-58, 2008.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing twentieth-century space-time climate variability: part II: development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. **Journal of Climate**, v. 13, n. 13, p. 2217– 2238, 2000.

NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X.; WETZEL, S. W.; WOOD, E. F. Streamflow simulation for continental-scale river basins. **Water Resources Research**, v. 33, n. 4, p. 711-724, 1997.

NIJSSEN, B.; O'DONNELL, G. M.; HAMLET, A. F. E.; LETTENMAIER, D. P. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. **Climatic Change**, v. 50, n. 1-2, p. 143-175, 2005.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **National Weather Service River Forecast System, forecast procedures.** NOAA Tech Memo NWS HYDRO-14, U. S. Department of Commerce, Silver Springs, dez, 1972.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso: bacia do Rio Solimões.** 2009, 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

PAZ, A. R. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação.** 2010, 258 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

_____; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrodinâmica integrada rio-planície em ambiente SIG: aplicação ao Rio Aquidauana. In: I° Simpósio de Geotecnologias no Pantanal – GEOPANTANAL, 1, 2006, Campo Grande – MS. **Anais**.

_____; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. **Journal of Hydrology**, v. 343, n. 3, p. 127-139, 2007.

PEIXOTO, L. S.; MAUAD, F. F. Estudo de conflitos de usos múltiplos da água utilizando simulação computacional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n.4, p. 209-215, 2003.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, n. 193, p. 120-145, 1948.

PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; LIMA, F. Z.; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C.; PRUSKI, F. F. Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 461-472, 2009.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4ª ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519 p.

RENNÓ, C. D; SOARES, V. J. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Relatório Técnico Parcial. São José dos Campos: INPE, 2000. 65 p. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 28 jun. de 2009.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, B. M.; HESS, L. L. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, n. 416, p. 617-620, 2002.

ROCKWOOD, D. M. Columbia basin streamflow routing by computer. **Journal of Waterway and Harbors Division**, ASCE, v. 2, n. 1, 1958.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S; COSTA, W. L. S. Dinamica EGO: uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3089-3096.

SENNA, M. C. A.; COSTA, M. H.; PINTO, L. I. C.; IMBUZEIRO, H. M. A.; DINIZ, L. M. F.; PIRES, G. F. Challenges to reproduce vegetation structure and dynamics in Amazonia using a coupled climate-biosphere model. **Earth Interactions**, v. 13, n. 11, p. 1-28, 2009.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Boulder: Water Resources Publications, 1995.

SILVESTRINI, R. A.; SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; NEPSTAD, D. Simulating the occurrence of hot pixels along the Amazon forest fringe. In: LBA-ECO SCIENCE TEAM MEETING, 11, 2007.

SIPPEL S. J.; HAMILTON S. K.; MELACK J.M.; NOVO E. M. M. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon

River floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, n. 19, p. 3075–3096, 1998.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.

_____; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M. C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, n. 10, p. 745-764, 2004.

_____; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; VOLL, E.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modeling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n.???, p. 520-523, 2006.

_____; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade**, v. 3, n. 1-2, p. 74-85, 2007.

_____; RODRIGUES, H. O; COSTA, W. L. **Modelagem de dinâmica ambiental com Dinamica EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto – Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acesso em: 02 jun. de 2009.

STEVENS, H. H.; YANG, C. T. **Summary and use of selected fluvial sediment-discharge formulas**. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 89-4026, 121 p. 1989.

TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468-482, 2007.

TUCCI, C. E. M. [org.] **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora UFRGS [Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos], 2002. 943 p.

_____. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, [Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos], 2005. 678 p.

VENTANA INCORPORATION. **Vensim® 5.9**. Boston: Ventana Inc., 2009. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: 31 jan. 2011.

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. **Landscape Ecology**, v. 19, n. 1, p. 77-98, 2004.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MOORE, B.; GRACE, A. L.; GILDEA, M. P.; MELILLO, J. M.; PETERSON, B. J.; RASTETTER, E. B.; STEUDLER, P. A. Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 3, n. 3, p. 241– 265, 1989.

WICKS, J. M.; BARTHURST, J. C. SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. **Journal of Hydrology**, 175, p. 213-238, 1996.

WILSON, M.; BATES, P.; ALSDORF, D.; FORSBERG, B.; HORRITT, M.; MELACK, J.; FRAPPART, F.; FAMIGLIETTI, J. Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands. **Geophysical Research Letters**, n. 34, L08402, 2007.

WITTMAN, F.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. The varzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. **Forest Ecology Management**, n. 196, p. 199-212, 2004.

WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P.; ZARTARIAN, V. G. A. Land-surface hydrology parameterization with Subgrid variability for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D3, p. 2717-2728, 1992.

XU, C. Y.; WIDÉN, E.; HALLDIN, S. Modelling hydrological consequences of climate change: progress and challenges. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 6, p. 789-797, 2005.