



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.10.11.22-TDI

**MAPEAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS DA CALHA
SOLIMÕES/AMAZONAS UTILIZANDO ANÁLISE DE
IMAGENS BASEADA EM OBJETO COM DADOS
MDE-SRTM**

Felipe Augusto Ventura da Silva Alfaya

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Sensoria-
mento Remoto, orientada pelos
Drs. Teresa Gallotti Florenzano, e
Cláudio Clemente Faria Barbosa,
aprovada em 03 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BMAAGH>>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.10.11.22-TDI

**MAPEAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS DA CALHA
SOLIMÕES/AMAZONAS UTILIZANDO ANÁLISE DE
IMAGENS BASEADA EM OBJETO COM DADOS
MDE-SRTM**

Felipe Augusto Ventura da Silva Alfaya

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Sensoria-
mento Remoto, orientada pelos
Drs. Teresa Gallotti Florenzano, e
Cláudio Clemente Faria Barbosa,
aprovada em 03 de maio de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BMAAGH>>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Alfaya, Felipe Augusto Ventura da Silva.

A128m Mapeamento de áreas alagáveis da calha Solimões/Amazonas utilizando análise de imagens baseada em objeto com dados MDE-SRTM / Felipe Augusto Ventura da Silva Alfaya. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xviii + 59 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.10.11.22-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Teresa Gallotti Florenzano, e Cláudio Clemente Faria Barbosa.

1. planície de inundação do Amazonas. 2. Classificação baseada em objeto. 3. SRTM. 4. HAND. I.Título.

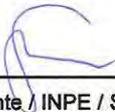
CDU 551.435.12

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dra. Evelyne Marcia Leão de Moraes Novo


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

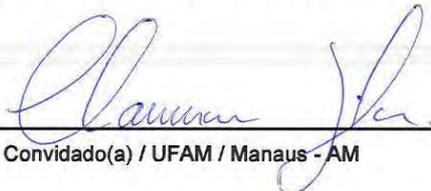
Dr. Camilo Daleles Rennó


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cláudia Maria de Almeida


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Cláuzionor Lima da Silva


Convidado(a) / UFAM / Manaus - AM

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Felipe Augusto Ventura da Silva Alfaya

São José dos Campos, 03 de maio de 2012

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer em primeiro lugar os meus orientadores, a Dr^a. Teresa Gallotti Florenzano e o Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa, pelo enorme apoio que eles me deram durante este trabalho, pelas sugestões valiosas e por permitir que eu cometesse meus próprios erros durante o processo.

À Dr^a. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, muito obrigado pela ajuda, especialmente nos momentos iniciais da elaboração desta dissertação. Ela foi fundamental para que eu aprendesse o pouco que eu sei sobre a Amazônia hoje.

Ao Dr. Camilo Daleles Rennó, por ceder muito do seu tempo me ensinando a usar o HAND e como usar o método de Monte Carlo para avaliar a classificação.

Ao Alexandre Copertino Jardim por responder prontamente às minhas dúvidas sobre o TerraHidro, inclusive gerando novas versões do programa quando necessário.

À Dr^a. Cláudia Maria de Almeida, pela ajuda com os processos da classificação baseada em objeto, seus esclarecimentos foram essenciais para moldar as minhas ideias em algo coerente.

Aos amigos e colegas de turma (Ulisses, Leonardo, Tathiane, Fabian, Ana Elisa) por me aguentarem durante todo esse tempo, e por me darem novas ideias mesmo quando vocês (nem eu) não soubessem que elas estavam surgindo.

Aos meus pais, Reni e Antonio, que já passaram por todo esse processo e por isso me deram todo o apoio possível, e à minha irmã Natalia, pelo carinho e pelas risadas.

Agradeço também ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização de suas instalações e à Coordenação do curso de Pós-Graduação em sensoriamento remoto, pelo empenho em fornecer as condições necessárias para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

RESUMO

O estudo da planície de inundação do rio Amazonas é de grande importância para diversas áreas de pesquisa, e o primeiro desafio que deve ser superado é definir acuradamente a área de ocorrência da planície de inundação. Uma fonte importante de dados para este tipo de estudo é o Modelo Digital de Elevação do SRTM. O objetivo deste trabalho é avaliar o uso de dados SRTM e o descritor HAND para mapear as áreas alagáveis da planície de inundação do rio Amazonas, utilizando análise baseada em objeto. Para o desenvolvimento de um método de classificação, foram escolhidas seis áreas-teste: Tabatinga, Fonte Boa, Codajás, Jatuarana e Parintins no Estado do Amazonas e à Óbidos no Estado do Pará. Na análise orientada a objeto utilizaram-se dois níveis de segmentação e três de classificação. Os dados utilizados foram: o MDE-SRTM, o MDE-HAND e imagens declividade e curvatura derivadas do MDE-HAND. O conjunto de procedimentos desenvolvidos nas áreas-teste foi então aplicado a toda a área de estudo. Uma avaliação preliminar foi realizada pelo cálculo do índice *Kappa* da classificação em relação ao mapa de referência (0,711). Em seguida uma análise mais aprofundada foi realizada das áreas-teste recortadas do produto da classificação final. Essas áreas foram então submetidas a uma análise do índice *Kappa* pelo método de Monte Carlo. Neste procedimento, os valores de *Kappa* de 5.000 conjuntos de amostras aleatórias foram combinados para criar um intervalo de credibilidade para cada área-teste, em relação ao mapa de referência. Os resultados da análise de Monte Carlo revelam que os dados e método utilizados são promissores para o mapeamento de planícies de inundação desse porte.

MAPPING THE WETLANDS OF THE AMAZON/SOLIMÕES RIVER FLOODPLAIN USING OBJECT BASED CLASSIFICATION WITH SRTM-DEM

ABSTRACT

The study of the Amazon River floodplain is of great importance for many subjects, and the first challenge that needs to be overcome in these studies is accurately defining the area of floodplain occurrence. An important source of data for this kind of study is the SRTM Digital Elevation Model. The objective of this work is to evaluate the use of SRTM data and the HAND descriptor to map the wetlands of the Amazon River floodplain, using object based image analysis. Six Amazon River floodplain reaches: Tabatinga, Fonte Boa, Codajás, Jatuarana and Parintins, Amazonas State, and Óbidos, Pará State were selected as test areas for the development of a classification method. The classifications were carried out using a two-level segmentation and three-level classification procedure, with SRTM-DEM, HAND-DEM and HAND-DEM derived slope and curvature images being used as information layers. The set of procedures developed based on the test areas was then applied to the complete study area. A preliminary evaluation by the calculation of the *Kappa* index of the study area in relation to a reference map (0.711) was carried out. A more in-depth analysis using subsets of the study area classification corresponding to the test areas was then executed. These subsets were evaluated through a Monte Carlo method analysis, in which the values of *Kappa* for 5.000 sets of randomly chosen samples were combined to create a credibility interval for each test area in relation with the reference map. The results of the Monte Carlo analysis reveal that this method shows promise for floodplain mapping using object based classification methods.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 – Níveis mensais médios do rio Amazonas na estação fluviométrica de Óbidos-PA, no período 1968-2010.....	6
Figura 3.1 – Localização da área de estudo.....	19
Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	24
Figura 4.2 – Localização das áreas-teste.....	25
Figura 4.3 – A: Imagem do MDE-HAND de Óbidos. B: Mesma imagem de A, com as transições entre classes, de acordo com o mapa de referência, destacadas com linhas verdes.	28
Figura 4.4 – Imagem curvatura da área de Óbidos.	29
Figura 4.5 – Variáveis, parâmetros e tipos de segmentação utilizados.....	29
Figura 4.6 – Hierarquia das classes e seus atributos para classificação.	31
Figura 5.1 – Mapa da planície de inundação do rio Amazonas gerado da classificação baseada em objeto.....	36
Figura 5.2 – Erros de classificação em afluentes de pequeno porte (exemplos em destaque). A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Classificação gerada neste trabalho.	37
Figura 5.3 – Classificação gerada sem os procedimentos de correção. Em destaque: exemplos de erros de classificação de pequenos objetos da imagem.....	38
Figura 5.4 – Exemplo de ruído no MDE-SRTM de um setor próximo a confluência do rio Tapajós com o Amazonas, destacado pela elipse.....	39
Figura 5.5 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003), B: Mapa resultante da classificação e C: MDE-SRTM da área próxima à foz do rio Juruá. As áreas destacadas são ilhas fluviais representadas no mapa de referência, mas não no MDE-SRTM e, conseqüentemente, nem no mapa gerado.	40
Figura 5.6 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Mapa obtido da Classificação da área-teste de Óbidos.....	42
Figura 5.7 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Mapa gerado da classificação. C: MDE-SRTM da área-teste de Codajás. As áreas destacadas em branco são ruídos no MDE-SRTM. As áreas	

destacadas em vermelho são ilhas fluviais existentes na referência, mas não no MDE-SRTM.	44
Figura 5.8 - A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Resultado da classificação da área-teste de Tabatinga. As áreas destacadas nesses mapas são ilhas existentes na referência, mas não no MDE-SRTM. C: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e D: resultado da classificação da área-teste de Fonte Boa.....	46
Figura 5.9 - A: Mapa de referência e B: Resultado da classificação gerada para a área-teste de Jatuarana. C: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e D: Resultado da classificação gerada para a área-teste de Parintins.	47
Figura 5.10 - A: Resultado da classificação com a rede semântica modificada, obtido para as áreas-teste de: Óbidos (A), Tabatinga (B) e Codajás (C).	50

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 5.1 – Índices <i>Kappa</i> obtidos pelo método Monte Carlo para as áreas-teste	41
Tabela 5.2 – Índices <i>Kappa</i> obtidos pelo método Monte Carlo para as áreas-teste utilizando a rede semântica modificada.....	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
GEOBIA	<i>Geographic Object Image Analysis</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRFM	<i>Global Rain Forest Mapping</i>
HAND	<i>Height Above Nearest Drainage</i>
JERS-1	<i>Japanese Earth Resources Satellite 1</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDE-HAND	Modelo Digital de Elevação baseado no HAND
MDE-SRTM	Modelo Digital de Elevação baseado no SRTM
MSS	<i>Multi Spectral Scanner</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWBD	<i>SRTM Water Body Dataset</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>

SUMÁRIO

	Pág.
1	INTRODUÇÃO 1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 5
2.1.	Geomorfologia da Planície de Inundação do Rio Amazonas 6
2.2.	Sensoriamento Remoto no Estudo de Áreas Alagáveis da Planície do Rio Amazonas 10
2.3.	Características e Limitações do MDE-SRTM 11
2.4.	HAND – <i>Height Above Nearest Drainage</i> (Altura Acima da Drenagem Mais Próxima)..... 13
2.5.	GEOBIA – <i>Geographic Object Image Analysis</i> (Análise de Imagens Baseada em Objetos)..... 14
2.6.	Avaliação da Classificação pelo Método Monte Carlo..... 17
3	ÁREA DE ESTUDO..... 19
4	MATERIAL E MÉTODOS..... 23
4.1.	Material 23
4.2.	Métodos 23
4.2.1.	Recorte do MDE-SRTM e Seleção das Áreas Teste..... 24
4.2.2.	Geração do MDE-HAND e das Grades Declividade e Curvatura.. 25
4.2.3.	Criação da Rede Semântica..... 29
4.2.4.	Avaliação da Classificação com o Método de Monte Carlo..... 34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 35
6	CONCLUSÕES 53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

1 INTRODUÇÃO

As áreas próximas a rios e planícies de inundação são as preferidas pela ocupação humana, pois são locais onde água, alimento e matérias primas podem ser facilmente encontrados e extraídos, além de serem caminhos naturais. Neste aspecto, na região amazônica, os rios, muitas vezes, são a única opção para o deslocamento de pessoas e de produtos (BRIDGE; DEMICCO, 2008). O estudo desse tipo de ambiente envolve diversas áreas de pesquisa e também questões econômicas e sociais. Nesse sentido, definir com boa exatidão as áreas inundáveis é importante, por exemplo, na avaliação da disponibilidade de habitats, no manejo de estoques de pescado e lenha, e nas estimativas de fluxo de metano para a troposfera (FORSBERG et al., 2000).

Os geomorfólogos, em especial, estudam intensivamente as planícies de inundação, pois elas proporcionam uma oportunidade de se examinar processos fluviais e a história do ambiente, utilizando como unidade de estudo as bacias hidrográficas (HUDSON, 2003). Planícies de inundação e outras áreas inundáveis são ambientes comuns na bacia amazônica e fazem parte de um dos ecossistemas mais importantes do mundo, sendo objeto de estudo de uma grande quantidade de trabalhos científicos.

Uma das grandes dificuldades, no entanto, para o estudo de planícies de inundação é a sua delimitação e caracterização. No caso da planície de inundação do rio Amazonas essa dificuldade aumenta devido à sua grande extensão, variação da sazonalidade, fragmentação, complexidade e dificuldade de acesso. Por isso, a integração de informações derivadas de sensoriamento remoto e de outras fontes em ambientes de sistemas de informações geográficas, é fundamental no estudo dessas regiões (AFFONSO et al, 2007).

Técnicas de sensoriamento remoto são ferramentas poderosas para o estudo das planícies de inundação de rios de grande extensão como o Amazonas. A visão sinóptica e imagens de múltiplas datas fornecem informações não disponíveis de outra maneira. Entretanto, a frequente cobertura de nuvens sobre a bacia hidrográfica do Amazonas e as variações sazonais de seus

ambientes constituem-se em desafios para o estudo das características ecológicas de águas abertas e da vegetação de planícies de inundação (MELACK et al., 1994), a partir de sensoriamento remoto. Isso pode ser contornado em parte com o uso de sensores ativos, os quais revelam a complexidade da topografia na região amazônica (HESS et al., 2003, MELACK e HESS, 2004).

Hess et al. (2003), utilizando um conjunto de imagens geradas pelo radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*) na banda L do satélite japonês JERS-1, criaram um mapa das áreas inundáveis de uma porção de 18° por 8° da bacia amazônica, o que corresponde à maior parte da extensão brasileira do rio Amazonas. Nesse mapeamento, foram utilizados dois conjuntos de imagens, um com os níveis de água próximos aos valores máximos, e outro com os níveis de água próximos aos valores mínimos. Entretanto, considerando a variação do período de cheias ao longo da planície amazônica, as imagens utilizadas por Hess et al. (2003) nem sempre refletiram fielmente esses períodos. Assim, é possível que o mapa gerado por esses autores não represente corretamente a real extensão das áreas alagáveis da planície de inundação do rio Amazonas. Nesse sentido, uma alternativa para a delimitação das áreas alagáveis da planície de inundação é o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE), como aqueles gerados dos dados do SRTM (RABUS ET AL., 2003).

Outra possibilidade, que foi utilizada nesta pesquisa, é o MDE-HAND, criado por Rennó et al. (2008), a partir da aplicação do descritor HAND (*Height Above Nearest Drainage*) aos dados do MDE-SRTM. Esse descritor produz um modelo digital de elevação (MDE-HAND), para o qual a rede de drenagem apresenta altura zero e as alturas das demais áreas são relativas à rede de drenagem. Esses autores realizaram testes com o MDE-HAND em áreas da bacia amazônica e obtiveram forte relação entre o modelo e a topografia local, o que torna o modelo interessante para estudos geomorfológicos na Amazônia, onde as grandes áreas e as dificuldades de acesso prejudicam os trabalhos de campo.

Segundo Asselen e Seijmonsbergen (2006), os mapeamentos geomorfológicos realizados com técnicas de classificação baseada em valor de pixel (pixels de uma imagem ou células de um MDE) apresentam problemas, pois a paisagem é construída por unidades em diferentes combinações. Enquanto esses métodos de classificação não conseguem separar essas unidades de paisagem, uma classificação baseada em objeto pode tornar isso possível. Objetos criados por um processo de segmentação podem ter muito mais informações do que pixels individuais, pois o contexto espacial é levado em conta na definição dos objetos. Essa diferença é importante para a análise ambiental, para a qual o contexto espacial é extremamente relevante. O contexto espacial é analisado na classificação baseada em objeto pela utilização de atributos que não podem ser medidos com processos baseados apenas em pixels, como, por exemplo, a forma, área e perímetro dos objetos ou sua textura.

A combinação dos dados topográficos gerados pelo HAND, a partir do MDE do SRTM, com as técnicas de classificação baseada em objeto pode ser uma alternativa para o mapeamento de áreas alagáveis da planície de inundação. Isso, principalmente de planícies extensas, como a do Amazonas, para as quais os procedimentos comuns de análises de campo exigem grandes investimentos de tempo e de recursos, muitas vezes inviáveis.

Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de mapeamento das áreas alagáveis da planície de inundação do rio Amazonas utilizando análise baseada em objeto com dados geomorfométricos de altitude (MDE-SRTM, MDE-HAND), declividade e curvatura, estes últimos gerados a partir do MDE-HAND.

Objetivos Específicos

- a) Testar o uso do MDE-HAND gerado a partir de dados MDE-SRTM na separação entre as áreas alagáveis da planície de inundação e terra firme.

- b) Avaliar a adequabilidade de uma única rede semântica na classificação de uma extensa e heterogênea planície de inundação como a do rio Amazonas, caracterizada por diferentes morfologias.
- c) Avaliar o desempenho da análise baseada em objeto no mapeamento de áreas alagáveis de grandes planícies de inundação, como a do rio Amazonas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma planície de inundação é uma faixa de terra que margeia o canal de um rio, e é alagada regularmente durante inundações sazonais (BRIDGE; DEMICCO, 2008). Segundo Junk (1989), as planícies de inundação são áreas que recebem periodicamente o aporte lateral das águas de rios, lagos, da precipitação direta ou de lençóis subterrâneos, sendo de particular interesse na região amazônica aquelas associadas a rios e lagos. Ele salienta que a regularidade do padrão de inundação e sua duração têm importância ecológica e são responsáveis pelas modificações anuais desse ambiente, determinando fase terrestre e aquática distintas. O ciclo de enchentes e de vazantes exerce grande influência na geomorfologia da bacia, esculpindo as formas de relevo encontradas na planície de inundação.

As planícies de inundação, por sua natureza alternante, se situam entre sistemas abertos, de transporte, sistemas fechados e acumulativos. Na época da vazante, os corpos d'água lênticos são sistemas lacustres e acumulativos. Conforme o nível de água do rio sobe, estes ambientes assumem a função de reservatórios, podendo no período de cheia se tornar canais de transporte de água (JUNK, 1997).

A fase de acumulação de substâncias seguido de seu transporte pode ocorrer em pequenos períodos, por exemplo, no caso da produção de matéria orgânica, ou no intervalo de centenas ou milhares de anos, como no caso do transporte de sedimentos. A duração desse período é consequência do ritmo do pulso de inundação, que é baseado nas características hidrológicas do rio e na sua bacia de drenagem e planície de inundação (JUNK, 1997).

Áreas como a da planície amazônica, onde ocorrem inundações regularmente, apresentam uma característica monomodal, ou seja, um ciclo de baixa-enchente-cheia-vazante no ano. Para exemplificar esse comportamento, é apresentado o gráfico da Figura 2.1, que representa os valores médios do nível do rio Amazonas, registrados na estação fluviométrica em Óbidos, no estado do Pará, para cada mês do ano, no período de 1968-2010.

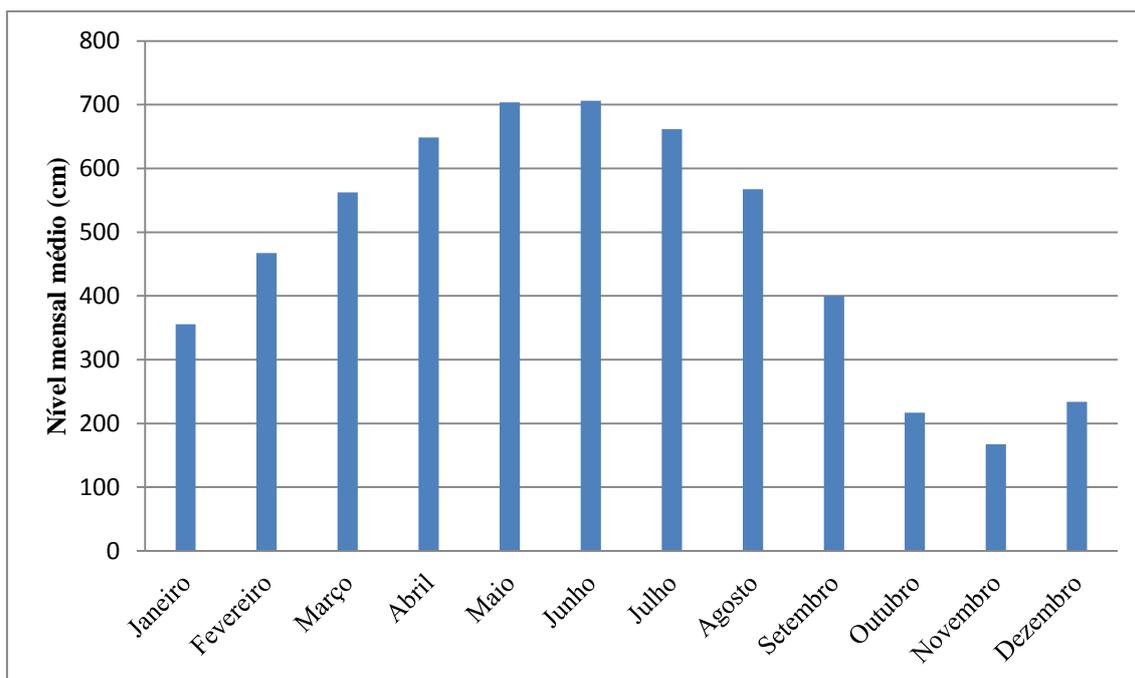


Figura 2.1 – Níveis mensais médios do rio Amazonas na estação fluviométrica de Óbidos-PA, no período 1968-2010.

A alternância entre ambiente terrestre e aquático faz com que esse tipo de ambiente seja diferenciado em relação a outras áreas úmidas, que tem um nível de água relativamente constante como, por exemplo, turfeiras, pântanos, ou as zonas litorâneas de muitos lagos (JUNK, 1997). Uma das abordagens que discutem esses ambientes é a teoria dos pulsos de inundação (JUNK, 1989).

2.1. Geomorfologia da Planície de Inundação do Rio Amazonas

Na região amazônica, existem quatro faixas de relevo principais, situadas em altitudes inferiores a 300 m, dotadas de diferentes formas de distribuição espacial e com aspectos morfológicos distintos, que compreendem: (1) os extensos terrenos aluviais; (2) os baixos platôs terciários (“tabuleiros”); (3) as formas de terrenos colinosas correspondentes às áreas de exposição de terrenos paleozóicos; e (4) os terrenos cristalinos rebaixados por processos de pediplanação (AB´SÁBER, 1967).

A unidade geológica mais jovem da região amazônica é formada no Quaternário. Os sedimentos quaternários constituídos por conglomerados, areias, siltes e argilas são os aluviões (antigos e recentes), que estão presentes em todos os rios da região. Os aluviões antigos, constituídos de arenitos finos argilosos, conglomerados e siltitos, formam os terraços antigos e ocupam uma posição topográfica elevada, estando dispostos discordantemente sobre unidades mais antigas que afloram na região, presentes nos vales dos rios Tapajós, Jatapu e Nhamundá (PROJETO RADAM, 1976). Os aluviões recentes, constituídos de areias, argilas e cascalhos, são quase sempre inconsolidados e se distribuem ao longo das calhas dos rios, igarapés e demais cursos d'água, formando os terraços aluvionares mais recentes (PROJETO RADAM, 1976).

Esses aluviões constituem a maior expressão fisiográfica da bacia Amazônica que é a planície de inundação do rio Amazonas. Pertencem a ela as áreas submetidas diretamente ao controle do rio Amazonas, separadas em alagadas e inundáveis. A planície fluvial alagada corresponde aos setores que, mesmo no período de menor volume das águas do rio Amazonas, estão submersos. A planície fluvial inundável são as áreas alagadas apenas no período das enchentes (PROJETO RADAM, 1976).

A geomorfologia da planície de inundação do rio Amazonas é caracterizada por uma variedade de formas de terreno, tais como barras de acreção, depósitos de transbordamento, lagos, depósitos lacustres e canais os quais estão constantemente mudando em resposta à hidrologia presente e a história deposicional e erosional do rio Amazonas (MERTES et al., 1996).

A retenção de sedimentos na bacia Amazônica está supostamente relacionada a uma tectônica de fraturas e falhas, iniciadas no Mioceno com o desenvolvimento do Graben Marajó. Os movimentos tectônicos prosseguiram durante o Plioceno sob a forma de uma ampla subsidência regional, por reativação atenuada da tectônica quebrável. Além da possibilidade de eventos tectônicos, a presença de dobramentos (*deep-seated folding movements*) pode

também ser responsável pela subsidência da bacia (BIGARELLA e FERREIRA, 1985).

A influência de feições tectônicas em padrões de drenagem na Amazônia central foi destacada por autores como Sternberg, (1950); Iriondo e Suguio, (1981); Franzinelli e Latrubesse, (1993); Igreja (2007). Sternberg (1950) foi o primeiro a salientar um consistente alinhamento NW-SE e NE-SW em muitos rios e canais da região. Entretanto, o papel dessas falhas tectônicas no controle da distribuição dessas áreas alagáveis não é totalmente claro (FORSBERG et al., 2000).

O padrão da rede de drenagem da bacia amazônica foi influenciado por controles estruturais desde a origem da bacia (CAPUTO, 1984; POTTER, 1978). De acordo com Igreja (2007), as megas e microformas de relevo são compatíveis ao atual sistema neotectônico transcorrente amazônico e esse sistema é o responsável pela ocorrência de feições tais como lagos isomórficos, igarapés dendriformes paralelos, zonas de restrições fuviais, ilhas, colinas e vales sigmoidais. Rios tropicais dessa bacia também possuem uma grande variedade de formas de canal. Por diversas vezes, os rios exibem uma transição de um para outro padrão, o que dificulta, ou mesmo inviabiliza, a aplicação da terminologia tradicional de canais retos, meandantes e entrelaçados (LATRUBESSE, 2007).

A influência tectônica pode ser verificada no encaixamento do rio Amazonas nas passagens pelas zonas de deformação resultantes dessas estruturas. Assim, por exemplo, quando o rio atravessa o arco de Purus verifica-se uma retificação e um estreitamento do vale para menos de 20 km (a média é de 45 km), além de um forte decréscimo do seu gradiente de depósito de sedimentos e de uma taxa de migração do canal desprezível (MERTES et al., 1996).

Nos setores à jusante destas zonas o vale vai gradativamente se ampliando novamente. Esses arcos podem explicar também a descontinuidade estratigráfica existente ao longo da calha do rio Amazonas. Por exemplo, a presença de lagos com grandes áreas na foz de vários afluentes do rio

Amazonas (Negro, Tapajós e Xingu) pode ser explicada, em parte, pela subsidência ao longo das maiores falhas (MERTES et al., 1996).

Padrões de fraturas e basculamentos locais, aparentemente não relacionados aos arcos estruturais, também marcam a geomorfologia da planície de inundação do rio Amazonas. Por exemplo, a existência de grande quantidade de meandros e lagos de meandro abandonados em setores à jusante da planície (MERTES et al., 1996).

Através da bacia sedimentar amazônica, o rio Solimões-Amazonas transporta 1.240 Mt/ano de sedimentos, outras 3.200 Mt/ano são erodidas e depositadas, formando uma complexa planície de inundação com diferentes padrões de feições geomorfológicas (MERTES et. al, 1996). Estas feições indicam que a formação da planície de inundação é controlada por depósitos de material fino do canal principal os quais constroem diques que tendem a confinar a migração deste canal e dos canais da planície. Todos os limites dos diques vão sendo gradualmente encobertos pelo processo de sedimentação. A indiscriminação das barras de acreção nos setores à jusante pode ser resultante da combinação de efeitos da lenta migração dos canais principal e de planície, estes sendo relativamente confinados (MERTES et. al., 1996).

Variações locais no comportamento do rio Amazonas e de sua planície de inundação podem resultar do aporte dos principais tributários, embora seja difícil avaliá-las. O rio Madeira, por exemplo, pode carregar metade da carga do canal principal. À jusante da confluência do rio Madeira, os bancos do rio Amazonas tendem a apresentar uma proporção de areia maior, além de um aumento da taxa de migração do canal e do número de ilhas (MERTES et al., 1996). Dessa maneira, conforme esses autores, no estudo da dinâmica atual da planície Amazônica, devem ser analisados a influência dos rios tributários e a interação entre os diferentes setores da planície, bem como os efeitos das variações climáticas, das mudanças no nível de base e da tectônica da área.

Para estudar a planície de inundação, é importante inicialmente conhecer sua área. Junk (1997) estimou que a área total de terras inundáveis da bacia

amazônica exceda um milhão de quilômetros quadrados, mas essa estimativa foi baseada em medições realizadas em poucos locais. Hess et al. (2003) indicam que, para a realização de uma análise quantitativa das áreas inundáveis, é necessário a obtenção de dados de sensoriamento remoto de toda a bacia. Eles estimaram em cerca de 300.000 km² a extensão das áreas inundáveis de um setor de 1.77 milhões de km² na porção central da bacia amazônica.

2.2. Sensoriamento Remoto no Estudo de Áreas Alagáveis da Planície do Rio Amazonas

Por ser um tema de interesse para diversas áreas de pesquisa e pela grande extensão e difícil acesso da planície amazônica, o sensoriamento remoto tem sido muito explorado no seu estudo. Alguns dos trabalhos mais recentes sobre a planície amazônica, que utilizaram dados de sensoriamento remoto são destacados a seguir.

Renó et al. (2011) avaliaram a área desflorestada no período entre 1977 e 2008 na planície de inundação em um trecho de 600 km entre as cidades de Parintins-AM e Almerim-PA. Utilizando imagens dos sensores Multi Spectral Scanner (MSS) e Thematic Mapper (TM) dos satélites da série Landsat e realizando verificações em campo, os autores estimam que uma área de aproximadamente 3.500 km² foi desflorestada na região neste período.

Alsdorf et al. (2010) combinaram imagens SAR do satélite JERS-1, dados SRTM, estimativa de precipitação da *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) (XIE et al., 2003) e observações de mudança de massa do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) (TAPLEY et al., 2004) para estimar a quantidade de água acumulada pela planície amazônica durante o período de cheia. Os autores puderam concluir que apesar de o fluxo de água do canal principal aumentar cinco vezes, o volume de água armazenado na planície de inundação apenas dobra durante uma cheia. Alsdorf et al. (2010)

também estimaram que o volume de água armazenado na planície de inundação que é drenado pelo rio corresponde a apenas 5% do total da vazão anual do rio Amazonas no oceano Atlântico.

Mertes et al. (1995) utilizaram imagens TM para mapear a vegetação, a hidrologia e a geomorfologia da planície, com o objetivo de identificar os limitantes físicos de maior influência na transferência e armazenamento de água, sedimentos e outros materiais durante o processo de inundação. Os autores indicam que as associações entre esses parâmetros têm o potencial de fornecer informações a respeito dos processos físicos que constroem e mantêm as formas do relevo da planície de inundação.

Hess et al. (2003) utilizaram imagens SAR do satélite JERS-1 para mapear a área alagável da planície de inundação da porção central do rio Amazonas, com uma área de estudo de 18° x 8°, abrangendo a maior parte do trecho da porção brasileira do rio. Para realizar o mapeamento, os autores utilizaram dois conjuntos de imagens geradas pelo *Global Rain Forest Mapping* (GRFM) (ROSENQVIST et al., 2000), um do período de seca e outro do período de cheia. Essas imagens possuem uma resolução espacial de aproximadamente 100 m.

O procedimento utilizado na geração desse mapa envolveu segmentação dos pixels da imagem de radar e classificação não supervisionada, baseada no cálculo da distância de Mahalanobis. O mapa foi validado com dados gerados de sobrevoo da área de estudo e obteve-se uma acurácia de 95%. A área inundável estimada foi de aproximadamente 300.000 km², o que equivale a 17% da área total estudada.

2.3. MDE-SRTM

O MDE é uma grade constituída de elementos denominados células, em que cada uma delas tem o valor da altura média da área que representa. Com esse tipo de representação da topografia, é possível mapear feições do relevo e

gerar mapas de variáveis geomorfológicas tais como declividade e curvatura do terreno.

O MDE gerado dos dados coletados pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (RABUS et al., 2003) se constitui na fonte de dados topográficos de melhor resolução e mais acurada, disponível atualmente para grande parte da superfície terrestre (RENNÓ et al., 2008). Contudo, os dados SRTM apresentam diversos problemas tais como erros de aquisição, áreas sem dados e efeitos de dossel, os quais afetam a qualidade do MDE. Efeitos de dossel, em especial, são devidos ao próprio sistema SAR de banda C escolhido, o qual interage de forma complexa com a cobertura vegetal (VALERIANO e ROSSETTI, 2012).

O MDE-SRTM possui uma resolução espacial de 3 segundos de arco, o que se traduz em aproximadamente em 90 m para áreas próximas ao Equador, e é atualmente uma das poucas fontes de dados topográficos em escala global adquiridos de forma consistente e em condições homogêneas, tendo a missão sido completada em cerca de 11 dias (entre 11 e 22 de fevereiro de 2000) (RABUS et al., 2003).

Entretanto, os dados SRTM apresentam diversos problemas, tais como erros de aquisição, áreas sem dados e efeitos de dossel, os quais afetam a qualidade do MDE. Efeitos de dossel, em especial, são devidos ao próprio sistema SAR de banda C escolhido, o qual interage de forma complexa com a cobertura vegetal (VALERIANO e ROSSETTI, 2012).

Erros de aquisição e áreas sem dados são normalmente devidos a artefatos geométricos do sistema SAR (efeitos de encurtamento, sobreposição e sombra de radar), reflexão especular da água, artefatos de desdobramento de fase e uma constante dielétrica complexa (DOWDING, KUUSKIVI e LI, 2004). Essas imperfeições do MDE-SRTM devem ser consideradas na geração de dados geomorfológicos derivados, por exemplo, declividade e curvatura do terreno, bem como no mapeamento de feições do relevo.

2.4. HAND – *Height Above Nearest Drainage* (Altura Acima da Drenagem Mais Próxima)

O HAND é um descritor elaborado por Rennó et al. (2008), que indica a altura de uma determinada localização geográfica, não em relação ao nível do mar, mas em relação ao ponto da rede de drenagem mais próximo. Os autores consideram que rios e lagos, os quais compõem a rede de drenagem, possuem altura zero, o que facilita sua identificação.

Esses autores aplicaram o HAND ao modelo digital de elevação (MDE-SRTM) derivado dos dados coletados pelo programa SRTM (RABUS et al., 2003). O produto gerado pelo descritor HAND também é um modelo digital de elevação (MDE-HAND). Rennó et al. (2008) realizaram testes com o MDE-HAND em áreas da bacia amazônica, e obtiveram forte relação entre o modelo e a topografia local.

Esses resultados indicam que o modelo pode ser útil para estudos geomorfológicos na Amazônia, onde a grande extensão e dificuldade de acesso prejudicam os trabalhos de campo. Além disso, a frequente cobertura dos alvos de interesse por nuvens e vegetação dificulta a interpretação dos dados de sensoriamento remoto.

Outro exemplo de aplicação do descritor HAND é o trabalho de Arasato et al. (2009). Esses autores utilizaram o MDE-HAND junto com um mapa de densidade de drenagem e o MDE-SRTM para modelar a distribuição da espécie *Euterpe edulis*, conhecida como palmito juçara, no território brasileiro. Entretanto, as autoras concluem que apenas este conjunto de dados não é suficiente para criar um modelo satisfatório, e outras variáveis de relevo, tais como declividade, são necessárias para se obterem melhores resultados.

2.5. GEOBIA – *Geographic Object Image Analysis* (Análise de Imagens Baseada em Objetos)

Segundo Hay e Castilla (2008), GEOBIA é uma subdisciplina da Ciência da Informação Geográfica (GIScience) dedicada ao desenvolvimento de métodos automatizados para a significativa divisão de imagens de sensoriamento remoto em objetos, e para avaliar suas características por meio de escalas espaciais, espectrais e temporais, com o intuito de gerar novas informações geográficas em SIG.

De acordo com Blaschke (2010), o termo GEOBIA é muitas vezes referido como análise de imagem baseada em objeto (OBIA), ou análise de imagem orientada a objeto (OOIA). O termo análise de imagem baseada em objeto foi recentemente considerado bem amplo, uma vez que, ele pode abranger análise de imagem em disciplinas como a visão computacional e a geração de imagens em áreas biomédicas. Dessa forma, o termo GEOBIA tem sido proposto para enfatizar a base geográfica da análise, ou seja, a dependência de dados de sensoriamento remoto e a geração de informações espaciais (JOHANSEN et al., 2010).

Os elementos básicos da GEOBIA são os objetos da imagem. Objetos da imagem são regiões contíguas (segmentos) na imagem, e representam uma instância de uma classe. Os objetos da imagem podem ser subdivididos em objetos de interesse, os quais correspondem a objetos do mundo real, como edificações ou talhões agrícolas, e objetos primitivos, que são normalmente determinados como um passo intermediário antes que os objetos de interesse possam ser encontrados nos processos de segmentação e classificação (BENZ et al., 2004). Os objetos, tanto primitivos como os de interesse, são normalmente definidos por possuírem alguma característica homogênea, por exemplo, cor ou textura, que os diferenciam dos objetos vizinhos.

Existem diversos procedimentos para definir um conjunto de objetos a partir de uma imagem. Neste trabalho, dois desses procedimentos foram utilizados: a segmentação multirresolução e a segmentação por diferença espectral.

A segmentação multirresolução, segundo Baatz e Schäpe (2000), é um algoritmo que, a partir de um conjunto inicial de objetos (os quais podem ser os pixels da imagem), agrupa pares de objetos adjacentes de acordo com o critério de homogeneidade definido pelo usuário. Esse critério é definido por uma combinação de homogeneidade espectral e de forma (medida da alteração da forma do objeto final em relação à forma dos objetos iniciais), e o usuário define o peso de cada uma delas no critério final. Também existem um parâmetro de escala, que define o menor tamanho final para os objetos que pode ser aceito pelo algoritmo, e um parâmetro de compacidade, que define o quão compacto, ou seja, qual razão perímetro/área um objeto final deve ter para ser aceito.

A segmentação por diferença espectral, de acordo com Trimble (2010), é um algoritmo que agrupa objetos de acordo com os valores médios dos pixels que compõem esses objetos. O usuário define um valor para a máxima diferença aceitável, e o algoritmo agrupa os objetos caso a diferença entre seus valores médios for menor do que o definido.

É importante salientar que qualquer atributo que pode ser quantificado para todos os objetos da imagem pode ser utilizado, e não apenas atributos espectrais. Neste trabalho, os valores de elevação dos MDE-SRTM e MDE-HAND foram utilizados na definição dos critérios de segmentação.

Recentemente vem aumentando o número de estudos realizados em geomorfologia com o uso da GEOBIA. Na maior parte deles, os autores desenvolveram estratégias semiautomatizadas para mapeamento geomorfológico com o uso da plataforma comercial de interpretação de imagens baseada em conhecimento, como, por exemplo, o eCognition (BENZ et al., 2004). A seguir, são destacados alguns exemplos de aplicação da GEOBIA em geomorfologia.

Por meio de modelos digitais de elevação extraídos de pares de fotografias aéreas de datas diferentes, Moore et al. (2003) identificaram as principais feições geomorfológicas da costa de Holderness, no noroeste de Inglaterra.

Desse modo, realizaram uma análise temporal dos processos erosivos, utilizando um sistema especialista com uma estrutura de conhecimento baseada em objeto.

Asselen e Seijmonsbergen (2006) empregaram segmentação multirresolução, GEOBIA e redes semânticas no mapeamento geomorfológico semi-automatizado da área de Montafon, Áustria. Foi segmentada uma carta de declividade gerada de um MDE obtido de dados LIDAR (resolução espacial de 1 m). O mapa obtido foi comparado a um mapa geomorfológico detalhado (em escala compatível) gerado por interpretação visual. As estatísticas apontaram adequada concordância entre os mapas.

Dragut e Blaschke (2006) também utilizaram segmentação multirresolução, GEOBIA e redes semânticas na classificação automática de elementos do relevo (*landform elements*). O objetivo desses autores foi mapear unidades geomorfométricas em duas regiões: uma porção da Planície Transilvaniânica na Romênia e uma área da parte alemã dos Alpes. Os resultados indicam adequada adaptação da metodologia em diferentes áreas e com diferentes tipos de dados (resolução espacial etc.).

Camargo et al. (2011) realizaram o mapeamento das unidades geomorfológicas do município de São José dos Campos utilizando segmentação multirresolução e redes semânticas, a partir de um MDE obtido de imagens estereoscópicas do sensor ASTER. Os autores concluíram que o MDE-ASTER é adequado para mapeamentos geomorfológicos em escala 1:50.000 e que a GEOBIA é uma metodologia adequada para a semi-automatização de procedimentos relacionados à cartografia geomorfológica.

Bertani et al. (2010) fizeram a diferenciação de lagos salinos e não salinos da região do Pantanal da Nhecolândia, utilizando segmentação multirresolução e regras de classificação baseadas em conhecimento, utilizando imagens do sensor ASTER. Os autores consideraram o método bastante eficaz, sendo que os maiores erros encontrados estão relacionados a lagos intermitentes em diferentes condições de seca.

Vale destacar ainda a aplicação de técnicas de análise de imagens baseada em objeto no estudo de desastres naturais relacionados ao relevo, como deslizamentos e voçorocas. Martha e Kerle (2012) desenvolveram uma metodologia de detecção de deslizamentos com base em imagens pancromáticas, realizando testes em uma região do Alto Himalaia. De acordo com os autores, essa metodologia permite a criação de um inventário de deslizamentos com o objetivo de identificar áreas suscetíveis a esse tipo de desastre.

Reginatto et al. (2012) elaboraram uma metodologia de mapeamento de áreas com risco de deslizamentos, utilizando dados de cartas topográficas e ASTER. Com base nessas fontes, os autores geraram um Modelo Digital de Terreno, mapas de declividade, solos, hidrografia e uso da terra da bacia do rio Cunha, localizado no município de Rio dos Cedros/SC, e fizeram uso do modelo computacional SHALSTAB (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998) para identificar áreas sujeitas a deslizamentos de terra.

Shruthi et al. (2012) utilizaram dados espectrais dos satélites Ikonos-2 e GeoEye-1 com um Modelo Digital de Superfície, gerado de imagens estereoscópicas do GeoEye-1, para mapear a localização e a extensão de voçorocas de três regiões teste do Marrocos. A combinação desses dados com técnicas de análise de imagens baseada em objeto permitiu aos autores identificar voçorocas de forma mais rápida e objetiva, em relação aos métodos de mapeamento tradicionais.

2.6. Avaliação da Classificação pelo Método Monte Carlo

O método de Monte Carlo foi originalmente concebido por John von Neumann, Stanislaw Ulam e Nicholas Metropolis. Eles calcularam a distância percorrida por nêutrons em diversos materiais com o objetivo de desenvolver proteções contra radiação, como parte dos trabalhos no Projeto Manhattan. (METROPOLIS, 1987).

Esse método consiste em realizar um grande número de experimentos com dados aleatórios para obter uma aproximação do valor real do resultado que se deseja conhecer. Uma análise pelo método de Monte Carlo é especialmente útil quando o processamento direto das equações necessárias para se obter o resultado desejado levaria uma quantidade proibitiva de tempo, ou superaria a capacidade de processamento disponível (METROPOLIS, 1987).

Melack et al. (2004), por exemplo, utilizaram o método de Monte Carlo para determinar as incertezas nas taxas de emissão de metano na bacia amazônica, a partir das estimativas de erro dos métodos utilizados para calcular as emissões. Os autores estimaram uma taxa de emissão de cerca de 22 TgC ao ano.

Aplicado a avaliação da classificação, esse método consiste em realizar um grande número de repetições (na ordem de milhares) do cálculo de um índice (o índice *Kappa*, por exemplo) de correspondência entre uma classificação e uma referência. Em cada uma dessas repetições é utilizada uma pequena amostra (em relação ao número total de pixels da imagem) escolhida aleatoriamente dentre os pixels da imagem, e a cada repetição uma nova amostra é escolhida, sempre com reposição, isto é, cada amostra é escolhida a partir do conjunto total de pixels. No método de Monte Carlo, quanto mais repetições forem realizadas, mais acurada será a estimativa do real valor do índice. Apesar de esse método demandar mais tempo e capacidade de processamento para ser realizado, é muito útil para avaliar classificações em relação a mapas de referência já existentes, pois permite uma escolha de pontos mais adequados para a verificação.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área definida para este estudo é o setor da planície de inundação do rio Solimões/Amazonas, entre as longitudes 71° W e 54° W, e as latitudes 1°20' N e 4°40' S. Essa área é um recorte daquela estudada por Hess et al. (2003). Esse recorte foi necessário para aplicar os algoritmos de segmentação de uma vez só para toda a área e, dessa forma, evitar erros de classificação nas junções entre faixas.

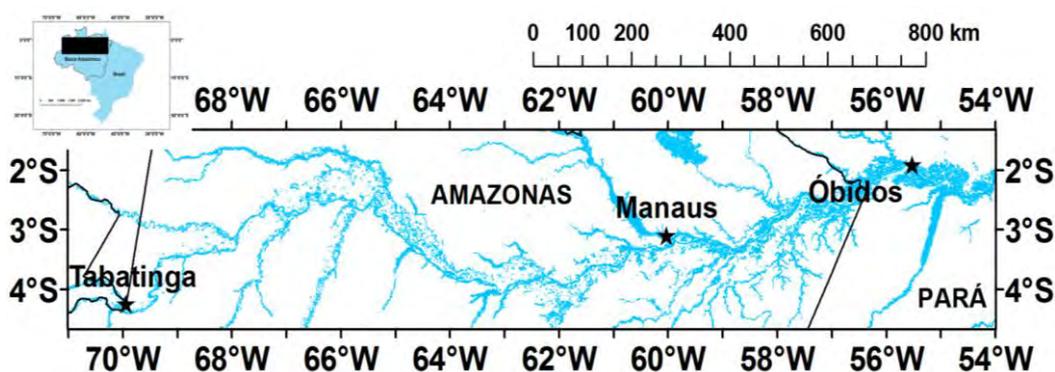


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

Apesar das controvérsias que envolvem a história geológica da bacia amazônica (CAMPBELL et al., 2006), há certo consenso de que a geomorfologia da planície de inundação do rio Amazonas e de seus principais tributários responde a forças tectônicas e climáticas (LATRUBESSE; FRANZINELLI, 2002, 2005) que vem agindo desde o final do Pleistoceno e do Holoceno. A geomorfologia da planície de inundação amazônica está relacionada também às mudanças climáticas e às flutuações do nível eustático do mar durante o Quaternário. Estas flutuações suportam a hipótese que durante a estabilização do nível do mar em uma cota mais alta, cerca de seis mil anos atrás, a foz de muitos tributários do rio Amazonas foi afogada, dando origem às rias (STERNBERG, 1987).

No presente, o rio Amazonas e seus tributários remodelam ativamente sua planície de inundação. O curso principal do Solimões/Amazonas recebe águas com alto teor de sedimentos dos Andes, o qual é responsável por grande parte

da carga de sedimentos transportada pela bacia (MERTES et al., 1996). As inundações são os fatores dominantes no desenvolvimento da topografia da planície de inundação. Em rios deposicionais, tais como o Solimões/Amazonas características das inundações, como frequência, velocidade de fluxo, período e concentração da inundação, e características de deposição da carga são responsáveis pela destinação final dos sedimentos e pelas características dos solos da planície de inundação.

De acordo com Teixeira et al. (2007), existem duas classes principais de solos na planície de inundação do Amazonas, os gleissolos e os neossolos flúvicos. Esses solos se caracterizam por ser pouco estruturados e pelos altos teores de silte e areia em sua composição, sendo dessa forma mais suscetíveis aos processos erosivos. O “fenômeno das terras caídas”, ou seja, o desbarrancamento dos solos das margens dos rios é o maior responsável pelas perdas por erosão desses solos na região da planície.

A planície de inundação do Solimões/Amazonas é caracterizada pelo grande número de lagos de diferentes formatos e tamanhos. Sippel et al. (1992), explorando uma área de aproximadamente 92.000 km² do canal principal do rio Amazonas, encontraram 6.510 lagos de pelo menos 100 m de comprimento. Mertes et al. (1996) identificaram tipos de planície de inundação representativos no Amazonas, usando o formato dos lagos e seu tamanho como critério de classificação.

De Vargem Grande a Jutica, o gradiente do canal aumenta ligeiramente provocando a erosão e provavelmente uma acentuada sinuosidade do rio nesse setor. Como resultado da rápida migração do canal, os lagos são pequenos, estreitos e alongados (MERTES et. al., 1996).

No trecho do Rio Amazonas entre Itapeuá e São José do Amatari, observa-se uma transição das feições características dos setores à montante e à jusante. Nesse setor intermediário o rio torna-se mais reto, e seu vale, mais estreito; a migração do canal é lenta; a proporção da área da planície coberta pelas barras de acreção é menor, e as ilhas são ligeiramente mais largas. Nele, lagos

estreitos e alongados misturam-se com lagos grandes arredondados. À medida que o gradiente do rio decresce, ocorre uma regular e constante deposição de areia (MERTES et. al., 1996).

Na porção de São José do Amajari até a confluência do rio Tapajós, o rio Amazonas é relativamente reto, comparado aos setores à montante (MERTES et. al., 1996), e migra lentamente. Nesse setor, as superfícies das barras de acréscimos não são bem definidas e centenas de lagos extensos e rasos ocupam a planície de inundação. Estas feições indicam que a formação da planície de inundação é controlada por depósitos de material fino do canal principal, os quais constroem diques que tendem a confinar a migração deste canal e dos canais da planície (MERTES et. al., 1996).

Em seu trecho final, da confluência do Tapajós ao estuário, o rio Amazonas é retilíneo (encaixado) e o número de lagos decresce drasticamente. A deposição de 300-400 Mt/ano de sedimentos nesse setor pode ser responsável pelo rápido preenchimento dos lagos em formação (MERTES et. al., 1996).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material

Neste trabalho, a rede semântica utilizada no processo de classificação foi construída a partir dos dados MDE-SRTM da área de estudo. Desses dados, foram gerados o MDE-HAND e as imagens declividade e curvatura da área de estudo. O recorte do MDE-SRTM utilizado é formado de 19.202 x 3.998 pixels, o que corresponde a uma área total de aproximadamente 621.800 km².

Também foi utilizado o mosaico TM-Landsat da bacia amazônica elaborado por Shimabukuro et. al. (2002) e o mapa de localização das estações fluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Esses dados foram utilizados como apoio em diversos procedimentos realizados neste trabalho, mas não diretamente na criação da rede semântica.

Para validar o resultado da classificação da área de estudo, foi utilizado o mapa das áreas alagáveis da planície de inundação da bacia amazônica gerado por Hess et. al. (2003) a partir de dados JERS-1. Como nesse mapa a rede de drenagem não foi mapeada de forma separada das áreas alagadas, foi utilizado para essa finalidade também o SRTM Water Body Dataset (SWBD, Farr et al., 2007). Desse modo, o mapa de referência considerado nesta pesquisa é uma combinação dessas duas fontes de dados.

4.2. Métodos

A Figura 4.1 mostra o fluxograma dos procedimentos realizados neste trabalho, detalhados a seguir.

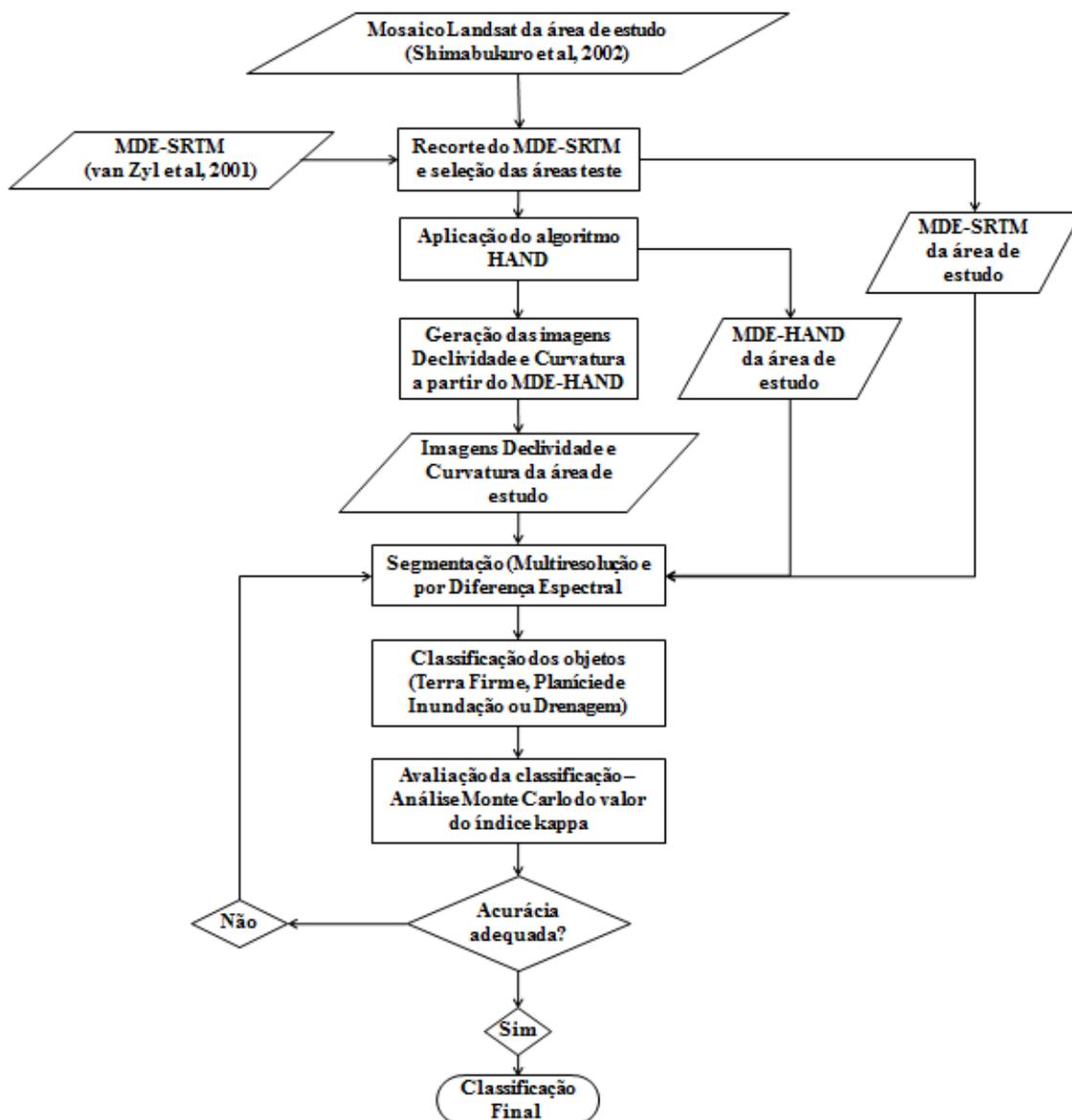


Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos

4.2.1. Recorte do MDE-SRTM e Seleção das Áreas Teste

O recorte da área de estudo foi realizado na base de dados do MDE-SRTM da bacia amazônica. Dentro desse recorte, foram selecionadas seis áreas-teste ao longo do curso do rio Amazonas, visando aplicar vários testes para a geração final da rede semântica. Para essas áreas amostrais foi atribuído o mesmo nome da estação fluviométrica (sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas - ANA) localizada dentro de cada uma delas. A Figura 4.2 mostra a localização das áreas-teste.

Essas áreas amostrais foram utilizadas apenas durante a fase de testes da rede semântica. Para a avaliação da classificação com o método de Monte Carlo, explicada na Seção 4.2.4, foram selecionadas amostras da área de estudo (completa) classificada, com a mesma extensão dos recortes das áreas-teste, a fim de garantir que não existam diferenças de processamento entre elas.

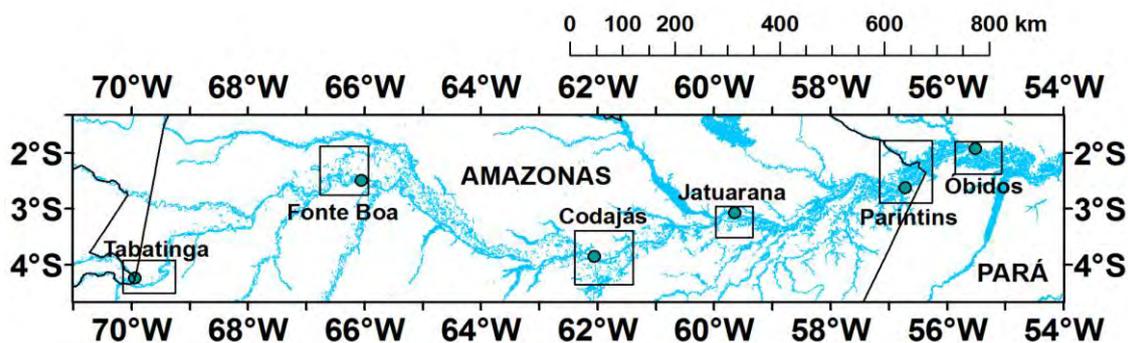


Figura 4.2 – Localização das áreas-teste

4.2.2. Geração do MDE-HAND e das Grades Declividade e Curvatura

A partir do recorte do MDE-SRTM da área de estudo, foi preparado o MDE-HAND, de acordo com o procedimento definido por Rennó et al. (2008). Esse procedimento requer a intervenção do usuário apenas na escolha do limiar de área de contribuição mínima, para considerar uma célula do MDE como pertencente à rede de drenagem. Esse limiar deve ser escolhido de forma a minimizar dois tipos de erro na representação da rede de drenagem: não representar trechos da drenagem real, pela escolha de um limiar muito alto; e criar trechos que não existem na realidade, por se optar por um limiar muito baixo.

Desse modo, o valor definido para o limiar foi de 5.000 células, o que corresponde a uma área de aproximadamente 40,5 km². Esse valor se mostrou o mais adequado durante os testes, apresentando um equilíbrio entre não detectar os cursos das porções mais à montante da área de estudo, e criar drenagens inexistentes nos setores mais à jusante. Idealmente, diferentes

limiares deveriam ser utilizados para os diferentes setores da área de estudo. Entretanto, isso não é permitido pela versão atual do HAND.

Para gerar o MDE-HAND, foi utilizado o plugin TerraHidro para o programa TerraView. É importante ressaltar a correção do MDE-SRTM implementada no TerraHidro, necessária para a remoção de depressões e áreas planas artificiais, criadas pelo processo de interpolação realizado na geração desse MDE (ROSIM et al., 2003). Essa correção faz com que todo o fluxo da rede de drenagem se concentre em cursos com uma célula de largura.

No caso de grandes rios como o Amazonas, com largura de várias células na escala na qual foi realizado o SRTM, a concentração do fluxo gerada pelo processo de correção cria distorções na real forma da rede de drenagem, o que resulta na geração de fluxos com uma célula de largura. Para contornar esse problema, dois MDE-HAND da área de estudo foram gerados: o primeiro seguindo o procedimento recomendado por Rosim et al. (2003), utilizando a correção para a remoção de depressões e áreas planas artificiais, e o segundo sem essa correção. A partir do segundo MDE-HAND, foi criada uma máscara da rede de drenagem dos grandes cursos. Essa máscara foi aplicada no primeiro MDE, para conseguir um modelo com a rede de drenagem sem essa redução do tamanho do canal.

A partir do MDE-HAND, foram geradas, no ArcGIS, as grades declividade e curvatura da área de estudo. O procedimento para isso está disponível na caixa de ferramentas Spatial Analysis. O único requisito, porém, é que o MDE utilizado como entrada de dados possua o mesmo datum horizontal e vertical. Neste trabalho, foi adotado o datum WGS-84.

A combinação dos dados de altura, declividade e curvatura permite a separação das classes de interesse desta pesquisa no processo de segmentação. Apenas com o MDE-HAND, é possível perceber visualmente a transição das áreas inundáveis para as não inundáveis. Entretanto, essas classes são mais facilmente separadas quando a declividade é adicionada ao conjunto de dados disponíveis na aplicação do algoritmo de segmentação

multiresolução. A Figura 4.3 mostra um recorte do MDE-HAND da área de Óbidos, com linhas verdes destacando as fronteiras entre as classes.

Na imagem, mostrada na Figura 4.4, a rede de drenagem tem uma textura lisa, enquanto o restante da área apresenta uma textura muito rugosa. Isso ocorre porque no MDE-HAND e, conseqüentemente, na grade curvatura todos os pixels referentes a rede de drenagem tem altura zero, exceto aqueles que formam a fronteira da drenagem. Isso também ocorre na grade declividade, mas o intervalo de valores é menor, o que dificulta a classificação da rede de drenagem. Por isso, optou-se pelo uso da variável curvatura para mapear a rede de drenagem.

A diferença de textura entre os objetos que fazem parte da rede de drenagem e os que não fazem é facilmente detectada pelo algoritmo de segmentação multiresolução. Isso possibilita agrupar a rede de drenagem em um pequeno número de objetos (exceto pelos corpos de água que não estão conectados a rede de drenagem).

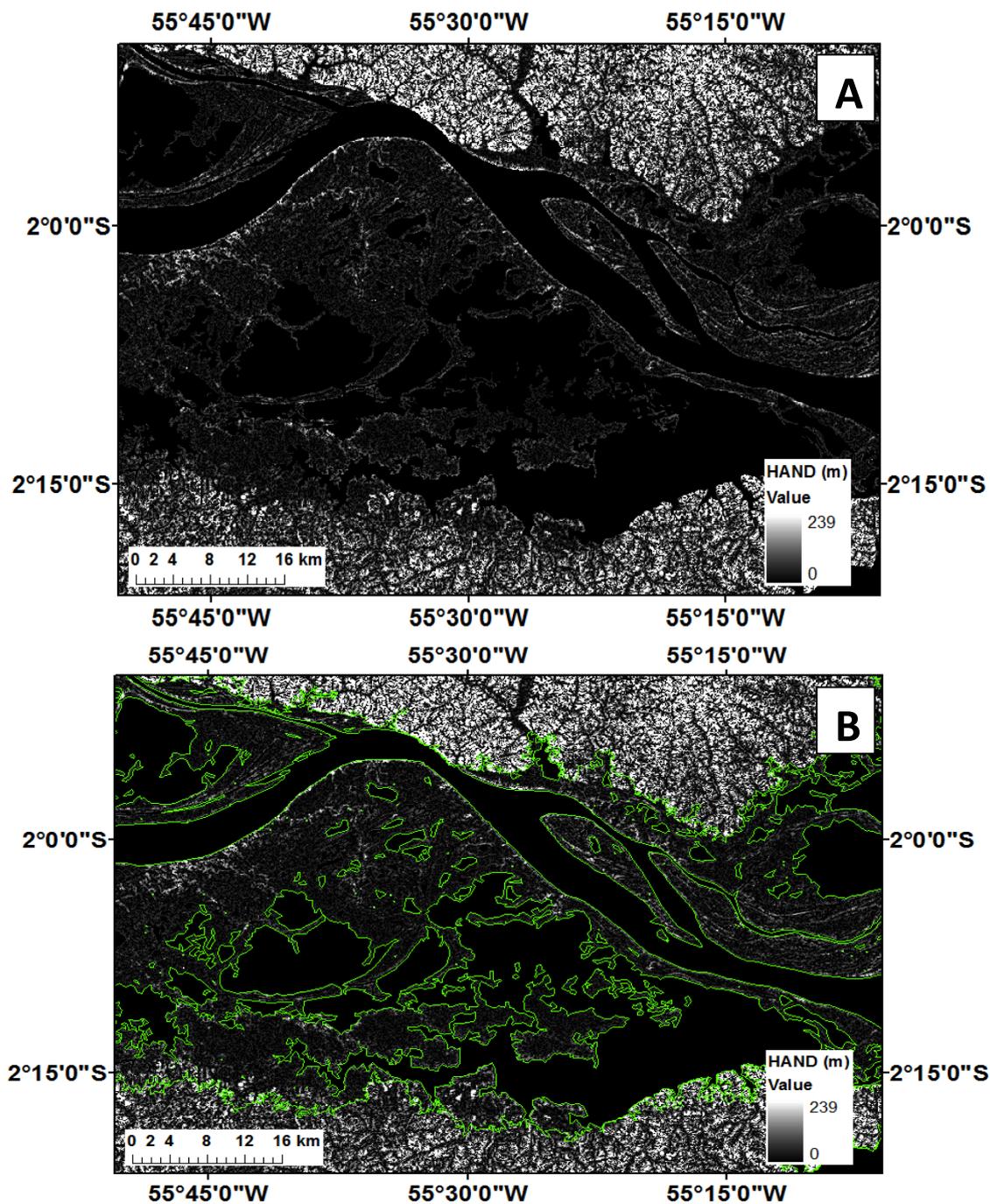


Figura 4.3 – A: Imagem do MDE-HAND de Óbidos. B: Mesma imagem de A, com as transições entre classes, de acordo com o mapa de referência, destacadas com linhas verdes.

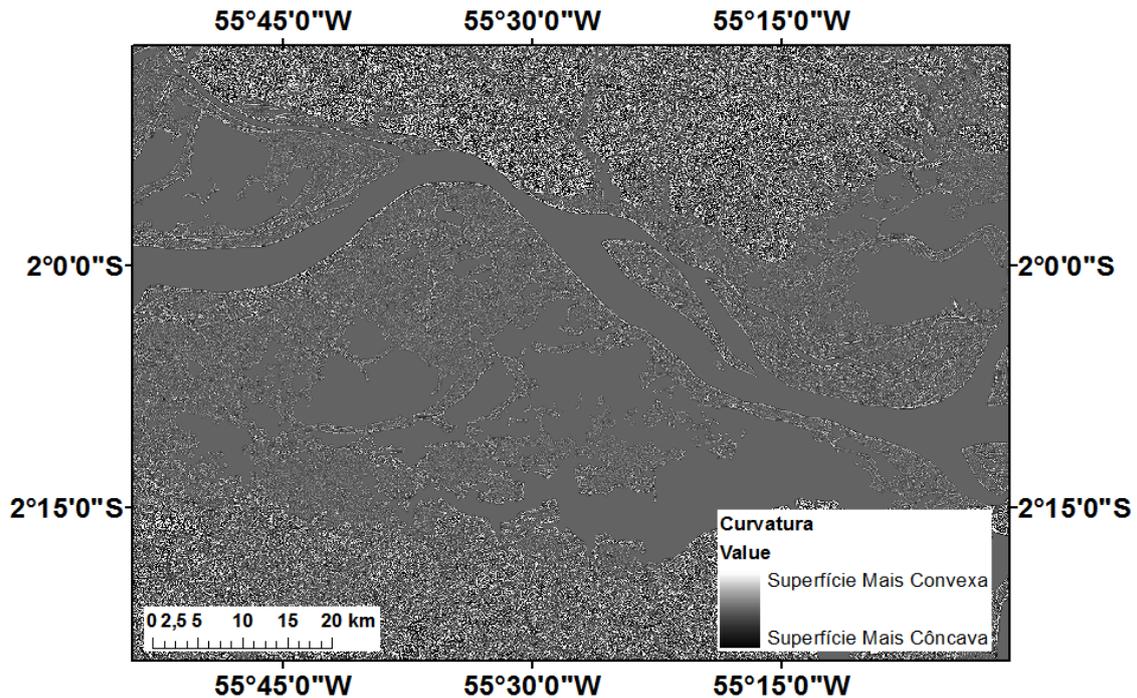


Figura 4.4 – Imagem curvatura da área de Óbidos.

4.2.3. Criação da Rede Semântica

A rede semântica utilizada para obter a classificação final foi baseada em dois níveis de segmentação, o primeiro criado com o algoritmo de segmentação multirresolução, e o segundo, com algoritmo de segmentação por diferença espectral. As variáveis e os parâmetros utilizados na aplicação desses algoritmos são mostrados na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Variáveis, parâmetros e tipos de segmentação utilizados.

O valor de cada parâmetro foi determinado através de testes de segmentação nas áreas amostrais. Os resultados foram analisados visualmente para verificar a homogeneidade dos objetos e minimizar o número total de objetos, visando diminuir o tempo de processamento e o gasto de memória.

Foram definidas três classes para o mapeamento da área de estudo:

- Terra Firme: São as áreas não inundadas mesmo durante o período de cheia.
- Planície de Inundação: São as áreas alagáveis durante o período da cheia, porém não necessariamente inundadas durante todo o ano.
- Drenagem: Os rios e lagos (água aberta) que podem ser identificados no MDE-SRTM.

Além dessas, foram definidas as seguintes classes auxiliares:

- Sem Dados: São as regiões nas bordas da área de estudo formadas de microbacias incompletas, não conectadas com o resto da rede de drenagem. Nessas regiões, o HAND retorna o valor -9.999 por não ser capaz de realizar os cálculos.
- Terreno: Classe complementar a Sem Dados, serve para indicar as áreas com valores válidos para a classificação.
- Não Drenagem: Classe complementar à Drenagem, composta pelas classes Terra Firme e Planície de Inundação.

As classes auxiliares Terreno e Não Drenagem tiveram também a função de indicar erros na definição dos atributos, visto que nenhum objeto deve pertencer a essas classes ao final do processo de classificação, caso este seja executado corretamente.

Essas seis classes foram estruturadas na forma de uma árvore hierárquica, como mostrado na Figura 4.6. Na árvore também estão descritos os atributos utilizados para a definição dos objetos pertencentes a cada classe.

Hierarquia de Classes

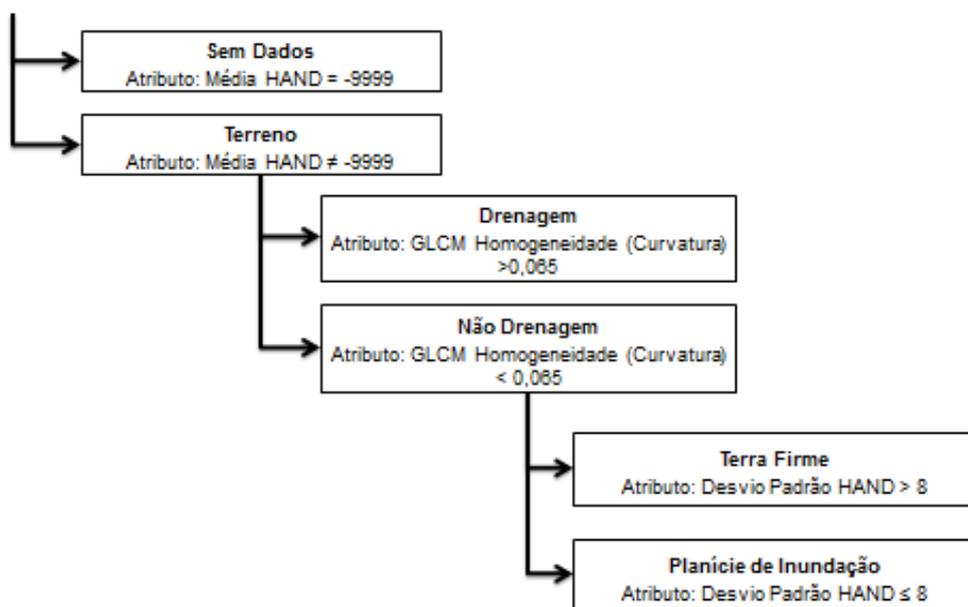


Figura 4.6 – Hierarquia das classes e seus atributos para classificação.

Os parâmetros de cada atributo utilizado no processo de classificação foram determinados através dos testes nas áreas amostrais e avaliados visualmente. Neste trabalho, não foram explorados atributos fuzzy, devido à necessidade de capacidade de processamento ainda maior demandada por esses atributos.

A árvore hierárquica de classificação apresenta três nós de decisão os quais definem à qual classe cada objeto pertence. No primeiro nó, são separados os objetos da classe Sem Dados dos outros objetos, que são classificados como Terreno e passam ao próximo nó da árvore. Essa separação é realizada com o atributo Média do MDE-HAND dos pixels pertencentes a cada objeto, uma vez que somente nas regiões onde o HAND não é capaz de realizar os cálculos existem pixels com valor -9.999.

O segundo nó da árvore realiza, a partir dos objetos da classe Terreno, a separação entre as classes Drenagem e Não Drenagem. Inicialmente, foram realizados testes com o atributo Média do MDE-HAND, pois teoricamente todos

os objetos da classe Drenagem deveriam apresentar valor zero para este atributo. Entretanto, os erros do MDE-SRTM e as dificuldades de se estabelecer um limiar de área de contribuição mínima que seja ideal para toda a área de estudo, fazem com que áreas pertencentes à rede de drenagem fiquem com valor do MDE-HAND acima de zero. Apesar disso, é possível diferenciar essas áreas pela textura. Por se tratar de corpos de água, elas são muito mais planas do que o entorno, e dessa forma sua textura, especialmente na imagem curvatura, é menos rugosa do que a dos objetos das outras classes.

O terceiro e último nó da árvore hierárquica classifica os objetos da classe Não Drenagem como Terra Firme ou Planície de Inundação. Para a separação dessas classes foi escolhido o atributo Desvio Padrão do MDE-HAND. A escolha deste atributo foi realizada com base na avaliação de diagramas de dispersão dos seus valores. Observou-se que os objetos pertencentes à classe Terra Firme apresentavam desvios padrão mais altos em relação aos objetos da classe Planície de Inundação. Essa diferença pode ser devida aos processos erosivos diferenciados que áreas regularmente alagadas sofrem, fazendo com que essas áreas possuam um relevo mais suave em comparação às regiões que não são afetadas pelas inundações.

O atributo Média do MDE-SRTM também se mostrou útil para a separação das classes Planície de Inundação e Terra Firme. Porém, não foi possível definir um parâmetro único para toda a área de estudo que permitisse obter bons resultados.

Adicionalmente, foram utilizados dois processos de classificação para correção de erros. O primeiro reclassifica como Terra Firme um objeto das classes Planície de Inundação ou Drenagem, caso este objeto possua menos de 500 pixels e esteja totalmente cercado por objetos classificados como Terra Firme. O segundo procedimento reclassifica como Planície de Inundação um objeto da classe Terra Firme caso ele possua menos de 100 pixels e esteja totalmente cercado por objetos da classe Planície de Inundação.

A finalidade desses dois procedimentos de reclassificação é eliminar pequenos objetos, considerando a escala da área de estudo, que estejam totalmente cercados por outra classe, resultantes, provavelmente, de erro de classificação. Sem eles, o mapa gerado apresentaria pequenas áreas classificadas como planície de inundação, cercadas por terra firme e vice versa, criando um efeito de salpicamento que prejudica o resultado final.

Para as áreas-teste de Tabatinga, Codajás e Óbidos foi realizado um experimento adicional, visando ao aprimoramento da rede semântica para aplicá-la em áreas de estudo com características particulares. Para essa nova classificação, o critério de atribuição de um objeto como Terra Firme ou Planície de Inundação foi mudado de Desvio Padrão do MDE-HAND para Média do MDE-SRTM, sendo designado um valor diferente para cada área-teste. A árvore hierárquica modificada é mostrada na Figura 4.7.

Hierarquia de Classes

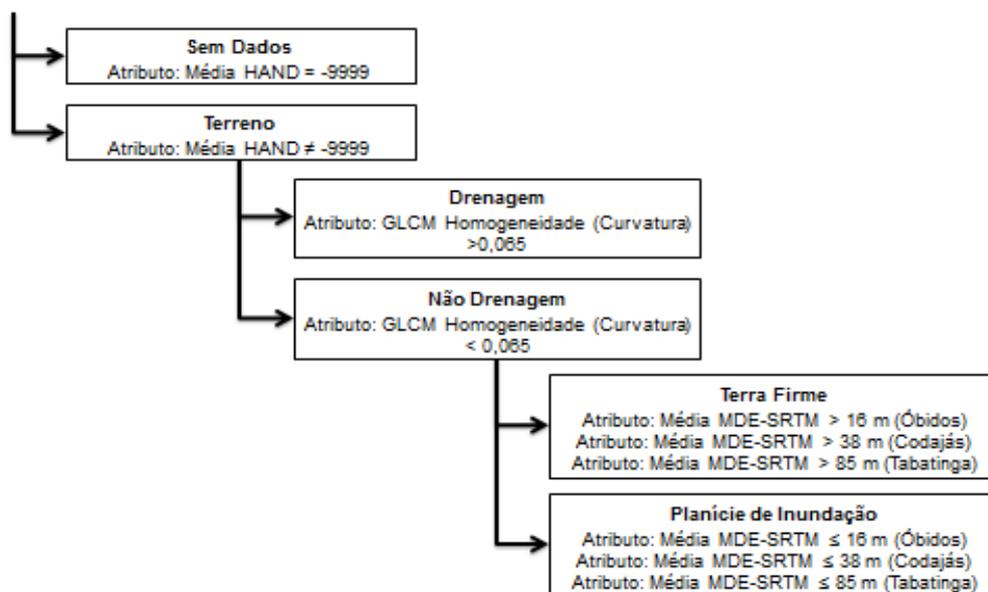


Figura 4.7 – Hierarquia das classes e seus atributos para classificação no experimento aplicado para Tabatinga, Codajás e Óbidos.

4.2.4. Avaliação da Classificação com o Método de Monte Carlo

Para realizar a validação da classificação final, foram adotados dois procedimentos de avaliação baseados no cálculo do índice *Kappa*. Primeiramente, foram selecionados 50.000 pixels de cada classe definida para a classificação final (Terra Firme, Planície de Inundação e Drenagem) com o auxílio do gerador de amostras aleatórias disponível no ENVI (ITT Visual Information Solutions, 2009). Esses pixels foram coletados de toda a área de estudo, com o objetivo de estabelecer um panorama geral da correspondência entre a classificação e o mapa de referência utilizado.

Para uma análise mais detalhada, foi calculado o valor do índice *Kappa* pelo método Monte Carlo da classificação final de cada área-teste. Nessa análise, foi definido como tamanho da amostra 150 pixels para cada classe, 450 no total, e 5.000 repetições do cálculo do índice *Kappa*. Desse conjunto de 5.000 valores, é determinado um intervalo de credibilidade de 95%, isto é, são descartados os 2,5% maiores e os 2,5% menores valores obtidos.

Esses valores foram definidos buscando utilizar o maior conjunto de amostras possível e mantendo o tempo total aceitável para o processamento da análise, (cerca de 7-10 horas para cada área-teste), com o equipamento utilizado. Esse método não pode ser utilizado para toda a área de estudo, devido à grande quantidade de pixels da imagem.

Os dois métodos foram aplicados utilizando como referência o mapa produzido por Hess et al. (2003). O SWBD foi combinado a esse mapa como referência para a classe Drenagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa das áreas alagáveis da planície de inundação do rio Amazonas, obtido a partir dos dados e técnicas utilizados neste trabalho, é mostrado na Figura 5.1. O valor de *Kappa*, calculado a partir das amostras de 50.000 pixels e utilizando como referência o mapa de Hess et al. (2003), foi de 0,711. Esse resultado é aceitável, considerando-se o tempo empregado, a simplicidade do método utilizado e a variação de ambientes da área de estudo, e a possibilidade de se evitar árvores de decisão e hierarquias de classe de alta complexidade.

Contudo, é importante salientar os aspectos que podem ter impedido obter uma correspondência maior entre os resultados da classificação e o mapa de referência. O método de classificação utilizado pode ser aperfeiçoado, visto que a drenagem e planície de inundação dos afluentes de menor porte tendem a ser classificadas como Terra Firme. Possivelmente, isso ocorre por não apresentarem diferenças tão marcantes em relação às áreas não inundáveis do entorno.

No caso de rios de porte muito pequeno, com largura inferior à resolução espacial do MDE-SRTM, de 90 m aproximadamente, também existe essa dificuldade de classificação. Deste modo, somente com o uso de um MDE com melhor resolução espacial isso poderia ser solucionado. Um exemplo desse problema, encontrado na região próxima à Parintins, é mostrado na Figura 5.2.

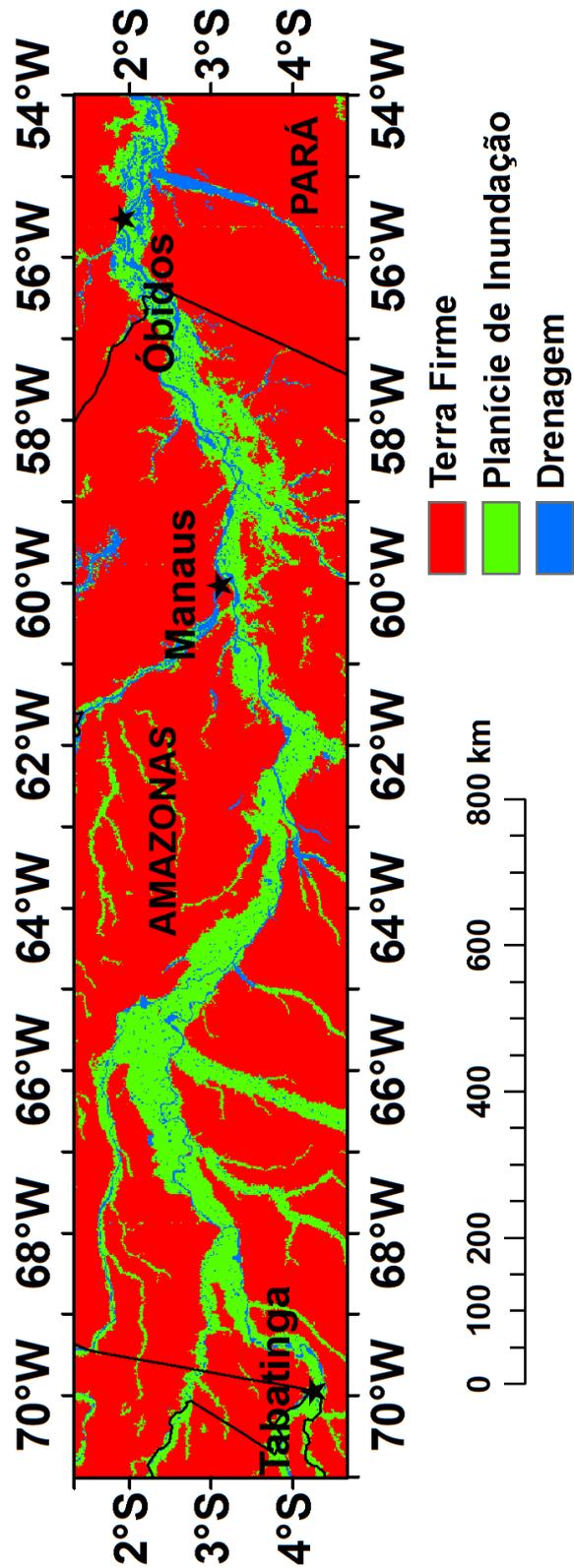


Figura 5.1 – Mapa da planície de inundação do rio Amazonas gerado da classificação baseada em objeto.

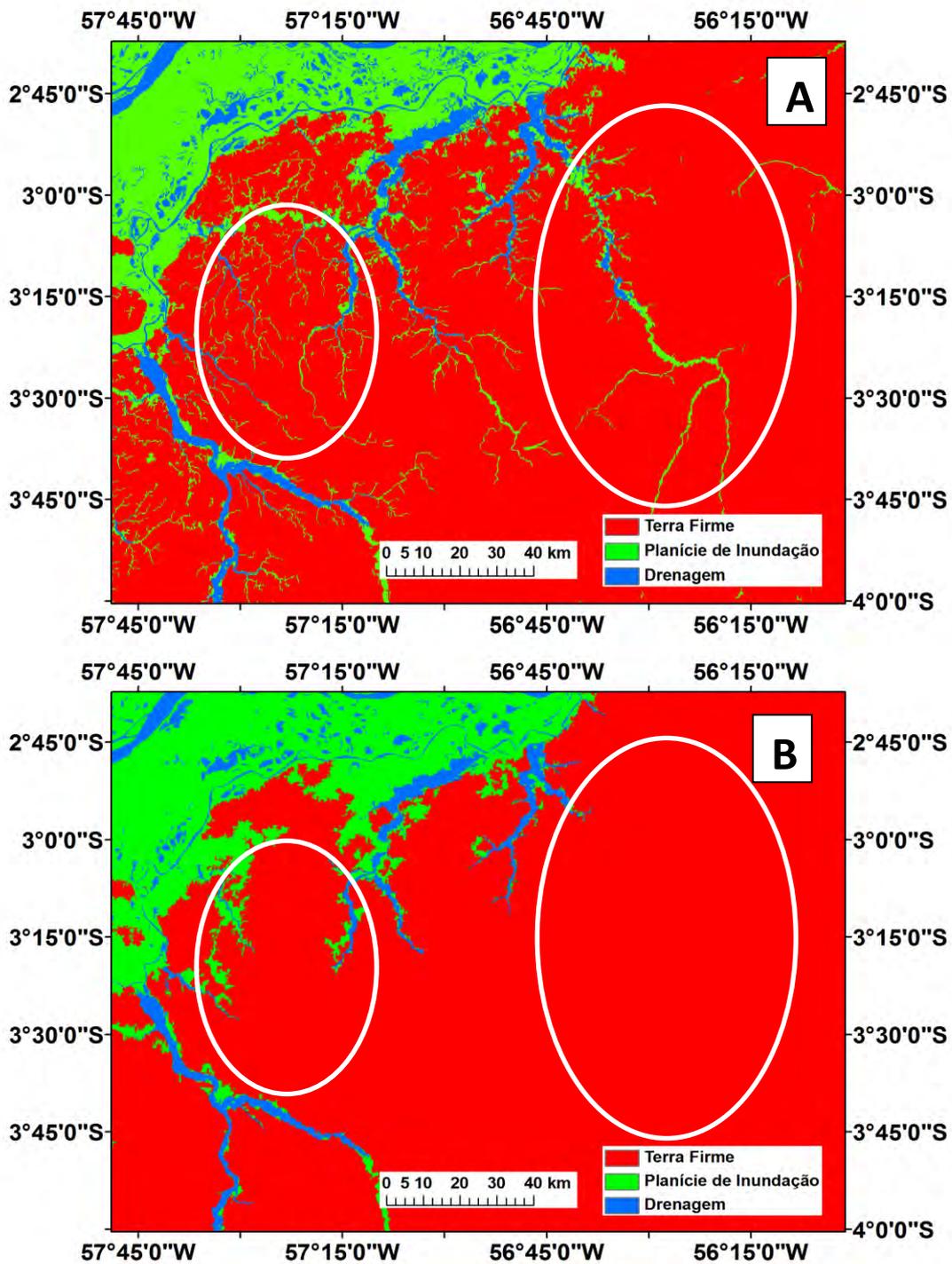


Figura 5.2 – Erros de classificação em afluentes de pequeno porte (exemplos em destaque). A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Classificação gerada neste trabalho.

A não classificação dos cursos de menor porte e sua planície de inundação corretamente deveu-se também aos procedimentos de correção, que eliminam

pequenas áreas de planície de inundação e de drenagem se estas forem totalmente cercadas por áreas de terra firme. Entretanto, a não utilização dos procedimentos de correção resulta em problemas ainda maiores com pequenas áreas erroneamente classificadas. Isso pode ser observado no mapa da área-teste de Jatuarana, apresentado na Figura 5.3.

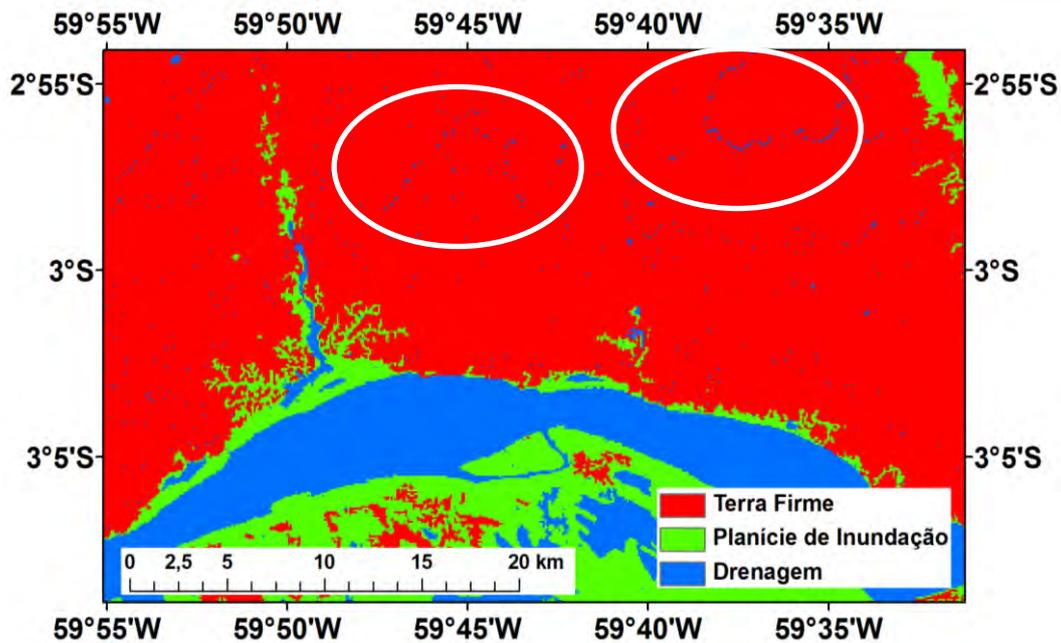


Figura 5.3 – Classificação gerada sem os procedimentos de correção. Em destaque: exemplos de erros de classificação de pequenos objetos da imagem.

O MDE-SRTM foi outra fonte de erros de classificação. Existem vários ruídos nesses dados da área de estudo, como exemplificado no MDE do setor próximo a confluência do rio Tapajós com o Amazonas, na Figura 5.4. Esse tipo de ruído, caracterizado por um padrão de listras no sentido oeste-leste, é mais comum nas áreas de drenagem, causando confusão entre as classes Drenagem e Planície de Inundação.

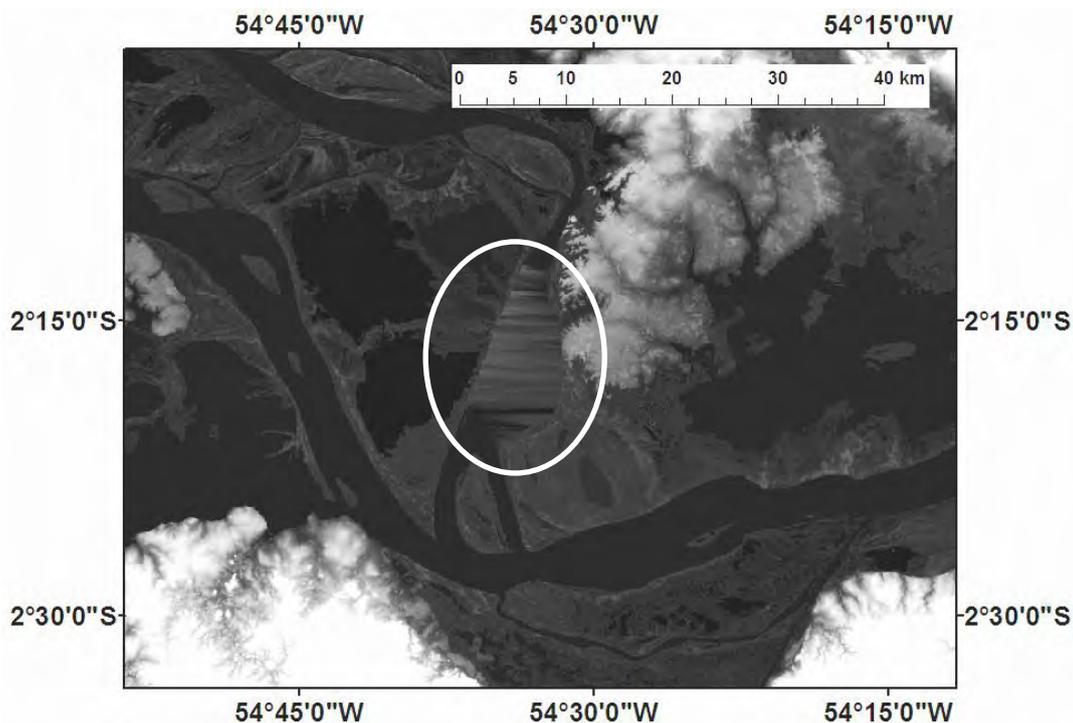


Figura 5.4 – Exemplo de ruído no MDE-SRTM de um setor próximo a confluência do rio Tapajós com o Amazonas, destacado pela elipse.

Outro problema detectado no MDE-SRTM foi a não representação de algumas ilhas fluviais no curso do Amazonas, as quais constam no mapa de drenagem do SWBD. Isso pode ser explicado por problemas do sensor ou época do ano na aquisição dos dados. Neste último caso, é provável que as ilhas estivessem totalmente inundadas no momento que a missão foi realizada (fevereiro de 2000).

Dessa forma, existem diversas áreas classificadas como drenagem no curso principal, mas mapeadas como parte das áreas alagáveis no mapa de referência, impactando negativamente os valores dos índices *Kappa* calculados para as classificações. A Figura 5.5 mostra um exemplo de ilhas fluviais representadas no mapa de referência, mas não no MDE-SRTM, na área próxima à confluência do rio Juruá com o Solimões.

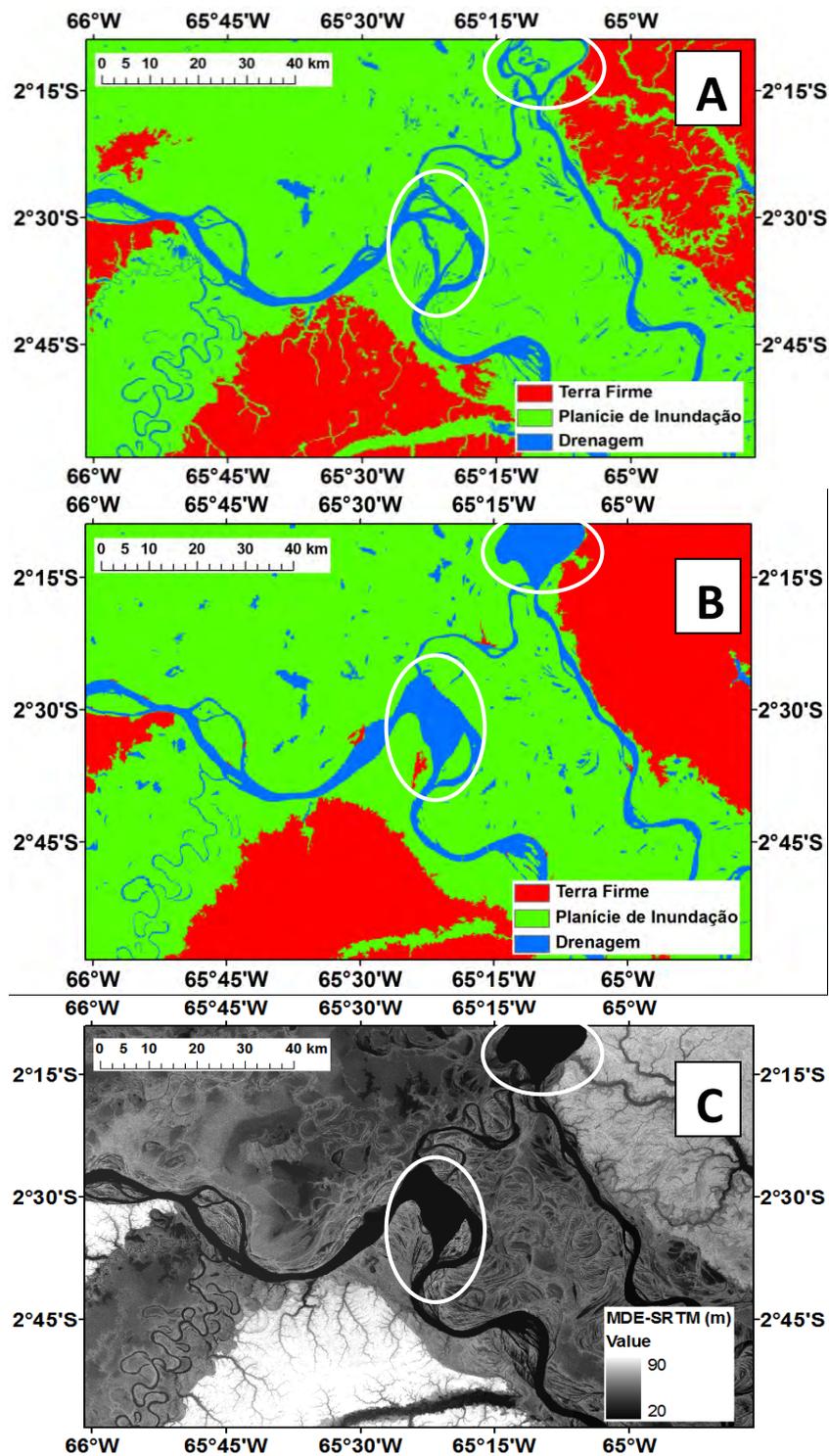


Figura 5.5 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003), B: Mapa resultante da classificação e C: MDE-SRTM da área próxima à foz do rio Juruá. As áreas destacadas são ilhas fluviais representadas no mapa de referência, mas não no MDE-SRTM e, conseqüentemente, nem no mapa gerado.

Foi difícil também, como era de se esperar, estabelecer o parâmetro de área mínima de acumulação de fluxo necessário para a elaboração do MDE-HAND. Isto, porque é praticamente impossível definir um valor único que seja adequado para toda a área de estudo. Desse modo, ao estabelecer este parâmetro, procurou-se um equilíbrio entre não deixar de mapear corretamente os afluentes com pequenos fluxos e gerar cursos que na realidade não existem.

Apesar desses problemas, a análise dos índices *Kappa*, obtidos pelo método Monte Carlo, mostra que para as áreas-teste existe maior correspondência entre o resultado da classificação realizada e o mapa de referência. Os intervalos de credibilidade de 95% para os valores de *Kappa* e os menores e os maiores valores encontrados são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Índices *Kappa* obtidos pelo método Monte Carlo para as áreas-teste

Área Teste	Valores de <i>Kappa</i> em relação ao mapa de Hess et al. (2003)		
	Intervalo de credibilidade (95%)	<i>Kappa</i> mínimo	<i>Kappa</i> máximo
Tabatinga	0,757 – 0,850	0,723	0,907
Fonte Boa	0,760 – 0,850	0,710	0,880
Codajás	0,630 – 0,740	0,587	0,773
Jatuarana	0,703 – 0,807	0,667	0,843
Parintins	0,727 – 0,823	0,677	0,850
Óbidos	0,810 – 0,893	0,770	0,923

Os melhores resultados foram obtidos para a área-teste da região de Óbidos (Figura 5.6). Isso pode ser explicado pelos poucos afluentes de pequeno porte nesse setor, em comparação a outras regiões da área de estudo. Além disso, o curso do rio e a planície de inundação são mais retilíneos, ou seja, com menos variação do curso devido a processos erosivos e deposicionais.

Também contribuiu para a maior correspondência entre o mapa gerado e o de referência de Hess et al. (2003), o desnível altimétrico mais acentuado no contato entre a planície de Inundação e o terraço (Terra Firme). Esse desnível é superior a 10 m na maior parte do limite entre Planície de Inundação e Terra

Firme, e frequentemente superior a 20 m. Devido a isso, poucos objetos são formados por misturas de Planície de Inundação e de Terra Firme, minimizando erros de classificação.

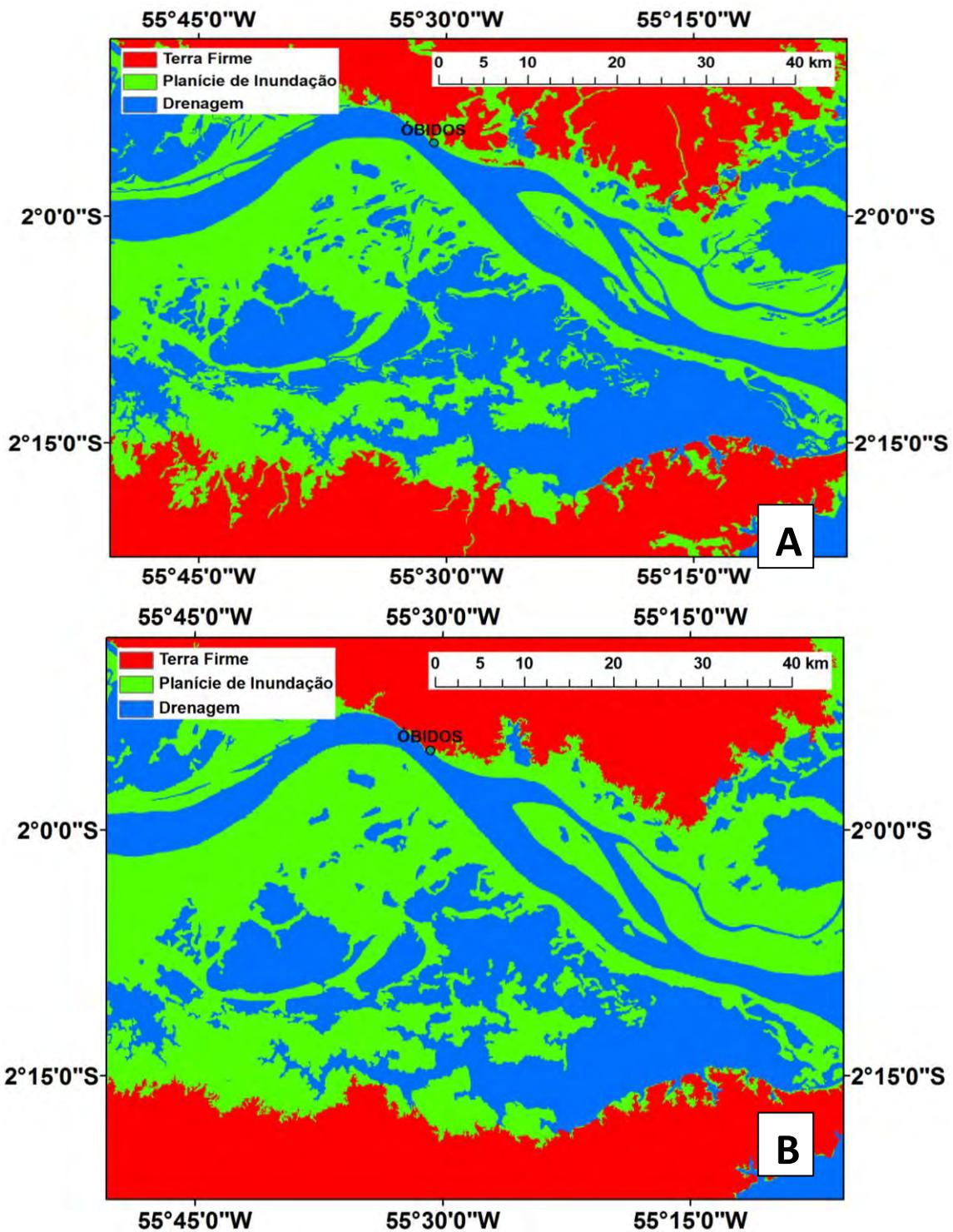


Figura 5.6 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Mapa obtido da Classificação da área-teste de Óbidos.

Para a área-teste de Codajás, mostrada na Figura 5.7, foram obtidos os menores valores de índice *Kappa*, com um intervalo de credibilidade (95%) de 0,630-0,740. Esse resultado pode ser explicado pela grande concentração de pequenos afluentes nessa área; pelos limites entre Planície de Inundação e Terra Firme, muito mais recortados do que em Óbidos; pela pequena diferença de altura (cerca de 5 m) em grande parte da fronteira Terra Firme/Planície de Inundação. Essas características dificultam a definição de objetos e aumentam os erros de classificação.

Além disso, o MDE-SRTM da área-teste de Codajás tem ruídos e ilhas não-representadas, como indicado na Figura 5.7. Para minimizar ou solucionar esses problemas, que comprometem a classificação, seria necessário utilizar dados de outras fontes, por exemplo, um MDE criado a partir de imagens do sensor ASTER.

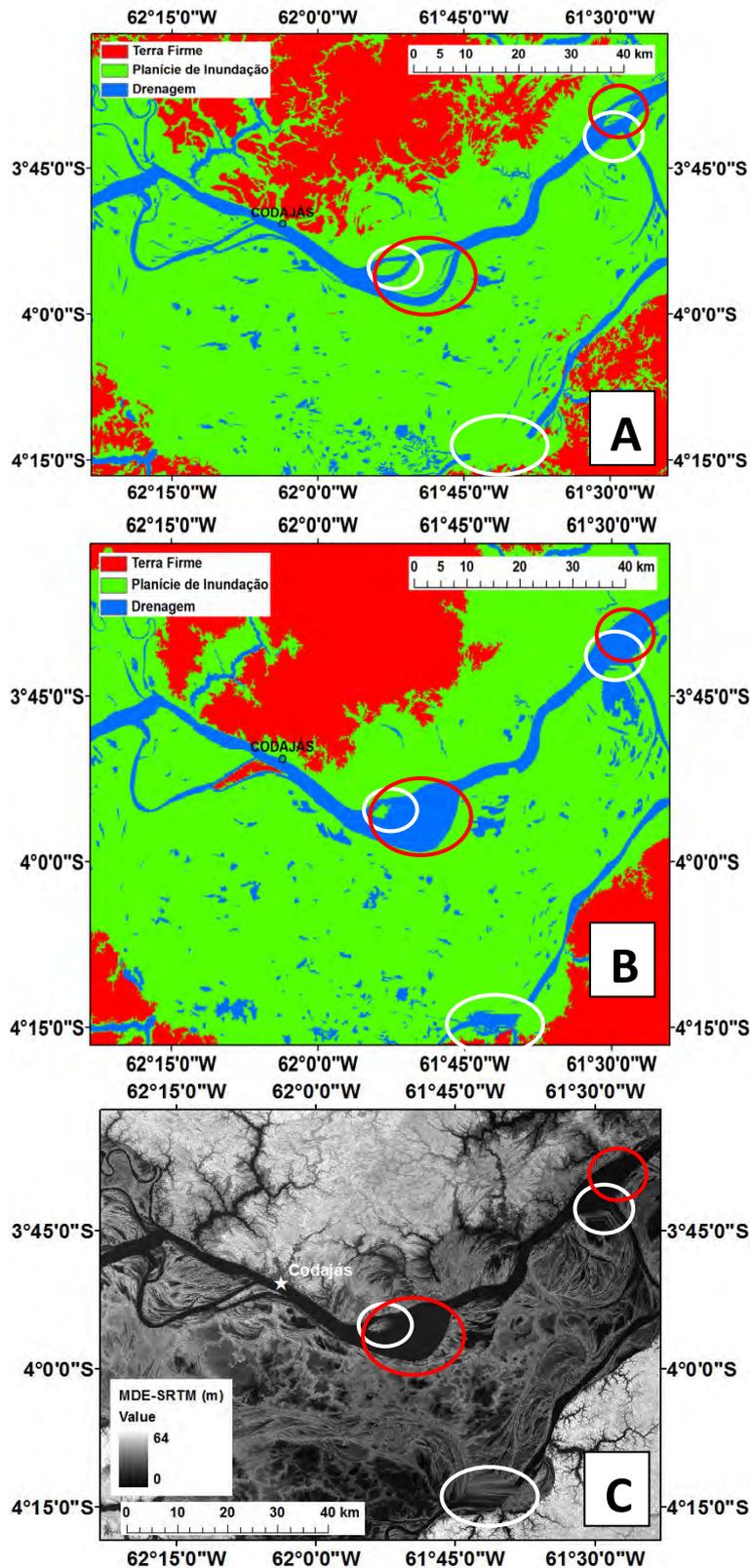


Figura 5.7 – A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Mapa gerado da classificação. C: MDE-SRTM da área-teste de Codajás. As áreas destacadas em branco são ruídos no MDE-SRTM. As áreas destacadas em vermelho são ilhas fluviais existentes na referência, mas não no MDE-SRTM.

As outras quatro áreas-teste apresentaram resultados entre os registrados para as áreas-teste de Codajás e Óbidos, e mais próximos daqueles obtidos para a área de estudo completa. Essas áreas podem ser agrupadas em dois conjuntos com resultados semelhantes: Tabatinga - Fonte Boa, e Jatuarana - Parintins.

O primeiro conjunto, mostrado na Figura 5.8, é composto pelas amostras mais à montante da área de estudo, em um trecho do Solimões onde existe uma grande quantidade de meandros no curso. Nesse setor, entretanto, existem poucos afluentes, e o contraste entre as classes Planície de Inundação e Terra Firme é marcante, provavelmente ocasionado pelas altas taxas de erosão e deposição de sedimentos dessa porção do rio.

O MDE-SRTM da área-teste de Tabatinga apresenta o mesmo problema encontrado na de Codajás, sem diversas das ilhas fluviais representadas no mapa de referência. Disso, decorre a diferença mais visível entre os mapas de referência e o mapa gerado.

Na área-teste de Fonte Boa, o maior problema encontrado foi a confusão entre as classes Drenagem e Planície de Inundação. Isso se deve a existência de uma grande quantidade de lagos de pequena extensão e pelos estreitos canais criados pelas altas taxas de migração do canal.

Em relação à área-teste de Codajás, Tabatinga apresentou menos erros de classificação, exceto pela inexistência das ilhas no MDE-SRTM, onde esse problema foi mais acentuado. Dessa forma, os intervalos de credibilidade para essa área e Fonte Boa são superiores ao calculado para Codajás, sendo de 0,757-0,850 e de 0,760-0,850, respectivamente. Esses intervalos são inclusive superiores aos valores de *Kappa* calculados para a área de estudo completa.

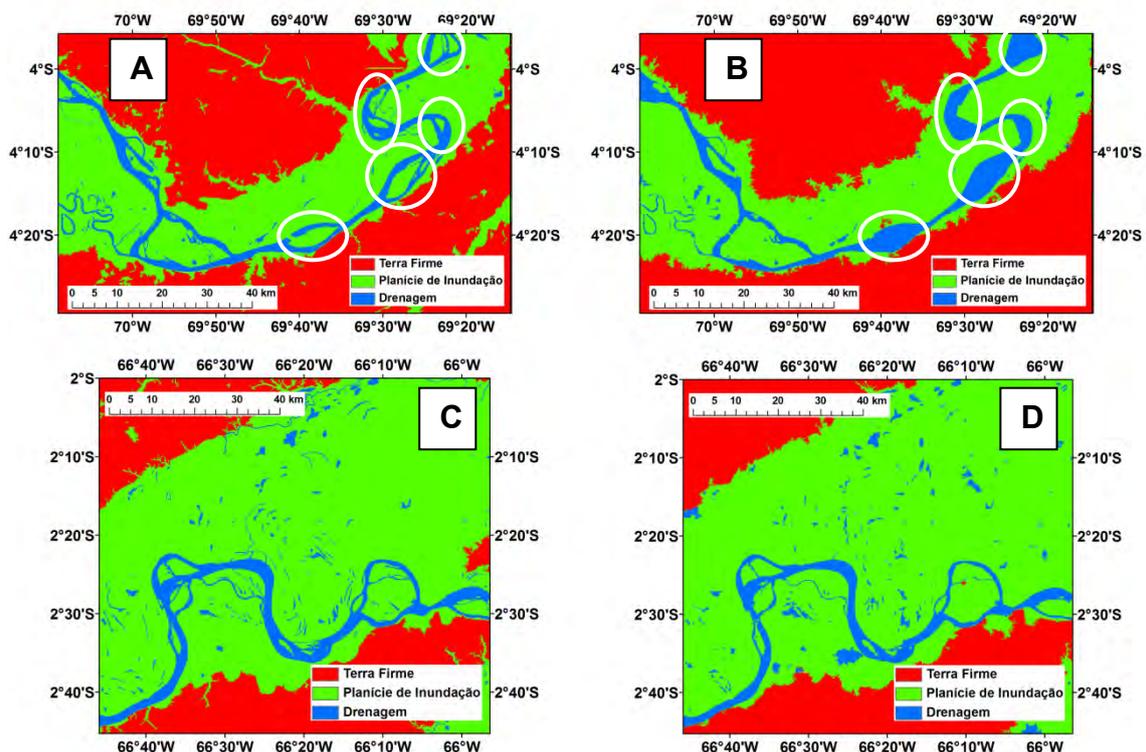


Figura 5.8 - A: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e B: Resultado da classificação da área-teste de Tabatinga. As áreas destacadas nesses mapas são ilhas existentes na referência, mas não no MDE-SRTM. C: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e D: resultado da classificação da área-teste de Fonte Boa.

Para o conjunto Jatuarana-Parintins, mostrado na Figura 5.9, os intervalos de credibilidade são de 0,703-0,807 e de 0,727-0,823, respectivamente. Esses resultados são inferiores aos registrados para o par Tabatinga-Fonte Boa. Eles podem ser explicados pela localização dessas áreas em trechos do rio com características de terreno que dificultam a classificação correta, por meio dos dados MDE-SRTM utilizados, os quais, além disso, não representaram ilhas dessas áreas teste. Apesar disso, esses resultados não são muito diferentes dos obtidos para a área de estudo como um todo.

A área-teste de Jatuarana está situada na área de transição, de acordo com Mertes et al. (1996), entre os setores à montante e à jusante. Isso significa que o rio, e a planície de inundação, são mais retilíneos e com fronteiras mais bem definidas. Essa área tem, no entanto características dos trechos mais à

montante, como por exemplo, os pequenos afluentes. A planície de inundação na margem direita do rio (mais ao sul nos mapas A e B da Figura 5.9), em especial, apresenta maior diferença entre a classificação obtida e o mapa de referência.

As áreas-teste de Parintins e Óbidos, com localização próxima, têm diversas características em comum. Ambas apresentam uma planície de inundação mais retilínea e menos recortada, com poucos afluentes de pequeno porte.

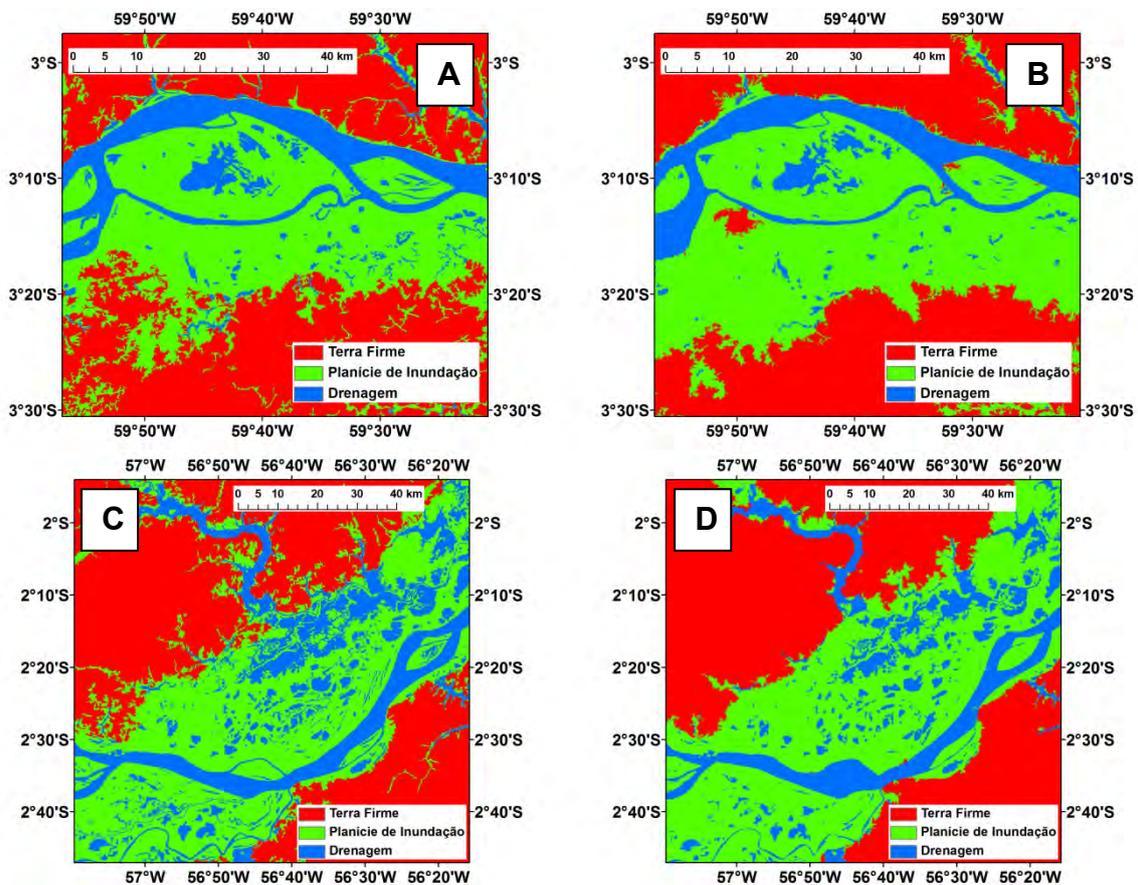


Figura 5.9 - A: Mapa de referência e B: Resultado da classificação gerada para a área-teste de Jatuarana. C: Mapa de referência de Hess et al. (2003) e D: Resultado da classificação gerada para a área-teste de Parintins.

Parintins, no entanto, apresenta características que causam os erros de classificação mencionados anteriormente. Existem diversos lagos com pequenas extensões, que foram classificados como parte da planície de inundação, além de faltar uma ilha nos dados MDE-SRTM, que está

representada no mapa de referência. Na margem esquerda (mais ao norte nos mapas C e D da Figura 5.9), a fronteira entre as Áreas alagáveis e a Terra Firme está mais recortada nos mapas de referência, e a diferença entre esses mapas e a classificação obtida é mais acentuada.

Os resultados das análises de Monte Carlo das áreas-teste mostram que com a rede semântica construída para realizar a classificação das áreas alagáveis da planície de inundação do rio Amazonas é possível obter resultados aceitáveis, mesmo em regiões com características adversas e maior quantidade de problemas com o MDE-SRTM, como a área-teste de Codajás. Entretanto, é possível melhorar esses resultados se forem introduzidas modificações na rede semântica, que levem em consideração características específicas de cada setor da área de estudo. Isso pode ser observado nos resultados do segundo experimento realizado para as áreas-teste da Tabatinga, Codajás e Óbidos.

Codajás foi a área-teste com a menor correspondência entre a classificação e a referência, e Óbidos apresentou a maior correspondência. Por essas razões, elas foram incluídas nesse segundo experimento. Dentre as outras quatro áreas-teste utilizadas neste trabalho (Tabatinga, Fonte Boa, Jatuarana e Parintins), selecionou-se para este experimento a de Tabatinga, devido aos erros nos dados MDE-SRTM e à sua localização, no setor mais à montante do rio Amazonas.

Nesse segundo experimento substituiu-se o atributo Desvio Padrão do MDE-HAND, utilizado para separar as classes Planície de Inundação de Terra Firme, pelo atributo Média do MDE-SRTM. Com esse novo atributo, não é possível estabelecer um parâmetro único para toda a área de estudo, ou mesmo para as três áreas-teste escolhidas, devido às diferentes características morfológicas dessas áreas, localizadas distantes umas das outras. Dessa forma, testes foram realizados para definir qual valor de média do MDE-SRTM deveria ser escolhido para cada uma das três áreas-teste. Para Tabatinga, o valor definido foi de 85 m, para Codajás, 38 m, e para Óbidos, 16 m. Em todos os casos, uma média dos valores do MDE-SRTM de um objeto acima do valor estipulado o classifica como Terra Firme, e um valor abaixo como Planície de

Inundação. Os resultados das novas classificações dessas áreas em relação ao mapa de referência de Hess et al. (2003), são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Índices *Kappa* obtidos pelo método Monte Carlo para as áreas-teste utilizando a rede semântica modificada

Área Teste	Intervalo de credibilidade (95%)	<i>Kappa</i> mínimo	<i>Kappa</i> máximo
Tabatinga	0,760 - 0,853	0,717	0,880
Codajás	0,693 - 0,797	0,647	0,847
Óbidos	0,810 - 0,890	0,783	0,923

Comparando-se esses resultados com seus correspondentes na Tabela 5.1, pode-se observar que apenas no caso da área-teste de Codajás houve uma mudança considerável no intervalo de credibilidade e nos valores máximos e mínimos de *Kappa*, calculados nas 5.000 iterações.

A área-teste de Óbidos, mostrada na Figura 5.10(A), que no primeiro experimento apresentou os melhores resultados, representa uma situação praticamente ideal para a classificação realizada, sem problemas com o MDE-SRTM, com a fronteira Terra Firme/Planície de Inundação pouco recortada e uma diferença considerável de altura entre essas duas classes (10 m ou mais). Por isso, a mudança da rede semântica visando à adequação com a área-teste não melhorou a concordância entre o mapa gerado da classificação e o de referência.

Na área de Tabatinga, mostrada na Figura 5.10(B), a maior dificuldade encontrada foi a inexistência de diversas ilhas fluviais no MDE-SRTM. Obviamente, não é possível resolver esse problema com a mudança da rede semântica. Assim, era de se esperar que os resultados obtidos com os dois tipos de rede fossem semelhantes.

Em Codajás, mostrada na Figura 5.10(C), além de erros no MDE-SRTM, verificaram-se problemas principalmente com a grande quantidade de afluentes de pequeno porte, em relação ao canal principal, e uma fronteira entre as classes Terra Firme e Planície de Inundação extremamente recortada. O atributo altura média do MDE-SRTM permitiu, no entanto, melhor separação

entre os objetos dessas classes, e a rede semântica modificada se mostrou mais eficiente para mapear essa área-teste.

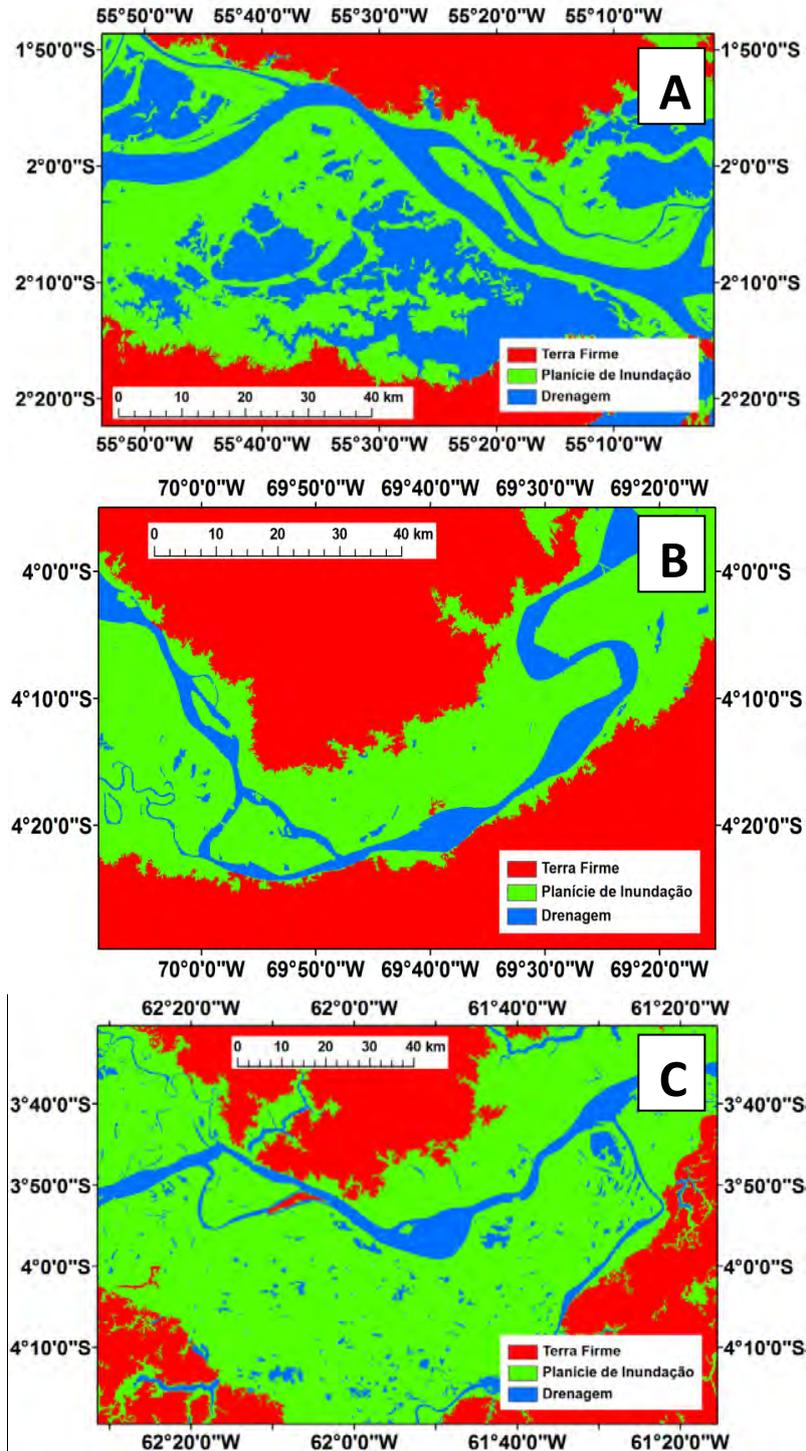


Figura 5.10 - A: Resultado da classificação com a rede semântica modificada, obtido para as áreas-teste de: Óbidos (A), Tabatinga (B) e Codajás (C).

Esse teste de modificação da rede semântica mostra que é possível se obter uma maior correspondência entre a classificação gerada e o mapa de referência em áreas menores, pela escolha de atributos mais sensíveis às características locais dessas áreas. Entretanto, falhas no MDE utilizado não podem ser superadas com a manipulação da rede semântica. Nesse caso, é necessária a escolha de outra fonte de dados.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, concluiu-se que:

- O MDE-SRTM e o MDE gerado com a aplicação do descritor HAND se constituem em uma fonte de dados viável para o mapeamento de áreas alagáveis da planície do rio Amazonas. A concordância entre o mapa gerado e a referência foi de 0,711.
- A resolução dos dados (90m) e grande quantidade de falhas no MDE-SRTM, especialmente na rede de drenagem, influenciou no resultado da classificação.
- É possível obter bons resultados no mapeamento de grandes áreas, com o uso de técnicas de classificação baseada em objeto. Porém, a liberdade na escolha dos procedimentos de segmentação e de classificação é severamente limitada pela capacidade de processamento do sistema disponível.
- A escolha criteriosa dos atributos e parâmetros que definem as classes a serem identificadas no processo de classificação permitiu criar uma rede semântica relativamente simples e com bom desempenho. O resultado obtido para a área de estudo indica a viabilidade do uso de uma única rede semântica no mapeamento de áreas de grande extensão e variação morfológica. Trabalhos futuros nesse tema poderão ter mais liberdade na combinação de procedimentos, bem como se beneficiar com o uso de limiares *fuzzy* para obter melhores resultados.
- É possível aumentar o desempenho da rede semântica proposta neste trabalho, classificando áreas menores e selecionando atributos mais adequados às características morfológicas locais.
- É possível aplicar o descritor HAND em MDE obtidos de outras fontes de dados. Dessa forma, a utilização de modelos de elevação com menos erros e melhor resolução espacial, provavelmente possibilitará gerar

classificações ainda mais precisas desse tipo de ambiente. Os MDE gerados a partir de dados TerraSar-X (para pequenos setores ou validação de áreas extensas), ASTER ou aquele do Topodata são exemplos que podem ser utilizados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB´SABER, A. N. Problemas geomorfológicos da Amazônia Brasileira. In: SIMPÓSIO SOBRE A BIOTA AMAZÔNICA, 1., 1967, Manaus. **Anais...** Manaus, 1967, p. 35-68.
- AFFONSO, A. G.; NOVO, E. M. L. M.; RUDDORF, C.; ARRAUT, E.; BARBOSA, C. C. F.; SANTOS, J. R. Estado atual das pesquisas e aplicações do sensoriamento remoto no monitoramento da várzea amazônica. In: **Workshop geotecnologias aplicadas às áreas de várzea da Amazônia**. Manaus: Projeto Manejo dos Recursos Naturais da Várzea – PróVarzea, 2007. p. 53-62.
- ALSDORF, D.; HAN, S.; BATES, P.; MELACK, J. M. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p.2448-2456, 2010.
- ARASATO, L. S.; AMARAL, S.; XIMENES, A. C. Densidade de drenagem e HAND (Height Above Nearest Drainage) do SRTM para modelagem de distribuição de espécie de palmeiras no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** INPE, São José dos Campos: Artigos, p. 5089-5097.
- ASSELEN, S. VAN; SEIJMONSBERGEN, A.C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. **Geomorphology**, v. 78, p.309-320, 2006.
- BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. (eds.). **Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII**. Beiträge zum AGIT Symposium Salzburg 2000. Karlsruhe. Herbert Wichmann Verlag, p. 12 – 23, 2000.
- BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, n. 58, p. 239-258, 2004.
- BERTANI, T. C.; NOVACK, T.; HAYAKAWA, E. H.; ZANI H. Detection of saline and non-saline lakes on the Pantanal of Nhecolândia (Brazil) using object-based image analysis. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38-4/C7, 2010.
- BIGARELLA, J. J.; FERREIRA, A. M. M. Amazonian geology and the Pleistocene and the Cenozoic environments and paleoclimates. In: Prance, G.T.; Lovejoy, T.E. (Ed.) **Amazonia**. Oxford: Pergamon, 1985. cap. 3, p. 49–71.
- BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2-16, 2010.
- BRIDGE, J. S.; DEMICCO, R. V. **Earth surface processes, landforms and sediment deposits**, New York: Cambridge University Press, 2008, 815 p.

- CAMARGO, F. F.; ALMEIDA, C. M.; FLORENZANO, T. G.; HEIPKE, C.; FEITOSA, R. Q.; COSTA, G. A. O. P. ASTER/Terra Imagery and a Multilevel Semantic Network for Semi-automated Classification of Landforms in a Subtropical Area. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 77, n. 6, p. 619-629, 2011.
- CAMPBELL, K. E. JR.; FRAILEY, C. D.; PITTMAN, L. R. The Pan-Amazonian Ucayali Peneplain, late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of the modern Amazon River system. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.239, p.166–219, 2006.
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**, 1984. 583p. Tese (Doutorado) - University of California, Santa Barbara, 1984.
- DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R. **SHALSTAB**: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential, National Council for Air and Stream Improvement, 1998.
- DOWDING, S.; KUUSKIVI, T.; LI, X. Void fill of SRTM elevation data - Principles, processes and performance. In: **Images to decisions: remote sensing foundations for GIS applications**. Kansas City: ASPRS 2004 Fall Conference, 2004.
- DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, n. 81, p.330-344, 2006.
- FARR, T. G. et al.. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v.45, p.21-35, 2007.
- FORSBERG, B. R; HASHIMOTO, Y; ROSEQVIST, A.; MIRANDA, F. P. Tectonic fault control of wetland distributions in the Central Amazon revealed by JERS-1 radar imagery. **Quaternary International**, v.72, p.61-66, 2000.
- FRANZINELLI, E.; LATRUBESSE, E. Neotectonic in the central part of the Amazon basin. **Bulletin INQUA Neotectonic Commission**, v. 16, p. 10-13, 1993.
- HAY, G. J.; CASTILLA, G. Geographic Object-based Image Analysis (GEOBIA): a new name for a new discipline. In: BLASCHKE, T.; LANG, S.; HAY, G.J. (Ed.) **Object-based image analysis- spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. Dualseason mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p.404–428, 2003.
- HUDSON, P. F.; Floodplains: environment and process. **Geomorphology**, v. 56, p. 223-224, 2003.
- IGREJA, H. L. S. Neotectônica: A importância para o bioma amazônico. In: **Workshop geotecnologias aplicadas às áreas de várzea da Amazônia**. Manaus: Projeto Manejo dos Recursos Naturais da Várzea – PróVarzea, 2007. p. 93-96.

IRIONDO, M. H.; SUGUIO, K. Geomorfologia da planície Amazônica. **Bulletin INQUA Neotectonic Commission**, v. 4, p. 72-78, 1981.

ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI Help**, 2009.

JOHANSEN, K.; BARTOLO, R.; PHINN, S. Geographic object-based image analysis. **Journal of Spatial Science**, v. 55, n. 1, p. 3-7, 2010.

JUNK, W. J. Flood tolerance and tree distribution in central Amazonian floodplains. In: Holm-Nielsen, L. B.; Nielsen, I. C.; Balslev, H. (eds). **Tropical forest: botanical dynamics, speciation and diversity**. New York: Academic Press, p.47-64, 1989.

JUNK, W. J. **The Central Amazon floodplain** - ecology of a pulsing system. New York: Springer, 1997. 525 p.

LATRUBESSE, E. M. Perspectivas hidrogeomorfológicas da diversidade das várzeas amazônicas. In: **Workshop geotecnologias aplicadas às áreas de várzea da Amazônia**. Manaus: Projeto Manejo dos Recursos Naturais da Várzea – PróVarzea, 2007. p. 37-42.

LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil, **Geomorphology**, v.44, p.241-257, 2002.

LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. **Geomorphology**, v.70, p.372-397, 2005.

MARTHA, T. R.; KERLE, N. Creation of event-based landslide inventory from panchromatic images by object oriented analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHICAL OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, 4., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2012, p. 53-57.

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote sensing of wetlands on a global scale. **SIL News**, v.42, p.1-5, 2004.

MELACK, J. M.; HESS, L. L.; GASIL, M.; FORSBERG, B. R.; HAMILTON, S. K.; LIMA, I. B. T.; NOVO, E. M. L. M. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Climate Biology**, v.10, p.530-544, 2004.

MELACK, J. M.; HESS, L. L.; SIPPEL, S. Remote Sensing of lakes and floodplains in the Amazon Basin. **Remote Sensing Review**, n.10, p. 127-142, 1994.

MERTES L. A. K.; DUNNE T.; MARTINELLI L. A. Channel floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon river, Brazil. **Geological Society of America Bulletin**, v.108, n.9, p.1089-1107, 1996.

MERTES, L. A. K.; DANIEL, D. L.; MELACK, J. M.; NELSON, B.; MARTINELLI, L. A.; FORSBERG, B. R. Spatial patterns of hydrology, geomorphology and vegetation on the floodplain of the Amazon River in Brazil from a remote sensing perspective. **Geomorphology**, v.13, p.215-232, 1995.

METROPOLIS, N. The beginning of the Monte Carlo method. **Los Alamos Science**. v.15, p.125-130, 1987.

- MOORE, A. B; MORRIS, K. P; BLACKWELL, G. K; JONES, A. R; SIMS, P. C. Using geomorphological rules to classify photogrammetrically-derived digital elevation models. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.13, p.2613-2626, 2003.
- POTTER, P. E. Significance and origin of big rivers. **Journal of Geology**, v.86, p.13-33, 1978.
- RABUS, B.; EINEDER M.; ROTH A.; BAMLER R. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry and Remote Sensing**. v. 57, p. 241-262, 2003.
- REGINATTO, G. M. P.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C. W.; CARAMAZ, M. L. SHALSTAB application to identify the susceptible areas of shallow landslides in Cunha River watershed, Rio dos Cedros city, SC, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHICAL OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, 4., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2012, p. 108-113.
- RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3469-3481, 2008.
- RENÓ, V.F.; NOVO, E. M. L. M.; SUEMITSU, C.; RENNO, C.D.; SILVA, T. S. F. Assessment of deforestation in the Lower Amazon floodplain using historical Landsat MSS/TM imagery, **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 3446-3456, 2011.
- ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; CHAPMAN, B.; FREEMAN, A. The Global Rain Forest Mapping project – a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 1375–1387, 2000.
- ROSIM, S.; MONTEIRO, A. M. V.; RENNO, C. D.; SOUZA, R. C. M; SOARES, J. V. Terrahidro – Uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** INPE, São José dos Campos: Artigos, p. 2589-2596.
- SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M. L. M.; MERTES, L. K. Amazon River mainstem floodplain Landsat TM digital mosaic. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.1, p.57-69, 2002.
- SHRUTHI, R. B. V.; KERLE, N.; JETTEN, V. Extracting gully features and its dynamics from high resolution imagery using object based image analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOGRAPHICAL OBJECT-BASED IMAGE ANALYSIS, 4., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2012, p. 7-12.
- PROJETO RADAM. **Folha SA-21 Santarém**. Rio de Janeiro: DNPM. Recursos Naturais. v. 10, 1976.

- SIPPEL, S. J.; HAMILTON, S. K.; MELACK, J. M. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain. **Archiv für Hydrobiologie**. v.123, p.385-400, 1992.
- STERNBERG, H. O. Vales tectônicos na planície amazônica?. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 12, p. 513-533, 1950.
- STERNBERG, H. O. Aggravation of floods in the Amazon River as a consequence of deforestation?. **Geografiska Annaler** v.69A, p.201-219, 1987.
- TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; RIES, J.; THOMPSON, P.; WATKINS, M. GRACE measurements of mass variability in the earth system. **Science**, v.305, p.503-505, 2004.
- TEIXEIRA, W. G.; PINTO, W. H.; LIMA, H.; MACEDO, R. S.; MATINS, G. C.; ARRUDA, W. Os solos das várzeas próximas a calha do rio Solimões- Amazonas no Estado do Amazonas. In: **Workshop geotecnologias aplicadas às áreas de várzea da Amazônia**. Manaus: Projeto Manejo dos Recursos Naturais da Várzea – PróVarzea, 2007. p. 29-36.
- TRIMBLE GERMANY GMBH. **eCognition developer reference book**. München: Trimble Germany GmbH, 2010. 388 p.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**. v. 32, p. 300-309, 2012.
- XIE, P. P.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; ADLER, R.; GRUBER, A.; FERRARO, R. et al.. GPCP Pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates. **Journal of Climate**, v.16, n.13, p.2197-2214, 2003.