



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.22.16.15-TDI

**MONITORAMENTO DA ÁREA INUNDADA NA
PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LAGO GRANDE DE
CURUAI (PA) POR MEIO DE IMAGENS
SCANSAR/ALOS E DADOS AUXILIARES**

Allan Saddi Arnesen

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, e Thiago Sanna Freire Silva, aprovada em 13 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

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

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 - Centro de Tecnologias Especiais (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)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.22.16.15-TDI

**MONITORAMENTO DA ÁREA INUNDADA NA
PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LAGO GRANDE DE
CURUAI (PA) POR MEIO DE IMAGENS
SCANSAR/ALOS E DADOS AUXILIARES**

Allan Saddi Arnesen

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, e Thiago Sanna Freire Silva, aprovada em 13 de fevereiro de 2012.

URL do documento original:

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

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ar62m Arnesen, Allan Saddi.
Monitoramento da área inundada na planície de inundação do Lago Grande de Curuai (PA) por meio de imagens SCAN-SAR/ALOS e dados auxiliares / Allan Saddi Arnesen. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxii + 115 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/02.22.16.15-TDI)

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

Orientadores : Drs. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, e Thiago Sanna Freire Silva.

1. mapeamento da inundação. 2. Radar de Abertura Sintética (SAR). 3. classificação orientada ao objeto. I.Título.

CDU 528.88:528.8.044.2(811.5)

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

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Thiago Sanna Freire Silva



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

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



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

Dr. Camilo Daleles Rennó



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Bruce Rider Forsberg



Convidado(a) / INPA / Manaus - AM

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Allan Saddi Arnesen

São José dos Campos, 13 de março de 2012

À minha noiva Ana Laura, razão do meu viver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus orientadores por me transmitirem imensuráveis conhecimentos técnico-científicos em constantes momentos de aprendizado vividos ao longo destes anos. Agradeço à Dra. Evlyn Novo por sua paciência, sua enorme didática e confiança em meu trabalho. Agradeço ao Dr. Thiago Silva por exigência com as minhas produções e por suas orientações metodológicas.

Agradeço aos excelentes e rigorosos professores do Curso de Sensoriamento Remoto do INPE, e aos simpáticos e prestativos funcionários de todo o Instituto.

Agradeço aos meus colegas e amigos de INPE que tornaram minha caminhada mais fácil e descontraída ao longo do Mestrado.

Agradeço ao meu amigo e colega Marcelo Curtarelli, pelos excelentes momentos de trabalho e parceria nestes últimos dois anos.

Agradeço à Dra. Laura Hess, por fornecer as imagens ScanSAR/ALOS no âmbito da Iniciativa *Kyoto & Carbon*.

Agradeço ao CNPq pela Bolsa no Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE (Processo 130519/2010-3) e à FAPESP (Projeto 2008/07537-1) pelo suporte ao trabalho de campo.

Agradeço a meus pais, Desirée e Finn, por sempre me incentivarem a enfrentar novos desafios e terem proporcionado condições para encará-los.

Agradeço a toda minha família, em especial a meus avós, por dividir comigo experiências e momentos maravilhosos.

Agradeço a minha noiva, Ana Laura, por ter ficado ao meu lado em mais esta etapa profissional e por iluminar minha vida com seu encanto.

Agradeço a Deus por me oferecer saúde para superar os obstáculos.

RESUMO

A planície de inundação do Baixo Rio Amazonas é sujeita a uma grande variação sazonal no nível d'água devido ao grande volume precipitado sobre esta região tropical, potencializada pela ampla dimensão da Bacia. Esta amplitude, associada à sua topografia plana, resulta também em uma ampla variação na extensão total de áreas inundadas ao longo do ano. Dados de Radars de Abertura Sintética (SAR) representam uma boa alternativa para o mapeamento da inundação nestas áreas, dada a sua capacidade de fornecer informações frequentes em variadas condições atmosféricas. Este estudo apresenta um método para o monitoramento da variação da extensão inundada, durante o ano hidrológico de 2007, utilizando imagens do sensor PALSAR/ALOS, modo ScanSAR. A área de estudo compreende uma seção do Baixo Rio Amazonas, a planície de inundação do Lago Grande de Curuai, próxima à cidade de Óbidos (PA). Doze cenas foram adquiridas entre os anos de 2006 e 2010, sendo sete delas durante o ano hidrológico de 2007. Registros do nível d'água de uma estação fluviométrica (Curuai), fotografias tomadas durante trabalho de campo realizado na enchente de 2011, e imagens ópticas (Landsat-5/TM e MODIS/Terra e Aqua) também foram utilizados. Um algoritmo de mineração de dados possibilitou a identificação de limiares, posteriormente utilizados para a construção de um método de classificação hierárquica, orientada ao objeto, para mapear as condições de inundação da área de estudo para todas as datas disponíveis. A acurácia da classificação foi calculada para os três primeiros níveis hierárquicos, assim como para a condição de inundação. Os níveis 1 e 2 (apenas um mapa para toda a série temporal) tiveram acurácia de 90 e 83%, respectivamente. As classificações do Nível 3 (um mapa por data) foram validadas para os períodos de seca e cheia, com exatidões globais de 78 e 80%, respectivamente. A condição de inundação foi mapeada com exatidões globais de 88 e 90 % para seca e cheia, respectivamente. Para prever a extensão inundada da área de estudo, um modelo polinomial foi ajustado entre as áreas inundadas mapeadas e os níveis d'água registrados na estação fluviométrica de Curuai, para o ano hidrológico de 2007, com R^2 de 0,94 (p -valor $<0,05$). O modelo foi validado utilizando as classificações das datas de 2009 e 2010, com um erro quadrático médio (RMSE) de 202 km² (equivalente a 10% da média dos valores mapeados).

FLOOD EXTENT MONITORING IN THE CURUAI FLOODPLAIN (PA) USING SCANSAR/ALOS IMAGES AND ANCILLARY DATA

ABSTRACT

The Lower Amazon River floodplain is subject to a large seasonal variation in water levels, related to the large amount of precipitation in this tropical region, and potentialized by the basin's large dimension. This water level amplitude, associated with the floodplain flat topography, also results in significant variation in flood extent throughout the year. Synthetic Aperture Radar (SAR) data offers a good alternative for mapping the extent of flooded area in these wetlands, given its ability to provide timely and continuous information without being heavily affected by atmospheric conditions. This study presents a method for monitoring the flood extent variation, during the 2007 flood pulse, using ScanSAR/ALOS images. The study area comprised a section of the Lower Amazon River, the Curuai Lake floodplain, near the city of Óbidos (PA). Twelve ScanSAR scenes were acquired between 2006 and 2010, seven of them during the 2007 flood pulse. Water level records from a gauge station (Curuai), field photographs collected during the rising water period of 2011 and optical images (Landsat-5/TM and MODIS/Terra and Aqua) were also used. Data mining algorithm allowed the identification of thresholds, later used to implement a hierarchical, object based classification algorithm for mapping the flooding status in the study area for all available dates. The accuracy of the classification was assessed for the first three hierarchical classification levels, as well as for flooding status. Levels 1 and 2 (one land cover map for the entire time series) had overall accuracies of 90% and 83%, respectively. Level 3 classifications (one map per date) were validated only for the lowest and highest water stages, with overall accuracies of 78% and 80%, respectively. Flooding status was mapped with 88% and 90% accuracies for the lowest and highest water levels, respectively. To predict flood extent, a polynomial regression model was fitted between flooded area estimates and recorded water levels at the Curuai gauge, for the 2007 pulse, with $R^2 = 0.94$ ($p\text{-value} < 0.05$). The model was validated using the resulting classifications from 2009 and 2010 dates, with an overall Root Mean Squared Error (RMSE) of 202 km² (equivalent to 10% of the average of observed values).

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Médias mensais de precipitação e cota na estação de Óbidos (Baixo Rio Amazonas) fornecidas pela ANA para o período de 1971 a 2007....	8
Figura 2.2 – Detalhes de imagens TM/Landsat-5 (composição R5G4B3) da mesma área da planície de inundação do LGC (Baixo Amazonas) em duas fases do pulso de inundação do ano de 2007.....	9
Figura 2.3 – Modelos de regressão relacionando cota com área de água aberta: a) obtidas a partir das imagens Landsat-5; e b) obtidas a partir de dados batimétricos.	10
Figura 2.4 - Mecanismos de espalhamento: a) reflexão de canto (ou <i>double bounce</i>); b) espalhamento volumétrico (ou de dossel); e c) espalhamento de superfície.....	13
Figura 2.5 – Características da geometria de aquisição de imagens SAR.....	15
Figura 2.6 – Representação das relações entre o ângulo de incidência do radar (θ), a vertical verdadeira para um terreno não plano e o ângulo de declividade local (α) do mesmo.....	16
Figura 2.7 – Esquema das medições típicas de retroespalhamento de superfícies do mar em função do ângulo de incidência para intensidades variáveis de vento e consequente rugosidade.	17
Figura 2.8 - Mecanismos de espalhamento predominantes que ocorrem na interação da radiação eletromagnética (banda L) com os alvos das áreas inundáveis.	20
Figura 2.9 – Vetor resultante dos ecos coerentes de múltiplos espalhadores localizados em um elemento de resolução.....	22
Figura 2.10 – Limiares multi-temporais do classificador utilizado por Martinez e Le Toan (2007) para o mapeamento da dinâmica de inundação e das coberturas da terra.	23
Figura 3.1 - Mapa de localização da planície de inundação LGC – PA (nível d'água no LGC de 6,81m - 25/08/2005 sobre o Modelo digital de elevação - MDE - do SRTM).....	28
Figura 3.2 – Pontos fotografados durante o trabalho de campo na planície de inundação do Lago Grande de Curuai (PA). Imagem ScanSAR/ALOS de 18/07/2007 (NA=959 cm).	29

Figura 3.3 – Fotografias de áreas de água aberta registradas na planície de inundação do LGC. Em a) é possível notar-se a maior rugosidade da superfície d'água, em função da maior intensidade do vento.	29
Figura 3.4 – Fotografias de áreas de macrófitas registradas na planície de inundação do LGC. a) macrófitas emergentes e b) macrófitas flutuantes.	30
Figura 3.5 – Fotografias de áreas de florestas inundadas registradas na planície de inundação do LGC. a) florestas e b) arbustos.	30
Figura 3.6 – Fotografias de áreas de florestas não inundadas e arbustos inundados registradas na planície de inundação do LGC.	31
Figura 3.7 – Fotografias de áreas de solo registradas na planície de inundação do LGC. a) vegetação herbácea seca e b) solo exposto.	31
Figura 3.8 - Órbitas do modo ScanSAR recobrimdo a planície de inundação do LGC, e três imagens destas órbitas em datas próximas: 412 – 23/07/2007; 409 – 18/07/2007; e 406 – 13/07/2007.	33
Figura 3.9 - Datas de aquisição das imagens ScanSAR/ALOS, Landsat-5 (órbitas 227 e 228) e MODIS (produtos diário e de 8 dias) utilizadas para o período do pulso de inundação de 2007 e o nível d'água na estação de Curuai da ANA nestas datas.	34
Figura 3.10 - Datas de aquisição das imagens ScanSAR/ALOS, Landsat-5 (órbita 228) e MODIS (produtos diário e de 8 dias) utilizadas para o período dos anos de 2009 e 2010 e o nível d'água na estação de Curuai da ANA nestas datas.	34
Figura 3.11 – Etapas da metodologia aplicada.	39
Figura 3.12 – Localização das amostras adquiridas para a análise do ângulo de incidência em: a) imagem ScanSAR filtrada e não corrigida adquirida em 30/11/2006; e b) imagem ângulo de incidência local para as imagens ScanSAR/PALSAR produzidas pela JAXA/JPL no âmbito da Iniciativa K&C. .	42
Figura 3.13 – Exemplo de amostra selecionada para a classe Floresta Não Inundada em: a) imagem ScanSAR/ALOS sem correção do ângulo de incidência; e b) imagem de ângulo de incidência gerada pela JAXA a partir do SRTM.	43
Figura 3.14 – Exemplos de áreas de solo (vermelho) e água (azul) em trechos de imagens ScanSAR/ALOS corrigidas para o efeito do terreno sobre o ângulo de incidência das órbitas: a) 406; e b) 412.	45
Figura 3.15 – Hierarquia das classes.	49
Figura 3.16 – Processo de classificação hierárquica.	52
Figura 3.17 – Mapas gerados por fatiamento com base no modelo que acopla a batimetria de Barbosa (2005) com o SRTM, utilizados para a	

validação da condição de inundação das florestas. a) Data que representa a seca (30/11/2006) e b) data que representa a cheia (18/07/2007).....	54
Figura 4.1 – Variação das médias de retroespalhamento das amostras em função do ângulo de incidência das imagens ScanSAR para FI e FNI. As linhas tracejadas representam a faixa de ângulos de incidência em que a planície de inundação do LGC está inserida.....	57
Figura 4.2 – Variação das médias de retroespalhamento das amostras em função do ângulo de incidência das imagens ScanSAR para S e AA. As linhas tracejadas representam a faixa de ângulos de incidência em que a planície de inundação do LGC está inserida.....	59
Figura 4.3 – Gráfico de densidade de probabilidade do retroespalhamento das oito classes na data em que as amostras foram coletadas.	63
Figura 4.4 – Gráficos de densidade de probabilidade para as classes FNI e FI: a) em <i>pixels</i> totais amostrados; e b) médias dos polígonos amostrados. ...	65
Figura 4.5 – Variação temporal do retroespalhamento das classes SR e AAR ao longo do pulso de inundação de 2007. As linhas escuras dentro das caixas são as medianas, os extremos das caixas são os quartis 25% e 75% e os extremos são quartis 5% e 95%.	67
Figura 4.6 – Variação temporal do retroespalhamento das classes SL, AAL e MF ao longo do pulso de inundação de 2007. As linhas escuras dentro das caixas são as medianas, os extremos das caixas são os quartis 25% e 75% e os extremos são quartis 5% e 95%.	67
Figura 4.7 - Processos da classificação orientada ao objeto para os níveis 1 e 2.	69
Figura 4.8 – Resultado do Nível 2 da classificação para a) o pulso de inundação de 2007 e b) para os anos de 2009 e 2010.	70
Figura 4.9 - Processos da classificação orientada ao objeto para o Nível 3. ...	71
Figura 4.10 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 30/11/2006.....	72
Figura 4.11 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 15/01/2007.....	73
Figura 4.12 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/03/2007.....	73
Figura 4.13 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/06/2007.....	74
Figura 4.14 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 18/07/2007.....	74

Figura 4.15 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/09/2007.....	75
Figura 4.16 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 18/10/2007.....	75
Figura 4.17 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 22/04/2009.....	76
Figura 4.18 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 07/06/2009.....	76
Figura 4.19 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 23/07/2009.....	77
Figura 4.20 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 23/01/2010.....	77
Figura 4.21 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 25/04/2010.....	78
Figura 4.22 – Áreas das classes AA, M e S ao longo do pulso de inundação de 2007.	83
Figura 4.23 – Áreas das classes AA, M e S ao longo dos anos de 2009 e 2010.	84
Figura 4.24 – Áreas das classes FI e FNI ao longo do pulso de inundação de 2007.	84
Figura 4.25 – Áreas das classes FI e FNI ao longo dos anos de 2009 e 2010.	85
Figura 4.26 – Modelo ajustado com os resultados do mapeamento do pulso de inundação de 2007 na planície de inundação do LGC.....	87
Figura 4.27 – Modelo ajustado com os resultados do mapeamento para toda a série temporal analisada (2006 a 2010) na planície de inundação do LGC. .	89
Figura 4.28 – Modelos de regressão entre área inundada e nível d'água em Curuai ajustados pelo presente estudo, por Barbosa (2005) e por Bonnet et al. (2008).	90

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Características do satélite ALOS e do modo de observação ScanSAR do sensor PALSAR.	32
Tabela 3.2 – Imagens temporais utilizadas para os dois períodos analisados: pulso de inundação de 2007 e anos de 2009 e 2010.	36
Tabela 3.3 - Características das imagens dos sensores TM/Landsat-5 e MODIS.	37
Tabela 3.4 – Imagens TM/Landsat-5 utilizadas como referência para a coleta de amostras da análise do ângulo de incidência.	41
Tabela 3.5 – Tipos de cobertura da planície de inundação do Rio Amazonas identificadas em campo, utilizadas para a análise do ângulo de incidência e utilizadas para a análise sazonal e classificação.	46
Tabela 3.6 – Número e tamanho total das amostras para a análise da variação sazonal do retroespalhamento das oito classes analisadas na Planície do LGC nas imagens ScanSAR/ALOS.	47
Tabela 4.1 – Valores de erro padrão e p-valor de cada coeficiente ajustado nos modelos múltiplos de regressão lineares relacionando a variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência (com e sem correção quanto ao efeito do terreno) das classes FI e FNI.	58
Tabela 4.2 – Razão entre as médias de retroespalhamento das amostras de florestas inundadas sobre florestas não inundadas para três ângulos de incidência representativos (<i>near range</i> : 19°; <i>mid range</i> : 30°; e <i>far range</i> : 42°).	58
Tabela 4.3 – Valores de erro padrão e p-valor de cada coeficiente ajustado nos modelos múltiplos de regressão lineares relacionando a variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência (com e sem correção quanto ao efeito do terreno) das classes S e AA.	60

Tabela 4.4 – Razão entre as médias de retroespalhamento das amostras de águas abertas sobre solo para três ângulos de incidência representativos (<i>near range</i> : 19°; <i>mid range</i> : 30°; e <i>far range</i> : 42°).....	61
Tabela 4.5 – Estatísticas descritivas dos tipos de cobertura do solo analisados na imagem ScanSAR da data em que as amostras foram coletadas.	63
Tabela 4.6 – Valores de retroespalhamento encontrados na bibliografia e neste estudo para as classes estudadas.	64
Tabela 4.7 – Matrizes de confusão baseada nos pontos amostrais para o níveis 1 e 2 da classificação.	79
Tabela 4.8 – Matriz de confusão baseada nos pontos amostrais para o Nível 3 da classificação das datas de seca (30/11/2006) e cheia (18/07/2007).	80
Tabela 4.9 – Matriz de confusão baseada nos pontos amostrais para condição de inundação das datas de seca (30/11/2006) e cheia (18/07/2007).....	81
Tabela 4.10 – Áreas relativas das classes no Nível 3 na área de estudo em 18/07/2007 (NA=959 cm) e 25/04/2010 (NA=952 cm).	82
Tabela 4.11 – Áreas inundadas mapeadas (em km ²) para a série temporal analisada.	86
Tabela 4.12 – Validação do modelo do pulso de inundação de 2007 com as datas dos anos de 2009 e 2010.	87
Tabela 4.13 – Modelos ajustados nos trabalhos de Bonnet et al. (2008), Barbosa (2005) e no presente estudo (toda série temporal)..	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAL	Água Aberta Lisa
AAR	Água Aberta Rugosa
AI	Área inundada
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
ANA	Agência Nacional das Águas
AVNIR	<i>Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer type 2</i>
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
C/S	Razão entre os retroespalhamentos da Cheia sobre a Seca
DTR	Desvio padrão Temporal do Retroespalhamento
FI	Floresta Inundada
FNI	Floresta Não Inundada
GLM	<i>Generalized Linear Models</i>
IA	Ângulo de incidência
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
JERS-1	<i>Japanese Earth Resource Satellite</i>
LGC	Lago Grande de Curuai
MTR	Média Temporal do Retroespalhamento
MDE	Modelo Digital de Elevação
ME	Macrófita Emergente
MF	Macrófita Flutuante
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PALSAR	<i>Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PRISM	<i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>

RC	Retroespalhamento da Cheia
RS	Retroespalhamento da Seca
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SL	Solo Liso / Seco
SR	Solo Rugoso / Úmido
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
VIRS	<i>Visible and Infrared Scanner</i>

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo.....	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Aspectos hidrológicos da planície de inundação do Rio Amazonas	7
2.2. Aplicações de dados de SAR para o mapeamento de áreas inundáveis	12
2.3. Técnicas de classificação de imagens de SAR.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1. Área de Estudo	27
3.2. Trabalho de campo.....	28
3.3. Dados utilizados	31
3.4. Metodologia	39
4 RESULTADOS	57
4.1. Análise do retroespalhamento dos tipos de cobertura da terra	57
4.2. Classificação orientada ao objeto.....	68
4.3. Estimativas de área inundada	82
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A – MAPAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

As áreas inundáveis são ecossistemas de grande importância para a humanidade, pois contribuem com o controle natural de inundações, com a prevenção de secas e com o desenvolvimento de *habitats* para diversas espécies da flora e fauna. Além disso, estas áreas são frequentemente úteis para as populações ribeirinhas como suporte à navegação, à pesca e à agricultura (MITSCH; GOSSELINK, 2000).

Estas áreas também são importantes para o balanço global de carbono na atmosfera, atuando tanto como fontes naturais de gases de efeito estufa para a atmosfera, tais como metano (CH₄) - resultante da decomposição anaeróbica - e dióxido de carbono (CO₂) - resultante da respiração dos organismos e da decomposição aeróbica, quanto no sequestro de carbono realizado pela fotossíntese da vegetação presente nestas áreas (JUNK, 1997; HENDERSON; LEWIS, 2008; BELGER et al., 2011; RUDORFF et al., 2011).

De acordo com o relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 2007, as áreas inundáveis representam de 20% a 39% da produção mundial de CH₄, gás que apresenta potencial de aquecimento global vinte vezes superior ao CO₂. Grande parte desta produção está relacionada às extensas áreas cobertas por macrófitas emergentes, as quais produzem matéria orgânica e propiciam emissões de CH₄, dependendo de alguns fatores como temperatura, nível d'água, composição de espécies e microbiota dos sedimentos (LAANBROEK, 2010).

Por outro lado, estudos em áreas inundáveis demonstram que as taxas de emissão de CO₂ superam consideravelmente as de CH₄. Estudando as emissões da planície de inundação do Rio Amazonas, Richey et al. (2002) calcularam que a emissão anual de CO₂ é de aproximadamente 210 Tg C,

enquanto que as emissões de metano totalizam cerca de 6,8 Tg C/ano (MELACK et al., 2004).

Contudo, estas estimativas ainda são consideradas conservadoras, e estudos de maior escala podem apresentar estimativas das emissões de gases do efeito estufa (GEE) das áreas inundáveis do Rio Amazonas (RICHEY et al., 2002; RUDORFF et al., 2011). Tais estudos geralmente segregam as medições em três tipos de ambientes: florestas inundadas, macrófitas aquáticas e águas abertas (ENGLE; MELACK, 2000; MELACK et al., 2004; RUDORFF et al., 2011). Estes três ambientes apresentam grande variação de área em função das características hidrológicas das áreas alagáveis tropicais, as quais resultam em variações sazonais do fluxo de CH₄ para a atmosfera.

Na planície de inundação amazônica, a distribuição espacial destes ambientes é claramente influenciada pelo regime hidrológico. A precipitação na região amazônica é sazonal, com estação chuvosa de dezembro a abril e estação seca de junho a outubro (JUNK, 1997). Esta distribuição sazonal da chuva produz grandes variações do nível d'água nos rios e na planície de inundação do Rio Amazonas.

O pulso de inundação origina-se da precipitação nas nascentes do Rio Amazonas, quando as massas de ar se encontram com a Cordilheira dos Andes, e ganha magnitude em direção à jusante pelo efeito acumulativo da enorme bacia hidrográfica sob as precipitações tropicais. No Baixo Rio Amazonas, o pico do pulso de inundação ocorre com um tempo de retardo de quatro a seis semanas, em relação ao pico de precipitação na bacia, em função sua grande dimensão e complexidade hidráulica (PAPA et al., 2008).

Embora diversos estudos tenham contribuído para a caracterização dos aspectos hidrológicos e biogeoquímicos relacionados à grande variação espaço-temporal de nível d'água (SILVA et al., 2010; MARTINEZ; LE TOAN,

2007; HESS et al., 2003) ainda são escassas as informações que contemplem a variabilidade da área inundada em diversas fases do pulso de inundação.

Dados de sensoriamento remoto, especialmente de Radares de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar*, SAR), representam uma ferramenta eficiente para o monitoramento da variação da área inundada na planície de inundação do Rio Amazonas, pois as técnicas tradicionais *in situ* são limitadas por questões de acesso, custos e logística. As principais vantagens dos dados de SAR sobre as imagens ópticas são sua relativa independência das condições atmosféricas e de iluminação, e a operação em comprimentos de onda com capacidade de penetrar nos dosséis da vegetação, fundamentais para identificar a presença de água abaixo das áreas cobertas por vegetação (WOODHOUSE, 2006). O mapeamento da inundação abaixo de vegetações permanentes e temporárias ainda é um dos maiores desafios do sensoriamento remoto óptico na planície de inundação do Rio Amazonas.

Considerando a ampla dimensão desta planície de inundação, apenas imagens recorrentes de amplo campo de visada podem subsidiar estimativas de área inundada durante todas as fases do pulso de inundação. Nos últimos anos, o modo ScanSAR do sensor PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), com um campo de visada de 360 Km, permitiu a aquisição de séries temporais de imagens para toda a região amazônica, possibilitando este tipo de análise.

Contudo, a variação sazonal do nível d'água na planície de inundação do Rio Amazonas tem efeito sobre os processos de espalhamento resultantes da interação entre a radiação eletromagnética deste sensor e os tipos de cobertura da terra. Por esta razão, é fundamental que o retroespalhamento registrado pelo sensor seja adequadamente caracterizado antes que sejam extraídas informações de inundação das imagens. Para as imagens ScanSAR, o amplo campo de visada intensifica o efeito do ângulo de incidência sobre as

propriedades de espalhamento dos tipos de cobertura da terra, somado às variações dos processos de espalhamento. Ocorre um decaimento do retroespalhamento ao longo do campo de visada das imagens (ARDILA et al., 2010) e, portanto, uma análise da variação de retroespalhamento em função do ângulo de incidência é importante para caracterizar adequadamente como os diferentes tipos de cobertura respondem a este efeito e como ele pode afetar o mapeamento da área inundada.

Recentemente, algumas técnicas de classificação digital de imagens têm sido utilizadas para mapear a dinâmica da inundação em áreas inundáveis utilizando dados de SAR (HESS et al., 2003; FRAPPART et al., 2005; MARTINEZ; LE TOAN, 2007). Entretanto, nestes dados o efeito inerente do *speckle* representa uma limitação às técnicas de classificação *pixel a pixel*, as quais geralmente utilizam técnicas de filtragem (SANT'ANNA; MASCARENHAS, 1996) ou algoritmos de classificação que considerem a não normalidade das distribuições dos alvos em dados de SAR (FRERY et al., 2007). Uma alternativa interessante são os algoritmos de classificação orientada ao objeto, os quais minimizam o efeito do *speckle* por analisar as estatísticas das regiões (conjunto de *pixels* vizinhos) e não dos *pixels* isolados (COSTA, 2004; SILVA et al., 2010). Estas abordagens podem também considerar outras propriedades dos objetos que não o retroespalhamento, tais como os padrões temporais, dados complementares (ópticos ou topográficos) e o contexto espacial das classes (BENZ et al., 2004).

1.1. Objetivo

Este trabalho teve como objetivo monitorar a variação na extensão total inundada na planície de inundação do Lago Grande de Curuai (LGC), durante os anos de 2006 a 2010, utilizando imagens ScanSAR/ALOS. Para tanto foram estabelecidos três objetivos específicos:

- Analisar o efeito das características de imageamento (ângulo de incidência e condição de inundação), das propriedades dos alvos (tipos de cobertura da terra) e das variações sazonais observadas sobre o retroespalhamento registrado para estes alvos em imagens do sensor PALSAR/ALOS, modo ScanSAR;
- Mapear a extensão inundada na planície de inundação do LGC, por meio da técnica de classificação orientada ao objeto, para uma série de imagens ScanSAR disponíveis para o período de 2006 a 2010; e
- Estimar a área total inundada na planície de inundação do LGC no período analisado e ajustar um modelo para previsões de área inundada na área de estudo a partir de dados de nível d'água.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos:

- **CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA:** neste estão reunidos conceitos e técnicas aplicadas em trabalhos anteriores referentes aos aspectos hidrológicos da planície de inundação do Rio Amazonas, à utilização de dados de SAR para o mapeamento de áreas inundáveis e à classificação automática de imagens de SAR;
- **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS:** em que são apresentados a área de estudo, os dados utilizados na pesquisa e a metodologia aplicada para o monitoramento das áreas inundadas;
- **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO:** apresentação dos resultados obtidos na pesquisa e discussão dos mesmos; e
- **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES:** neste capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados, bem como recomendação para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Aspectos hidrológicos da planície de inundação do Rio Amazonas

As planícies de inundação são periodicamente inundadas por águas de diferentes origens (pluvial, fluvial e subterrânea), uma condição que tem efeitos específicos sobre os organismos que ali habitam (JUNK, 1997). No entanto, a principal fonte de água é a fluvial, devido à localização da planície de inundação (adjacente ao canal principal do rio) (BONNET et al., 2008).

O conceito de pulso de inundação (*flood pulse*) foi introduzido por Junk et al. (1989) para definir a periodicidade com que a planície de inundação do Rio Amazonas é inundada. Neste conceito, o Rio e a planície de inundação são considerados como uma unidade integrada, devido ao constante intercâmbio de água, sedimentos e nutrientes.

Quanto mais elevado o nível d'água, mais conectado está o sistema rio-planície de inundação, o que faz com que as áreas de várzea assumam ao longo do pulso de inundação uma função intermediária entre sistemas abertos (de transporte) e fechados (de acúmulo) de água e outras substâncias. As grandes dimensões da Bacia do Rio Amazonas implicam em variações sazonais significativas do nível d'água nos corpos d'água da planície de inundação do Baixo Amazonas (Rio e lagos adjacentes) (ALSDORF et al., 2000).

As características hidrológicas de um pulso de inundação incluem a frequência (número de picos – monomodal, bimodal, polimodal ou regime de maré), a amplitude de variação do nível d'água, a duração e a previsibilidade de ocorrência (JUNK, 1997). A planície de inundação da calha principal do Rio Amazonas representa aproximadamente 12 % de todas as áreas inundáveis da Bacia (de extensão superior a 800.000 km², MELACK; HESS, 2010), com um pulso de inundação de comportamento monomodal anual, de ocorrência bastante previsível ao longo do ano (período de cheia de maio a julho e período

de seca de outubro a dezembro) e variação sazonal média do nível d'água no Baixo Rio Amazonas (da divisa entre os estados de Amazonas e Pará até a confluência com o Rio Xingu) de aproximadamente 5 a 7 metros (JUNK, 1997). A diferença temporal entre os picos anuais de precipitação e de vazão em uma estação fluviométrica localizada no Baixo Rio Amazonas (estação de Óbidos da ANA – Agência Nacional das Águas - Figura 2.1) deve-se, principalmente, à dimensão desta bacia hidrográfica e aos longos tempos de concentração e deslocamento da água na rede hidrográfica do Amazonas (PAPA et al., 2008).

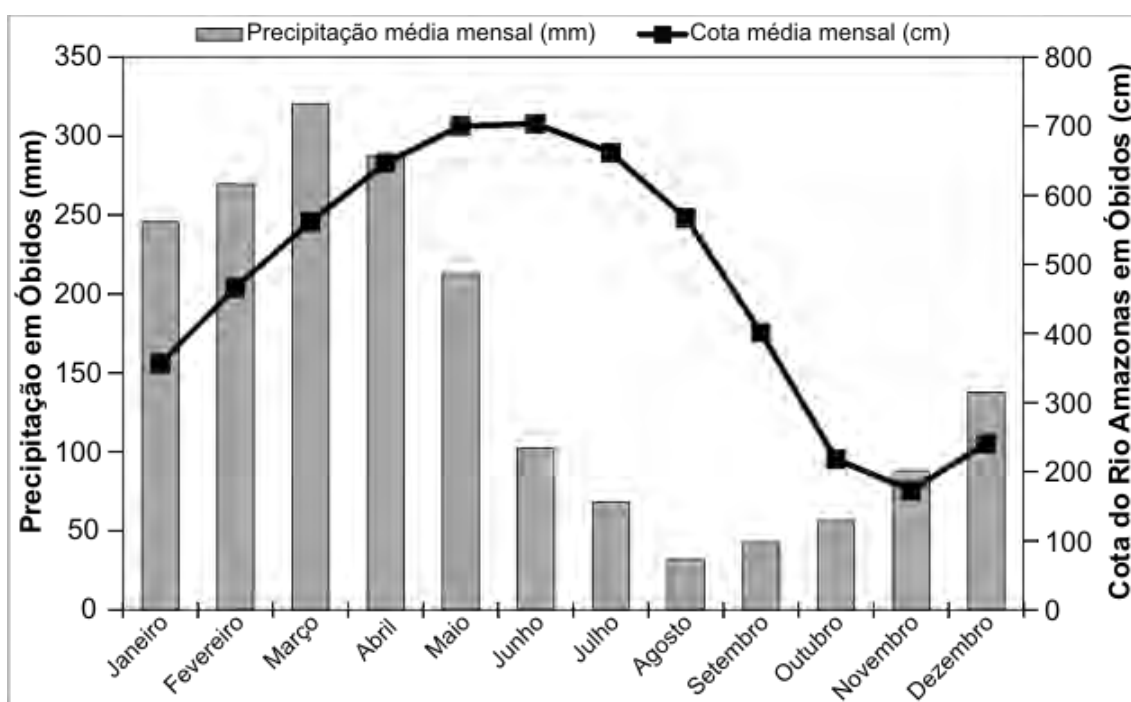


Figura 2.1 – Médias mensais de precipitação e cota na estação de Óbidos (Baixo Rio Amazonas) fornecidas pela ANA para o período de 1971 a 2007.

A grande amplitude sazonal do nível d'água no Baixo Amazonas resulta em uma intensa diferença das áreas inundadas na planície do Rio Amazonas. A Figura 2.2, por exemplo, apresenta detalhes de imagens TM/Landsat-5 da mesma área da planície de inundação do LGC (Baixo Amazonas) em duas fases do pulso de inundação (diferença do nível d'água de 446 cm), ilustrando esta grande diferença de área inundada. Tal variação tem impactos significativos nas trocas de gases do efeito estufa com a atmosfera (RICHEY et

al., 2002; RUDORFF et al., 2011) e sua estimativa ao longo do pulso de inundação foi alvo de recentes estudos (BARBOSA, 2005; BONNET et al., 2008).

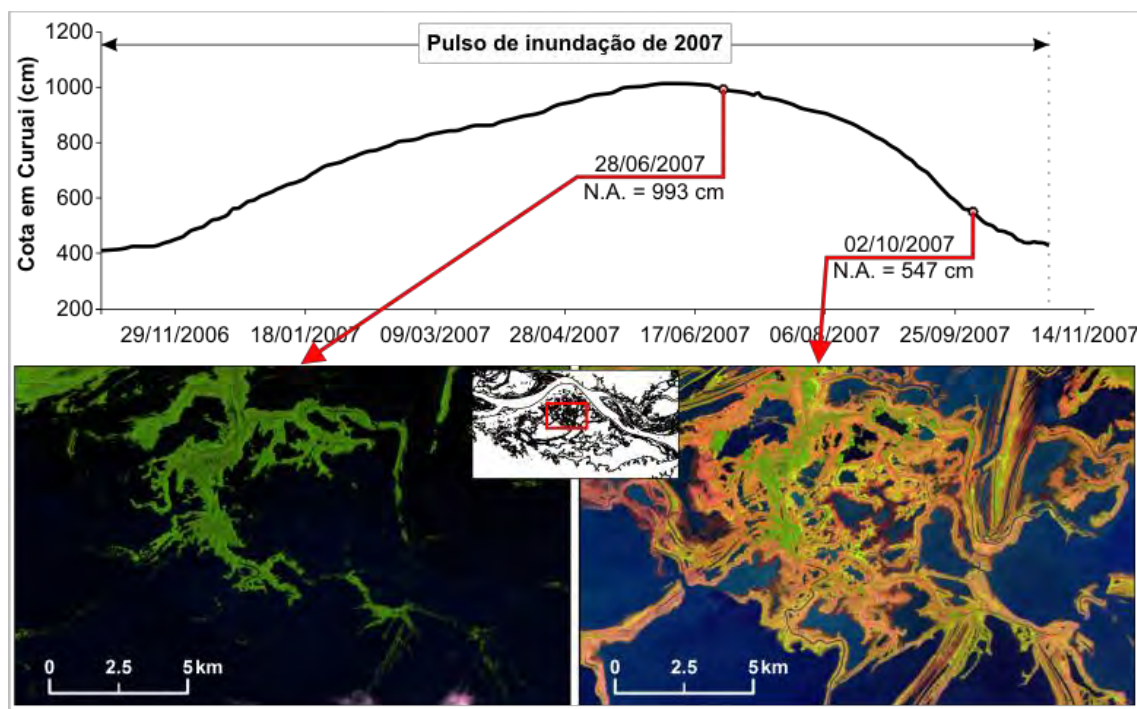


Figura 2.2 – Detalhes de imagens TM/Landsat-5 (composição R5G4B3) da mesma área da planície de inundação do LGC (Baixo Amazonas) em duas fases do pulso de inundação do ano de 2007. Onde N.A. é o nível d'água na estação de Curuai da ANA.

Visando estimar a área inundada de águas abertas e o volume que passa por uma área específica, a planície de inundação do LGC no Pará, Barbosa (2005) mapeou as áreas de águas abertas com dados ópticos de sensoriamento remoto (imagens Landsat-5) e realizou um levantamento batimétrico de alta resolução vertical (1 cm) e resolução espacial de 15 m nos lagos da planície (BARBOSA et al., 2006). A geração do modelo de elevação digital a partir dos dados de batimetria permitiu estimar de forma precisa a variação de área e volume de água na planície, considerando que a topografia da planície é uma componente fundamental da circulação da água. Barbosa (2005) calculou as áreas de água aberta de duas formas: i) a partir de uma série histórica de imagens TM/Landsat-5 (1983 a 2004); e ii) com base no modelo batimétrico.

As áreas inundadas mapeadas com base na banda 5 (infravermelho) do TM/Landsat-5 e as áreas inundadas estimadas pelos dados batimétricos foram relacionadas com o nível d'água em Curuai por modelos de regressão polinomial de segundo grau. Os resultados entre os modelos ajustados foram semelhantes (com elevados coeficientes de determinação - Figura 2.3), e as conclusões foram de que o nível d'água na Planície do LGC é um bom indicador da área inundada pelas águas abertas.

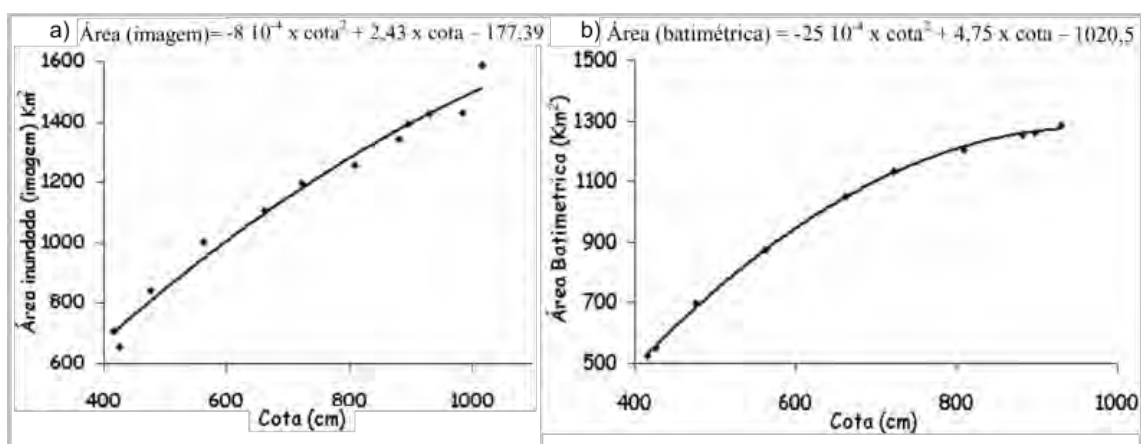


Figura 2.3 – Modelos de regressão relacionando cota com área de água aberta: a) obtidas a partir das imagens Landsat-5; e b) obtidas a partir de dados batimétricos.

Fonte: Barbosa (2005).

Contudo, a análise de Barbosa (2005) foi realizada a partir de imagens ópticas, as quais limitam o mapeamento às áreas de águas abertas, ao invés da delimitação da extensão total alagada na planície, que inclui também a área ocupada por florestas inundadas e macrófitas aquáticas. As discrepâncias entre as áreas de água abertas e as áreas totais alagadas podem ser elevadas, considerando as variações sazonais de comunidades de macrófitas (SILVA et al., 2010) e da extensão inundada em áreas de florestas de topografia predominantemente plana na planície de inundação do Rio Amazonas (HESS et al., 2003).

Outra abordagem para o estudo específico da dinâmica da circulação da água na Planície do LGC foi aplicada por Bonnet et al. (2008), na qual foram

utilizadas técnicas de modelagem hidrológica e de sensoriamento remoto. Neste estudo as variações do nível d'água do LGC também foram relacionadas com as áreas inundadas das superfícies dos lagos, mapeadas com base em uma série temporal de imagens do sensor SAR JERS-1 (*Japanese Earth Resource Satellite*) durante o período de 1997 a 2003 (MARTINEZ; LE TOAN, 2007). Contudo, duas considerações importantes devem ser feitas sobre o modelo ajustado: i) o mapeamento das áreas inundadas baseado nas imagens JERS-1 apresentou uma baixa exatidão global, de aproximadamente 30%; e ii) as áreas inundadas foram relacionadas ao nível d'água na Planície do LGC por meio de um modelo de regressão linear:

$$\text{Área inundada (km}^2\text{)} = (2,16 \pm 0,08) \times NA - (35 \pm 65) \quad (2.1)$$

Onde: NA é o nível d'água na estação de Curuai (em cm).

Diferentemente de Barbosa (2005), que adotou um ajuste polinomial com a justificativa de que este melhor representa a tendência de redução da taxa de crescimento da área inundada para cotas mais elevadas e estabilização a partir de uma determinada cota, o modelo ajustado por Bonnet et al. (2008) foi linear desconsiderando este aspecto. No entanto, este trabalho apresentou como principais resultados as estimativas das trocas de água entre a planície de inundação do LGC e o Rio Amazonas. Foi realizada uma modelagem hidrológica, método HEVa, para calcular o balanço hídrico da Planície (entradas menos saídas) conhecendo: i) a relação entre as áreas superficiais dos lagos e os níveis d'água na estação de Curuai da ANA; ii) níveis d'água e vazões dos canais que ligam os lagos entre si e com o Rio Amazonas; iii) precipitação (direta sobre os lagos e escoamento superficial das áreas de captação); e iv) estimativa de evapotranspiração.

No período modelado por Bonnet et al. (2008), a acumulação média anual de água iniciou-se entre dezembro e fevereiro e durou até junho, enquanto que no

restante do ano a água foi exportada da planície para o rio, ocorrendo as maiores taxas de exportação de água em agosto e setembro. Os resultados da modelagem também indicaram que a maior entrada anual de água para a planície de inundação do LGC é do Rio Amazonas (77%), e que as contribuições de precipitações, drenagem de terra firme e água subterrânea representam 9%, 10% e 4%, respectivamente.

No entanto, os valores modelados podem apresentar incertezas relativas aos dados de entrada, especialmente considerando que o mapeamento das inundações apresentou baixa acurácia (MARTINEZ; LE TOAN, 2007) e, como realizado por Barbosa (2005), também considerou apenas as áreas de águas abertas (superfícies dos lagos). A elaboração de um modelo que relacione a área total inundada e o nível d'água ao longo do pulso de inundação requer a utilização de técnicas de mapeamento com dados de SAR, os quais apresentam vantagens sobre os dados ópticos para o mapeamento de áreas inundadas.

2.2. Aplicações de dados de SAR para o mapeamento de áreas inundáveis

A maior limitação no uso operacional de dados ópticos de sensoriamento remoto na região amazônica é a cobertura de nuvens característica de áreas tropicais, a qual limita a aquisição de imagens que capturem suas variações sazonais. Os maiores comprimentos de onda dos sensores que operam de forma ativa na faixa das micro-ondas (i.e., radares de abertura sintética – SAR) permitem a aquisição de dados em diversas condições atmosféricas desfavoráveis (i.e. cobertura de nuvens).

Outra vantagem do SAR em relação aos dados ópticos é a capacidade de penetração da radiação em alguns comprimentos de onda das micro-ondas em dosséis de florestas inundadas e plantas aquáticas densas, o que favorece o

mapeamento de áreas inundadas (HESS et al., 1990). Segundo Henderson e Lewis (2008), os estudos destas áreas com dados de SAR dependem das especificações do sensor (comprimento de onda, polarizações e ângulo de incidência, por exemplo) e das características dos alvos do ambiente analisado (tais como forma geométrica, rugosidade da superfície e constante dielétrica).

Nas áreas inundáveis, três são os mecanismos dominantes de retroespalhamento dos alvos: reflexão de canto, também conhecida como “*double bounce*”; espalhamento volumétrico, ou de dossel; e espalhamento de superfície. O *double bounce* ocorre quando a radiação incide consecutivamente em duas superfícies posicionadas a aproximadamente 90° (tronco e superfície d’água, por exemplo) e retorna ao radar (Figura 2.4a) (WOODHOUSE, 2006).

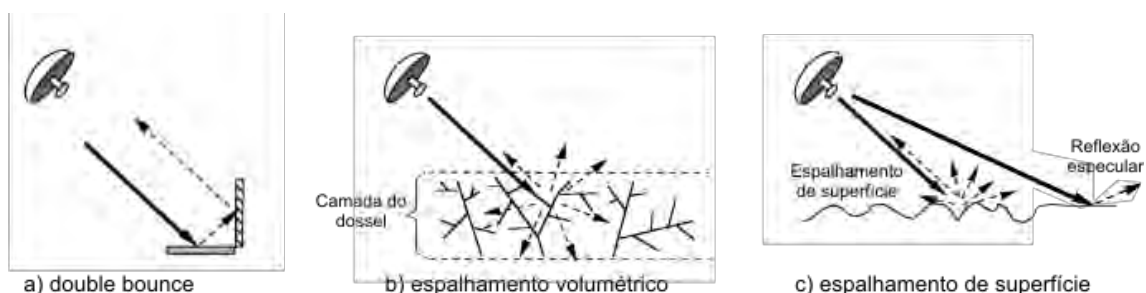


Figura 2.4 - Mecanismos de espalhamento: a) reflexão de canto (ou *double bounce*); b) espalhamento volumétrico (ou de dossel); e c) espalhamento de superfície.

Fonte: Adaptado de Freeman e Durden (1998).

A ocorrência dos mecanismos de espalhamento é dependente do comprimento de onda do SAR. No caso de florestas inundadas, por exemplo, quanto maior o comprimento de onda (bandas L – 24 cm e P – 68,2 cm), maior será a penetração da radiação nos alvos, e conseqüentemente maior será o sinal retroespalhado devido à ocorrência do *double bounce* (FREEMAN; DURDEN, 1998).

Por outro lado, com comprimentos de onda menores (bandas X – 3 cm e C – 5,7 cm) a penetração da radiação no dossel é reduzida e ocorrem

principalmente os espalhamentos de superfície e volumétrico. O espalhamento volumétrico ocorre quando a radiação interage com diversos elementos do dossel, sendo espalhada em múltiplas direções (Figura 2.4b) (HENDERSON; LEWIS, 1998). Já o espalhamento de superfície (Figura 2.4c) ocorre quando a radiação incide em uma superfície simples (solo ou água aberta, por exemplo), e neste caso o sinal de retorno irá depender da rugosidade da superfície e do ângulo de incidência da radiação.

Para o melhor entendimento das propriedades de uma imagem de SAR adquirida em áreas inundáveis, é necessário conhecer a geometria de aquisição característica dos sensores radar. A Figura 2.5 apresenta os principais componentes geométricos desta aquisição para um terreno plano (JENSEN, 2007):

- Direção de azimute: é a direção em que a plataforma que transporta o SAR trafega;
- Direção de *range* (de alcance ou de visada): é a direção do pulso emitido pela antena, a qual é perpendicular à direção de deslocamento da plataforma que transporta o SAR. O terreno mais próximo atingido pela radiação é denominado de *near range* (alcance próximo) e o mais distante é chamado de *far range* (alcance distante);
- Ângulo de depressão (γ): é medido entre o plano horizontal que se estende a partir da base da plataforma e o pulso de energia da antena ao longo da linha de visada do radar;
- Ângulo de visada (Φ): é medido entre a vertical da antena à superfície do terreno (nadir) e a linha de visada do radar;
- Ângulo de incidência (θ): é formado entre o pulso de energia do radar e a linha perpendicular à superfície da Terra, no ponto em que a radiação incide no solo.

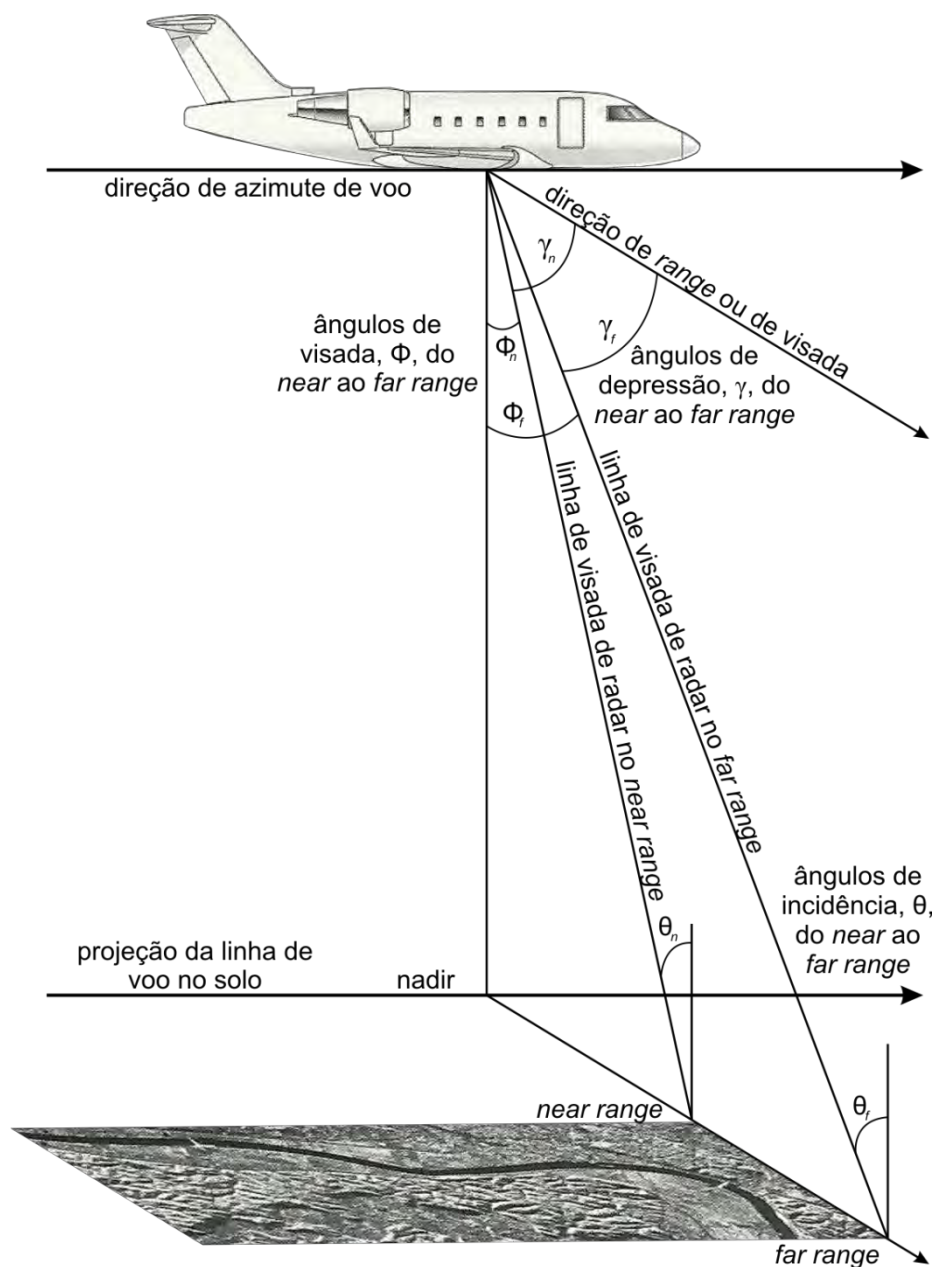


Figura 2.5 – Características da geometria de aquisição de imagens de SAR. A figura apresenta um sistema de radar aerotransportado, mas os princípios são igualmente aplicáveis a um sistema de radar orbital.
 Fonte: Adaptado de Jensen (2007).

Para um terreno é plano, o ângulo de incidência é o complemento do ângulo de depressão ($\theta = 90 - \gamma$), mas se o terreno não for plano, não há relação entre estes dois ângulos (JENSEN, 2007). Neste caso, o ângulo de incidência melhor representa a relação entre o feixe de radiação e a declividade da superfície (como representado na Figura 2.6).

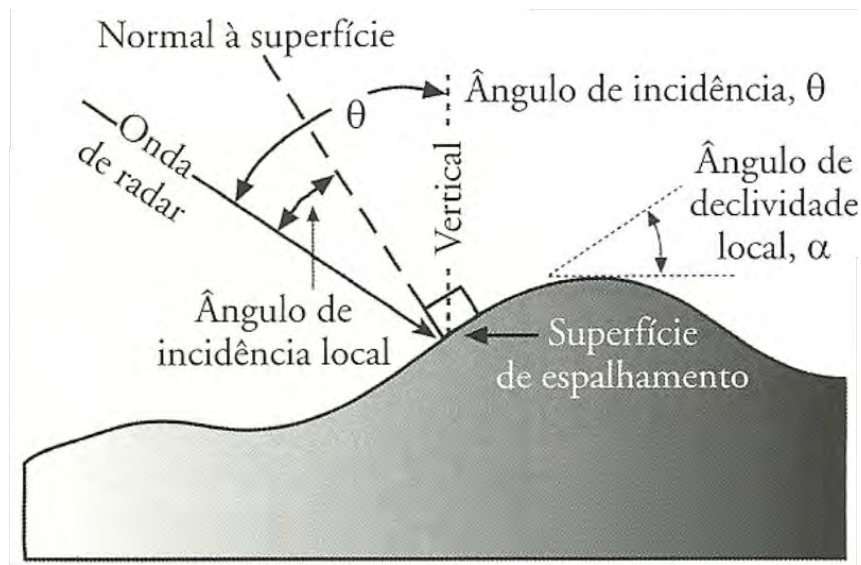


Figura 2.6 – Representação das relações entre o ângulo de incidência do radar (θ), a vertical verdadeira para um terreno não plano e o ângulo de declividade local (α) do mesmo.
 Fonte: Jensen (2007).

As áreas inundáveis são compostas por alvos predominantemente planos, tais como as áreas de águas abertas. Nas superfícies d'água, maiores ângulos de incidência implicam em menores sinais de retorno, ao passo que o aumento da rugosidade aumenta o sinal retroespalhado. Uma teoria que justifica a variação do retroespalhamento das superfícies d'água em função do ângulo de incidência é o modelo de ressonância de Bragg, comumente aplicado a superfícies dos oceanos (ROBINSON, 2004). Segundo o modelo de Bragg, nas imagens de SAR ocorre um decaimento aproximadamente linear do retroespalhamento das superfícies d'água ao longo dos ângulos de incidência que variam de 20 a 70° (considerados intermediários) (Figura 2.7).

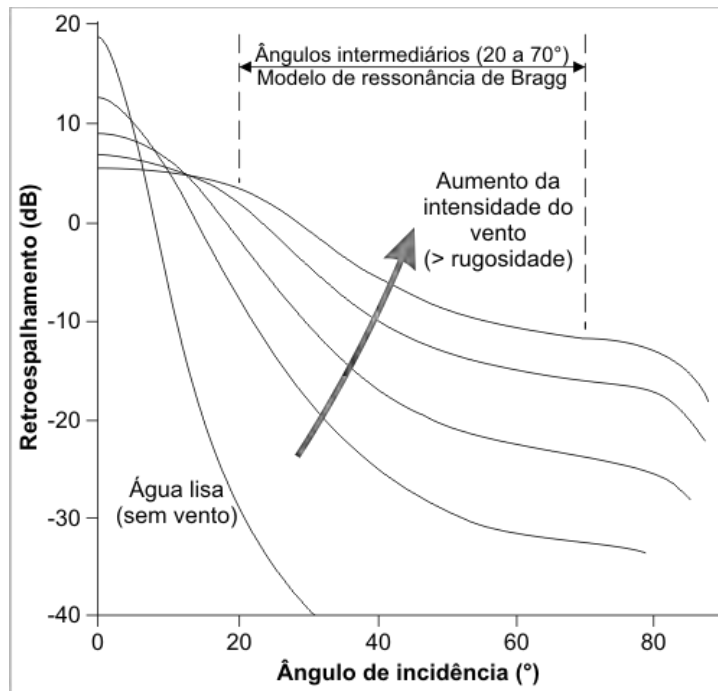


Figura 2.7 – Esquema das medições típicas de retroespalhamento de superfícies do mar em função do ângulo de incidência para intensidades variáveis de vento e conseqüente rugosidade.
 Fonte: Adaptado de Robinson (2004).

De acordo com este modelo, se as ondas superficiais provocadas pela ação do vento estiverem igualmente espaçadas e apresentarem um comprimento de onda que atenda à condição de Bragg, a ressonância de Bragg implicará em um aumento no retroespalhamento causado pela superfície d'água. A condição de Bragg é representada pela equação:

$$\lambda_w = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

Onde: λ_w é o comprimento de onda da superfície d'água induzido pela ação do vento (em unidade métrica), λ é o comprimento de onda do radar (em unidade métrica) e θ é o ângulo de incidência (em graus).

Segundo Martin (2004), esta condição é principalmente atendida nos menores comprimentos de onda, o que resulta em uma diminuição do retroespalhamento à medida que cresce o ângulo de incidência das imagens

de SAR. Esta ampla variação do retroespalhamento dos corpos d'água em função do ângulo de incidência pode impor dificuldades para a classificação automática de dados de imagens de SAR com amplo campo de visada.

Em outros alvos das planícies de inundação, o ângulo de incidência também pode implicar em variações que devem ser consideradas para caracterização do retroespalhamento ao longo do campo de visada das imagens (ARDILA et al., 2010). Em áreas de florestas, por exemplo, à medida que o ângulo de incidência aumenta, o caminho percorrido pela radiação através do dossel aumenta, favorecendo o espalhamento volumétrico e diminuindo a ocorrência do *double bounce* (HESS et al., 1990). Entretanto, Lang et al. (2008) destacam que as florestas inundadas são mais susceptíveis ao efeito do ângulo de incidência do que as não inundadas, pois a superfície d'água abaixo do dossel faz com que ocorra reflexão especular da radiação para os ângulos de incidência mais oblíquos. Para estes autores, isto faz com que os retroespalhamentos das áreas de floresta inundada e não inundada aproximem-se nos maiores ângulos de incidência das imagens de SAR, podendo dificultar a discriminação destes tipos de cobertura.

Ardila et al. (2010) analisaram a variação do retroespalhamento em áreas de florestas (densa, densa inundada, úmida alta e baixa) do Orinoco Colombiano em imagens do sensor PALSAR, modo ScanSAR, com amplo campo de visada (360 km), e variação no ângulo de incidência de 18 a 43°. Após aplicar dois métodos de correção radiométrica (normalização do retroespalhamento pelo cosseno do ângulo de incidência e modelo estendido água-nuvem), os autores concluem que, apesar dos modelos serem capazes de reduzir o efeito do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento, este efeito deve sempre ser considerado em análises radiométricas com estes dados.

Outro parâmetro dos sensores SAR capaz de influenciar a interação da radiação eletromagnética com os alvos de áreas alagadas é a polarização.

Para identificar florestas inundadas, por exemplo, imagens das configurações co-polarizadas (HH ou VV) são preferidas em relação a sistemas de polarização cruzada (HV ou VH) (HESS et al., 1990; TOWNSEND, 2002). Já Wang et al. (1995) compararam o sinal retroespalhado de uma floresta inundada nas duas configurações co-polarizados (HH e VV), para os mesmos comprimento de onda e ângulo de incidência, e verificaram que a razão entre os retroespalhamentos da floresta inundada e da floresta não inundada foi maior na polarização HH do que na polarização VV. Em estudos de mapeamento de áreas inundáveis, a polarização HH tem sido amplamente utilizada (SCHMULLIUS; EVANS, 1997; NOVO et al., 2002; HESS et al., 2003; EVANS et al., 2010; SILVA et al., 2010), tendo em vista que muitos sensores coletam dados nesta polarização.

Além das características de imageamento dos sensores SAR, também é fundamental o estudo dos efeitos resultantes das características biofísicas dos principais tipos de cobertura da terra nas planícies de inundações sobre o retroespalhamento, antes da aplicação de técnicas de classificação digital de imagens (HESS et al., 1995; HESS et al., 2003; COSTA, 2004; MARTINEZ; LE TOAN, 2007). O retroespalhamento de plantas herbáceas aquáticas (ou macrófitas), por exemplo, é dependente de características biofísicas das espécies predominantes, tais como altura, densidade, distribuição, orientação, forma das folhas e constante dielétrica (COSTA et al., 2002; SILVA et al., 2008; SARTORI et al., 2010).

A interação da radiação com as florestas da planície de inundações também é influenciada pela estrutura da floresta (altura das árvores, ângulo dominante das ramificações, formato das copas e densidade dos dosséis), mas o aumento significativo do sinal retroespalhado deve-se, principalmente, ao mecanismo *double bounce* (Figura 2.8) (HESS et al., 1990). Em áreas de floresta não inundada ocorrem múltiplos mecanismos de espalhamento (WANG et al., 1995) mas, se estas apresentarem dosséis de elevada biomassa, a predominância do

espalhamento volumétrico resulta em alto sinal retroespalhado em imagens de SAR adquiridas em banda L (SANTOS et al., 2002).

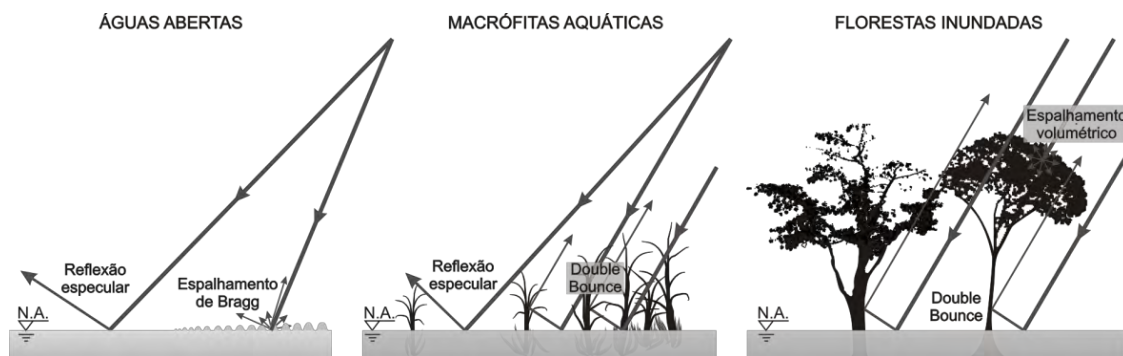


Figura 2.8 - Mecanismos de espalhamento predominantes que ocorrem na interação da radiação eletromagnética (banda L) com os alvos das áreas inundáveis. N.A = nível d'água.

Fonte: Adaptado de Henderson e Lewis (1998).

Nas áreas de águas abertas, como mencionado anteriormente, os mecanismos de espalhamento predominantes, na banda L, são a reflexão especular e o espalhamento de Bragg (dependendo do ângulo de incidência). Desta forma, o retroespalhamento deste alvo é, geralmente, menos intenso do que a maioria dos demais tipos de cobertura da terra, dependendo do ângulo de incidência (HENDERSON; LEWIS, 2008). As áreas de solo exposto e de vegetação herbácea seca também podem representar superfícies lisas no comprimento de onda da banda L, resultando em espalhamento de superfície. Nestas áreas, o retroespalhamento é dependente da umidade (quanto mais úmido, maior o retroespalhamento devido ao aumento da constante dielétrica) e da rugosidade do solo (BALENZANO et al., 2011; ULABY et al., 1996; SHI et al., 1997).

2.3. Técnicas de classificação de imagens de SAR

Após o estudo das características do sensor e da interação entre a radiação eletromagnética e os tipos de cobertura, o mapeamento da inundação pode ser realizado por técnicas de classificação digital de imagens. Existem diversas técnicas utilizadas na classificação das imagens de SAR.

As abordagens de classificação digital de imagens de sensoriamento remoto são utilizadas para extrair informações temáticas dos tipos de cobertura da terra (JENSEN, 2005). As classificações podem ser categorizadas em dois tipos de algoritmos:

- Classificação supervisionada: inclui a etapa de coleta de amostras das classes previamente conhecidas pelo analista, seja pela utilização complementar de dados de campo ou de interpretações em imagens de alta resolução. Esta etapa é chamada de treinamento, pois o algoritmo classificador é treinado a discriminar as classes com base nas estatísticas das amostras; e
- Classificação não supervisionada: não inclui a etapa de treinamento, sendo que o algoritmo divide a imagem em classes (número definido pelo usuário) de acordo com suas similaridades espectrais.

Estudos de imagens de SAR demonstraram que os classificadores não supervisionados e supervisionados podem apresentar resultados robustos de classificação quando são disponíveis dados de multipolarizações (CLOUDE; POTTIER, 1997; FRERY et al., 2007). Entretanto, no caso de dados em uma única polarização, as variações radiométricas dentro da cena decorrentes de efeitos de aquisição de imagens (como o ângulo de incidência) podem implicar em resultados de classificação de menor acurácia (RICHARDS, 2009).

As abordagens de classificação de imagens também são divididas quanto à unidade básica de processamento das imagens: por *pixels* ou por objetos (ou regiões - conjunto de *pixels* homogêneos vizinhos) (JENSEN, 2005). A maior limitação das classificações por *pixel* em imagens de SAR é a elevada variabilidade radiométrica causada pelo *speckle*, efeito que resulta da interferência entre os ecos coerentes dos espalhadores individuais situados dentro de um elemento de resolução (WOODHOUSE, 2006). A combinação entre os ecos coerentes pode ser representada graficamente utilizando a

notação complexa, onde o sinal de retorno é um vetor resultante dos ecos de todos os espalhadores (Figura 2.9).

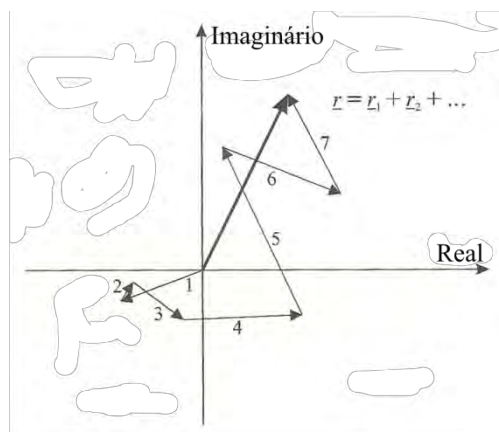


Figura 2.9 – Vetor resultante dos ecos coerentes de múltiplos espalhadores localizados em um elemento de resolução.
Fonte: Woodhouse (2006).

Este efeito pode ser minimizado nas classificações orientadas ao objeto, em que os elementos de análise são os segmentos (ou objetos) de imagens, formados por um conjunto de *pixels* vizinhos agrupados por similaridade no processo de segmentação (THIEL et al., 2008).

Outra vantagem das abordagens orientadas ao objeto para dados de SAR é a inclusão de características contextuais dos objetos na estruturação de uma árvore de decisão hierárquica. Nas árvores de decisão, as classes são estruturadas em níveis hierárquicos e são discriminadas segundo uma sequência lógica de regras de decisão que consideram não apenas as estatísticas radiométricas das imagens de SAR dos objetos, mas também outras características, como padrão temporal, forma geométrica, tamanho, dados ópticos complementares e contexto espacial (SILVA et al., 2010; BENZ et al., 2004).

Vale destacar, entretanto, que a utilização do critério multi-temporal no mapeamento de áreas inundáveis não é apenas exclusiva de abordagens

orientadas ao objeto, mas também é aplicada a classificações *pixel a pixel* (HESS et al., 2003; FRAPPART et al., 2005; MARTINEZ; LE TOAN, 2007). O estudo de Martinez e Le Toan (2007) utilizou uma série temporal de 21 imagens do SAR JERS-1, adquiridas ao longo dos anos de 1993 a 1997, para mapear os tipos de cobertura da terra e a duração média em que cada *pixel* fica exposto à inundação do Rio Amazonas. Apenas os limiares de estimadores de mudana temporal (Média do coeficiente de retroespalhamento e Mudana temporal) foram utilizados para segregar as classes (Figura 2.10). Entretanto, ocorreu grande confusão entre as classes de rugosidade semelhante (principalmente solo e água aberta), o que implicou em uma baixa exatidão global do mapeamento das áreas inundadas (aproximadamente 30%). Este problema poderia ser minimizado caso fossem considerados também dados ópticos complementares.

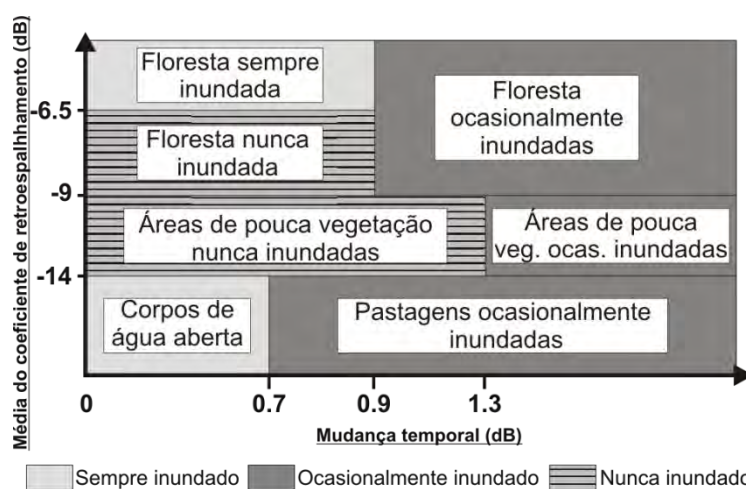


Figura 2.10 – Limiares multi-temporais do classificador utilizado por Martinez e Le Toan (2007) para o mapeamento da dinâmica de inundao e das coberturas da terra.

Fonte: Adaptado de Martinez e Le Toan (2007).

2.3.1. Segmentao de imagens

A segmentao de imagens é um pré-requisito para classificao pela abordagem orientada ao objeto. Esta etapa consiste na subdivisão da imagem em grupos de *pixels* vizinhos que correspondem a alvos homogêneos,

chamados de objetos (ou regiões) (BENZ et al., 2004). Existem diversos algoritmos de segmentação de imagens, os quais consideram diferentes critérios de homogeneidade para a criação de objetos (JENSEN, 2005).

Alguns destes algoritmos são específicos para imagens de SAR (SOUSA JUNIOR et al., 2005; DONG et al., 1999), considerando a natureza não gaussiana das distribuições estatísticas destes dados. Entretanto, uma alternativa aplicada por recentes estudos para segmentar estes dados visando à classificação orientada ao objeto é a segmentação multiresolução implementada no aplicativo e-Cognition 8 (BENZ et al., 2004; EVANS et al., 2010; SILVA et al., 2010).

O algoritmo multiresolução do e-Cognition 8 é uma técnica de crescimento de regiões por etapas, que se inicia em *pixels* isolados. Em cada etapa, um par de objetos adjacentes é unido de acordo com o menor aumento de heterogeneidade definida para o processo. Este algoritmo é controlado pelo usuário por meio de três parâmetros: i) escala (*scale*): determina a tolerância máxima de heterogeneidade dos objetos (e por sua vez, o tamanho deles); ii) forma (*shape*): determina o grau relativo de importância da forma do objeto versus a radiometria; iii) compactidade (*compactness*): determina o grau de suavização das bordas dos objetos (BENZ et al., 2004; DEFINIENS, 2008).

O grande diferencial deste algoritmo é, no entanto, a possibilidade de considerar-se mais de uma imagem no processo de segmentação, por meio da ponderação dos dados disponíveis. Os dados são considerados como feições dos objetos pelo e-Cognition 8. A utilização deste método de segmentação é vantajosa em áreas de intensa variação sazonal como é o caso das áreas inundáveis.

Para o mapeamento da variação espaço-temporal das comunidades de macrófitas, por exemplo, Silva et al. (2010) utilizaram o algoritmo

multiresolução na identificação de objetos que levassem em conta o domínio temporal, tendo como entradas a imagem de média da série temporal e a imagem da data de menor nível d'água para uma série de dados Radarsat-1. O critério temporal também foi utilizado por Evans et al. (2010) na fase de segmentação de uma classificação orientada ao objeto aplicada para mapear a dinâmica espaço-temporal da inundação do Pantanal brasileiro. Por meio do algoritmo multiresolução, os autores utilizaram os dados de SAR (PALSAR/ALOS) da cheia e da seca para a identificação dos objetos.

2.3.2. Classificação hierárquica por árvore de decisão

Uma vez que a imagem esteja dividida em objetos, uma forma de classificá-los é por meio da estruturação de uma árvore de decisão hierárquica. Segundo Jensen (2005), uma árvore de decisão divide classes a partir das propriedades dos objetos (representadas por seus atributos). Primeiramente, de acordo com o objetivo do projeto, devem ser identificadas as classes de interesse, as quais devem ser estruturadas segundo níveis hierárquicos discrimináveis a partir de suas características radiométricas e de variação temporal. Depois disso, são extraídas as regras de decisão que permitirão segregar estas classes a partir de limiares de classificação dos atributos disponíveis.

Silva et al. (2010), por exemplo, estruturaram suas classes em três níveis: um 1º nível com classes de padrões temporais constantes ao longo do pulso de inundação (“terra firme”, “planície de inundação” e “água aberta permanente”); um 2º nível que dividiu a classe ‘planície de inundação’ em três possíveis tipos de cobertura (‘Florestas Inundáveis’, ‘Arbustos Inundáveis’ e ‘Possíveis Macrófitas’); e um 3º nível em que a classe ‘Possíveis Macrófitas’ foi dividida nos possíveis tipos de cobertura destas áreas de maior variação sazonal (‘Solo’, ‘Macrófitas’ e ‘Água aberta’). Neste estudo, as regras de classificação consideraram atributos radiométricos e de variação sazonal dos dados de SAR (Radarsat 1), topográficos (SRTM) e ópticos (MODIS).

Uma alternativa para a obtenção de limiares para as regras de classificação são as técnicas de mineração de dados. Segundo Witten e Frank (2005), a mineração de dados é o processo de identificação de padrões nos dados. Existem diversas técnicas de mineração de dados, mas neste tópico será destacada apenas a técnica de árvore de decisão. Os algoritmos de árvore de decisão de mineração de dados são baseados na lógica dividir-e-conquistar (*divide-and-conquer*), em que regras de decisão são criadas a partir dos atributos numéricos das classes para dividi-las em subclasses (WITTEN; FRANK, 2005).

O algoritmo de árvore de decisão mais utilizado em mineração de dados é o C4.5, desenvolvido por Quinlan (1993). Uma versão deste algoritmo está implementada no aplicativo gratuito de mineração de dados *WEKA data mining*, desenvolvido pela Universidade de Waikato, na Nova Zelândia, e recebe o nome de J4.8. Este algoritmo é alimentado por uma tabela, na qual uma coluna é das classes de interesse e as demais são de atributos que serão explorados para a segregação das mesmas. Como resultados, além da árvore de decisão, é calculada a exatidão global e o índice kappa da árvore de decisão por validação cruzada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

A planície de inundação do LGC está localizada ao longo do Baixo Rio Amazonas (aproximadamente a 900 km da foz) e sua hidrógrafa varia sazonalmente (de 5 a 7 metros) e anualmente (até 2 metros) (Figura 3.1). A amplitude sazonal, aliada à topografia predominantemente plana da região, resulta em uma variação significativa da área inundada ao longo do ano. A precipitação média anual é de aproximadamente 1800 mm (período de 1970 a 2007) na estação de Óbidos (da ANA), sendo os meses mais chuvosos observados entre fevereiro e abril. Os níveis máximos d'água nesta parte do Rio Amazonas ocorrem com um retardo de aproximadamente 3 meses (entre maio e junho), enquanto que os menores níveis d'água são normalmente observados entre outubro e novembro.

Devido às suas características hidrológicas, à proximidade da cidade de Santarém (PA) e à existência de uma estação fluviométrica permanente no lago principal, a planície de inundação do LGC tem sido o foco de diversos estudos relacionados à qualidade da água, dinâmicas de trocas d'água, distribuição da vegetação aquática, desflorestamento e trocas de carbono com a atmosfera (MOREIRA-TURCQ et al., 2004; NOVO et al., 2006; MARTINEZ; LE TOAN, 2007; BONNET et al., 2008; BARBOSA et al., 2010; ALCÂNTARA et al., 2010; AFFONSO et al., 2011a; RENÓ et al. 2011; SILVA et al., 2011; RUDORFF et al. 2011).

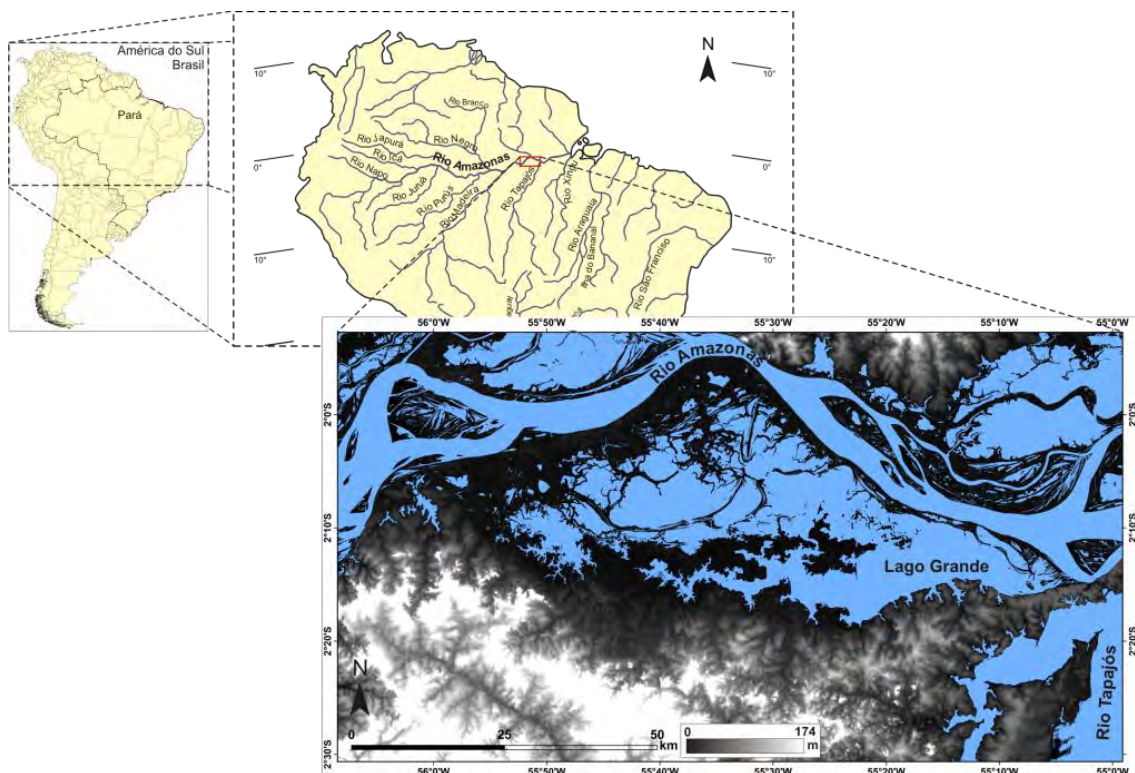


Figura 3.1 - Mapa de localização da planície de inundação LGC – PA (nível d'água no LGC de 6,81m - 25/08/2005 sobre o Modelo digital de elevação - MDE - do SRTM).

3.2. Trabalho de campo

Durante a fase de enchente do pulso de inundação de 2011 foi realizado um trabalho de campo para auxiliar na classificação dos tipos de cobertura da planície de inundação do LGC. Este trabalho durou cinco dias (de 5 a 10 de Abril/2011, nível d'água médio de 950 cm) e seu objetivo principal foi identificar, por meio de anotações e registros fotográficos, os principais tipos de cobertura da área de estudo. Estes dados foram posteriormente utilizados nas etapas de coleta de amostras para análise de retroespalhamento das imagens PALSAR/ALOS e validação dos resultados da classificação. O principal material utilizado foi uma máquina fotográfica com GPS acoplado (modelo RICOH 500SEW), que permitiu que as fotografias contivessem informações de localização geográfica (coordenadas adquiridas no sistema cartográfico Lat Long WGS84) e direção em relação ao Norte. Foram registradas mais de 1000

fotografias espalhadas em diversas localidades da área de estudo (como mostrado na Figura 3.2), sendo todas adquiridas a partir de embarcações, ou seja, não houve trabalho em terra firme.

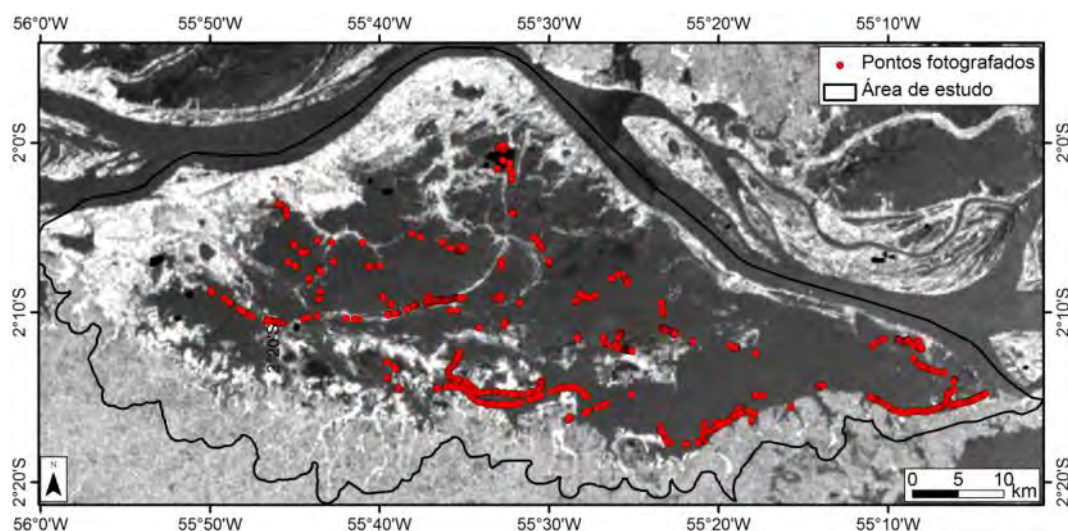


Figura 3.2 – Pontos fotografados durante o trabalho de campo na planície de inundação do Lago Grande de Curuai (PA). Imagem ScanSAR/ALOS de 18/07/2007 (NA=959 cm).
© JAXA/METI 2007.

Identificaram-se cinco tipos principais de cobertura da terra, os quais foram posteriormente classificados no processo de mapeamento da inundação:

- Águas abertas: áreas inundadas livres de cobertura por qualquer tipo de vegetação (Figura 3.3), com diferentes rugosidades decorrentes da presença e intensidade do vento;



Figura 3.3 – Fotografias de áreas de água aberta registradas na planície de inundação do LGC. Em a) é possível notar-se a maior rugosidade da superfície d'água, em função da maior intensidade do vento.

- Macrófitas: vegetação aquática herbácea com diferentes rugosidades, dependentes da composição de espécies e densidade e biomassa de indivíduos (Figura 3.4), variando de macrófitas flutuantes de baixa altura e biomassa (< 30 cm) a macrófitas emergentes altas e com grande densidade (até 2 m de altura acima d'água);

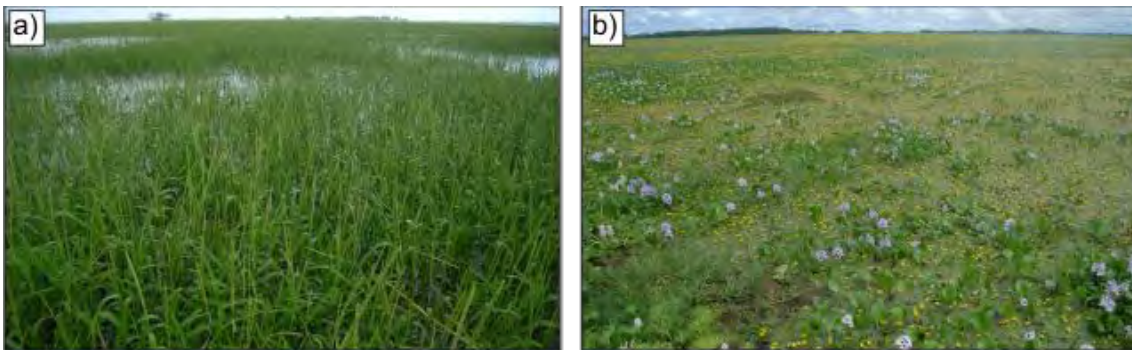


Figura 3.4 – Fotografias de áreas de macrófitas registradas na planície de inundação do LGC. a) macrófitas emergentes e b) macrófitas flutuantes.

- Florestas inundadas: árvores e arbustos com diferentes características biofísicas (altura dos dosséis variando aproximadamente de 3 a 15 m) com a presença de superfície d'água abaixo do dossel (Figura 3.5);

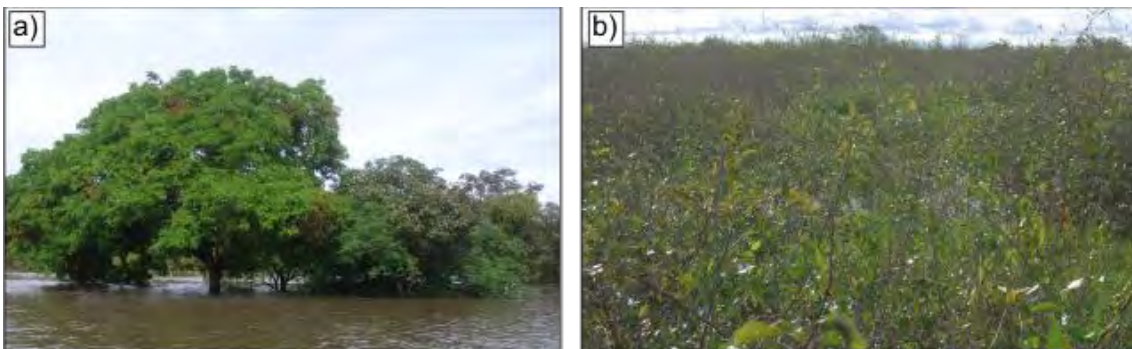


Figura 3.5 – Fotografias de áreas de florestas inundadas registradas na planície de inundação do LGC. a) florestas e b) arbustos.

- Florestas não inundadas: árvores e arbustos sem a presença de água abaixo dos dosséis; em função do elevado nível d'água na ocasião do trabalho de campo, estas áreas eram muito reduzidas dentro da planície e

foram principalmente visualizadas em áreas de terra firme (não houve registros de suas características biofísicas) (Figura 3.6); e

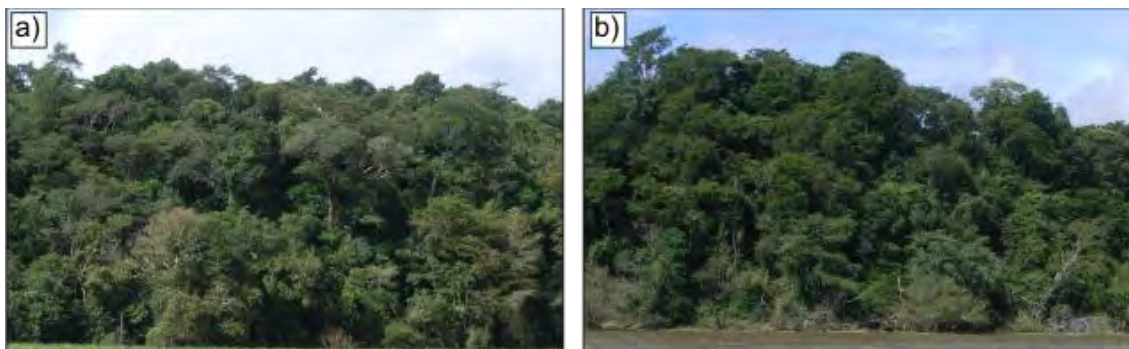


Figura 3.6 – Fotografias de áreas de florestas não inundadas e arbustos inundados registradas na planície de inundação do LGC.

- Solo: áreas de solo exposto e de vegetação herbácea seca; durante o campo, estas áreas limitavam-se aos limites dos lagos da Planície (i.e. ‘praias’), pois o nível d’água era elevado (Figura 3.7).

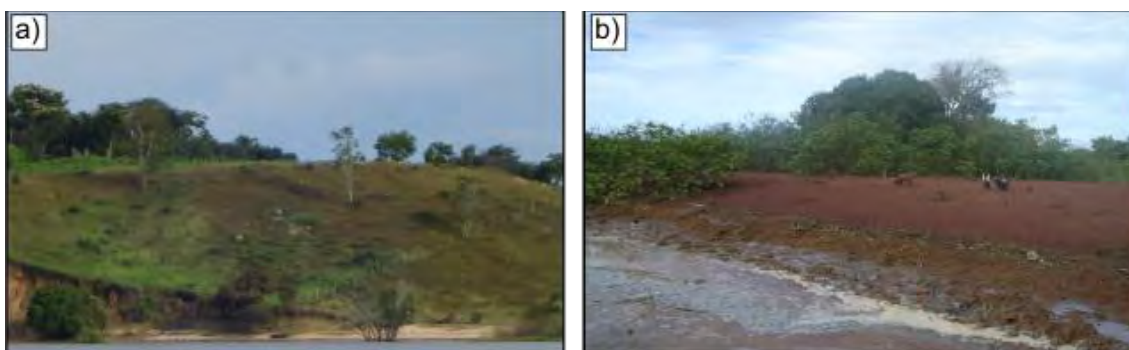


Figura 3.7 – Fotografias de áreas de solo registradas na planície de inundação do LGC. a) vegetação herbácea seca e b) solo exposto.

3.3. Dados utilizados

Neste trabalho foram utilizados os seguintes dados:

- Quatorze imagens do sensor PALSAR/ALOS, modo de observação ScanSAR, adquiridas no período de 2006 a 2010;
- Oito imagens do sensor TM/Landsat-5, adquiridas no período de 2006 a 2009;

- Doze imagens de reflectância de superfície do sensor MODIS (Terra e Aqua) adquiridas nos anos de 2006 a 2010;
- Dados fluviométricos da estação de Curuai da ANA (estação número 17060000); e
- Modelos digitais de elevação (MDE) da missão SRTM e do levantamento batimétrico realizado por Barbosa (2005).

O satélite ALOS foi lançado em Janeiro de 2006 pela agência espacial japonesa (JAXA - *Japan Space Exploration Agency*) e encerrou suas operações em maio de 2011 (Tabela 3.1). Ele apresentava o sensor PALSAR que operava em banda L (23,5 cm) e tinha entre seus modos de observação o chamado modo ScanSAR. A principal característica deste modo era sua ampla largura de campo de visada (360 km), que visava o monitoramento de mudanças contínuas ao longo do ano pela aquisição de imagens a cada 46 dias. Para as áreas sujeitas à inundação, as aquisições de imagens eram agendadas ao longo de um ciclo completo de inundação (de uma seca à outra) (ROSENQVIST et al., 2007).

Tabela 3.1 - Características do satélite ALOS e do modo de observação ScanSAR do sensor PALSAR.

Satélite ALOS	
Altitude	691,65 km
Características de órbita	Polar, sol síncrona, descendente
Frequência de revisita	46 dias
Carga útil	PRISM (<i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>) AVNIR (<i>Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer type 2</i>) PALSAR
Modo de observação ScanSAR/PALSAR	
Largura do campo de visada	360 km
Comprimento de onda central	23,5 cm
Espaçamento entre <i>pixels</i>	100 m
Ângulo de incidência	18,1 a 43,0°
Polarização operacional	HH

Fonte: Rosenqvist et al. (2007).

Esta ampla largura do campo de visada, contudo, implica em grande variação do ângulo de incidência ($18,1^\circ$ a $43,0^\circ$), podendo causar diferenças significativas no retroespalhamento registrado ao longo do campo de visada da imagem (ARDILA et al., 2010). Deve-se destacar também que o retroespalhamento das imagens ScanSAR/ALOS utilizadas pode ter sido afetado pela rotação de Faraday (LE VINE et al., 2007), que diminui a qualidade radiométrica dos dados de SAR adquiridos em banda L. Entretanto, devido à complexidade em detectar-se este efeito (MEYER; NICOLL, 2008), não foram realizados procedimentos de correção para a rotação de Faraday.

A órbita 409 do modo ScanSAR recobre toda a área da Planície do LGC (Figura 3.8) e, portanto, as doze imagens utilizadas para o mapeamento da inundação correspondem a esta órbita (datas de aquisição das imagens estão apresentadas nas Figuras 3.9 e 3.10). Duas imagens das órbitas adjacentes, 412 e 406 (cuja área da planície estudada apresenta-se no *near* e no *far range*, respectivamente – Figura 3.8), foram adquiridas para as datas de 23/07/2007 e 13/07/2007, e utilizadas durante a análise do efeito do ângulo de incidência nos dados ScanSAR/ALOS. Estas cenas apresentam uma pequena sobreposição entre si (aproximadamente 3 km).

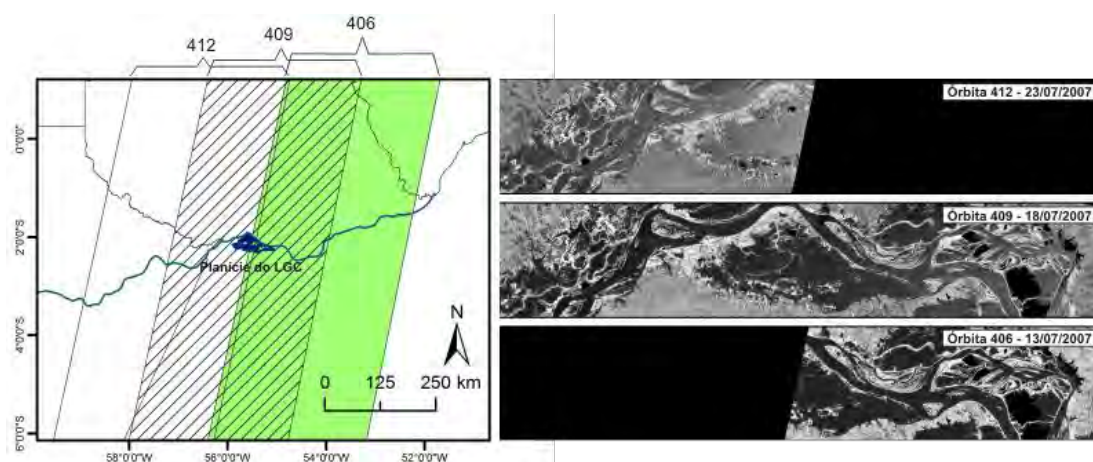


Figura 3.8 - Órbitas do modo ScanSAR recobrendo a planície de inundação do LGC, e três imagens destas órbitas em datas próximas: 412 – 23/07/2007; 409 – 18/07/2007; e 406 – 13/07/2007.
© JAXA/METI 2007.

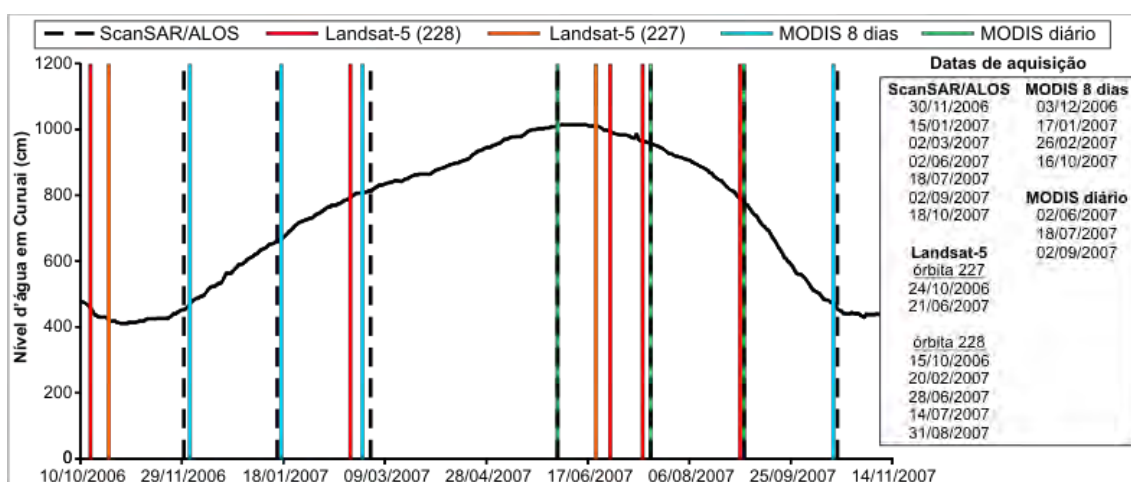


Figura 3.9 - Datas de aquisição das imagens ScanSAR/ALOS, Landsat-5 (órbitas 227 e 228) e MODIS (produtos diário e de 8 dias) utilizadas para o período do pulso de inundação de 2007 e o nível d'água na estação de Curuai da ANA nestas datas.

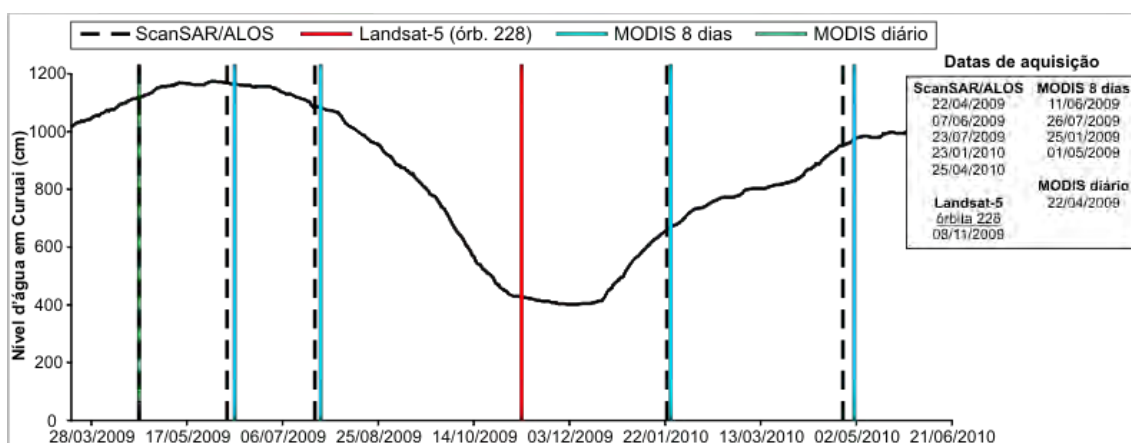


Figura 3.10 - Datas de aquisição das imagens ScanSAR/ALOS, Landsat-5 (órbita 228) e MODIS (produtos diário e de 8 dias) utilizadas para o período dos anos de 2009 e 2010 e o nível d'água na estação de Curuai da ANA nestas datas.

Todas as cenas foram adquiridas no âmbito da Iniciativa Kyoto & Carbon (K&C) (ROSENQVIST et al., 2007). Elas foram processadas utilizando o protocolo desenvolvido para a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*)-*MEASURES Inundated Wetlands Earth System Data Record* (Chapman et al., 2010), que consiste no co-registro das cenas com o MDE SRTM, correção quanto aos efeitos topográficos, remoção de artefatos, correção de padrões da antena e calibração absoluta. Os produtos resultantes para cada órbita

ScanSAR são as imagens: corrigidas quanto ao efeito do terreno (em amplitude e 16 bits), de ângulo de incidência local e sem correção quanto ao terreno. As imagens utilizadas na pesquisa foram processadas com 8 looks em azimute e 1 look em range (nível de processamento 1,5), espaçamento de *pixels* de 100 metros, projeção cartográfica Lat Long e datum WGS 84. Durante todo o trabalho optou-se por utilizar as imagens no formato amplitude, sendo os valores convertidos para coeficiente de retroespalhamento normalizado (σ^0) (expresso em termos de dB) apenas para comparação com trabalhos anteriores, e somente para os valores das estatísticas descritivas das classes.

Com o aplicativo ENVI 4.7 geraram-se imagens temporais que posteriormente foram utilizadas durante a classificação para os dois períodos analisados: pulso de inundação de 2007 e anos de 2009 e 2010. Para cada período obtiveram-se cinco imagens temporais que auxiliaram a identificação de padrões de variação sazonal das classes: Média Temporal do Retroespalhamento (MTR) (média dos pixels das imagens consideradas), Desvio padrão Temporal do Retroespalhamento (DTR) (desvio padrão dos pixels das imagens consideradas), Retroespalhamento da Cheia (RC), Retroespalhamento da Seca (RS) e Razão dos retroespalhamentos da Cheia sobre a Seca (C/S). A Tabela 3.2 apresenta as datas utilizadas para cada período. Para o período dos anos de 2009 e 2010 optou-se por utilizar toda a série temporal no cálculo das imagens MTR e DTR porque, com exceção da data de 23/01/10, as imagens deste ano apresentavam níveis d'água muito elevados, e as épocas de menor cota não seriam representadas nas imagens temporais.

Tabela 3.2 – Imagens temporais utilizadas para os dois períodos analisados: pulso de inundação de 2007 e anos de 2009 e 2010.

Período	Imagem Temporal	Datas das imagens ScanSAR utilizadas
Pulso de inundação de 2007	MTR	30/11/06; 15/01/07; 02/03/07; 02/06/07; 18/07/07; 02/09/07; 18/10/07
	DTR	30/11/06; 15/01/07; 02/03/07; 02/06/07; 18/07/07; 02/09/07; 18/10/07
	RC	02/06/07
	RS	30/11/06
	C/S	02/06/07; 30/11/06
Anos de 2009 e 2010	MTR	30/11/06; 15/01/07; 02/03/07; 02/06/07; 18/07/07; 02/09/07; 18/10/07; 22/04/09; 07/06/09; 23/07/09; 23/01/10; 25/04/10
	DTR	30/11/06; 15/01/07; 02/03/07; 02/06/07; 18/07/07; 02/09/07; 18/10/07; 22/04/09; 07/06/09; 23/07/09; 23/01/10; 25/04/10
	RC	07/06/09
	RS	23/01/10
	C/S	07/06/09; 23/01/10

Além do aplicativo ENVI 4.7, utilizado para todas as etapas de processamento das imagens de sensoriamento remoto, também foram utilizados os aplicativos R e Microsoft Excel, para as etapas de análises estatísticas dos dados, e o aplicativo WEKA data mining para a etapa de mineração de dados.

Imagens ópticas foram utilizadas para minimizar a confusão resultante das similaridades de retroespalhamento entre alguns tipos de cobertura do solo presentes na planície do LGC nas imagens ScanSAR. Dois tipos de dados ópticos com diferentes características foram adquiridos para tal finalidade: seis imagens do sensor TM/Landsat-5 e doze imagens de reflectância de superfície do sensor MODIS (Terra e Aqua) (Figuras 3.9 e 3.10). Devido à melhor resolução espacial das imagens TM/Landsat-5, estas imagens foram utilizadas como referência durante todo o estudo (características apresentadas na Tabela 3.3), possibilitando: i) aquisição de áreas amostrais para análise estatística dos dados de SAR; ii) utilização da imagem relativa à seca para classificação das

áreas de água aberta permanente (inundadas ao longo de todo pulso de inundação); e iii) validação dos resultados da classificação.

No entanto, diversas datas de aquisição das imagens ScanSAR não contavam com imagens Landsat-5 livres da cobertura de nuvens em datas ou níveis d'água próximos. Por este motivo, imagens do sensor MODIS (Tabela 3.3), dos satélites Terra e Aqua, foram utilizadas no processo de classificação para discriminar classes em que as distribuições de retroespalhamento se sobrepujam na banda L (por exemplo, água e solo, HESS et al., 2003). Silva et al. (2010) obtiveram sucesso no uso de imagens MODIS para a discriminação de áreas de água aberta, solo exposto e cobertura de macrófitas na região amazônica.

Tabela 3.3 - Características das imagens dos sensores TM/Landsat-5 e MODIS.

Satélite	Sensor	Produtos	Resolução espacial	Bandas espectrais
Landsat-5	TM	---	30 m	1: 0,45 a 0,52 μm 2: 0,52 a 0,60 μm 3: 0,63 a 0,69 μm 4: 0,76 a 0,90 μm 5: 1,55 a 1,75 μm 7: 2,08 a 2,35 μm
Terra	MODIS	Diário: MOD09Q1 8 dias: MOD09GQ	250 m	1: 0,62 a 0,67 μm 2: 0,84 a 0,87 μm
Aqua		Diário: MYD09Q1 8 dias: MYD09GQ		

Apesar do imageamento diário provido pelo sensor MODIS aumentar a probabilidade de aquisição de imagens sem cobertura de nuvens, não foi possível obter imagens adequadas para algumas das datas próximas à aquisição das imagens ScanSAR. Nestes casos, os produtos MODIS de

reflectância de superfície composta para 8 dias (MOD09Q1 e MYD09Q1) foram utilizados como alternativa para suprir a carência de dados ópticos.

Os registros diários de cota (nível d'água) da estação de Curuai (número ANA 17060000), localizada no LGC (coordenadas geográficas 55°28'50,16" O e 2°16'05,88" S), foram obtidos no Portal do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos da ANA (<http://www.ana.gov.br/portalsnirh/>). Como dados topográficos, foram utilizados dois modelos digitais de elevação (MDE): SRTM e levantamento batimétrico de Barbosa (2005). O SRTM, na versão 4, foi obtido no sítio eletrônico da *Consultative Group for International Agriculture Research (CGIAR) - Consortium for Spatial Information (CSI)* (<http://srtm.csi.cgiar.org/>), e apresenta resolução espacial de 3 segundos de arco (Lat Long, datum WGS 84), resolução vertical de 1 metro e um erro absoluto vertical sobre a América do Sul de 6,2 metros (RODRÍGUEZ et al., 2006).

O SRTM foi utilizado no processo de classificação das imagens, principalmente para a discriminação entre áreas de Terra Firme (aquelas que nunca inundam ao longo do pulso de inundação) e Planície de inundação (áreas inundáveis), seguindo a metodologia de Silva et al. (2010). Já o MDE gerado por Barbosa (2005), que dispõe de elevada resolução vertical (1 centímetro) e espacial de 15 metros, é resultado de um levantamento batimétrico realizado na planície de inundação do LGC durante a fase da cheia de 2004 (nível d'água médio de 930 cm) (Barbosa et al., 2006). Com o objetivo de validar as áreas de florestas inundadas, este modelo batimétrico foi acoplado por Conrado Rudorff (em trabalho não publicado) aos dados SRTM para obter um modelo topográfico contínuo, com informações contínuas de altitude deste o fundo dos lagos até as áreas de terra firme. Este modelo foi gerado por meio de uma interpolação dos dados do levantamento batimétrico (realizado nas áreas de águas abertas na maior cota do pulso de inundação de 2004 – 936 cm) com os dados do SRTM obtidos sobre as áreas em que o levantamento batimétrico não foi possível devido à cobertura da terra (bancos de macrófitas, florestas inundadas e áreas

não inundadas). O resultado foi um modelo de elevação de resolução espacial de 50 metros válido para a área da planície de inundação do LGC.

3.4. Metodologia

A metodologia deste estudo foi dividida em três etapas principais: i) análise do retroespalhamento dos tipos de cobertura da planície de inundação do Rio Amazonas nos dados ScanSAR/ALOS; ii) classificação orientada ao objeto para o mapeamento da extensão total inundada na planície de inundação do LGC; e iii) estimativa da área inundada na planície de inundação do LGC (Figura 3.11).

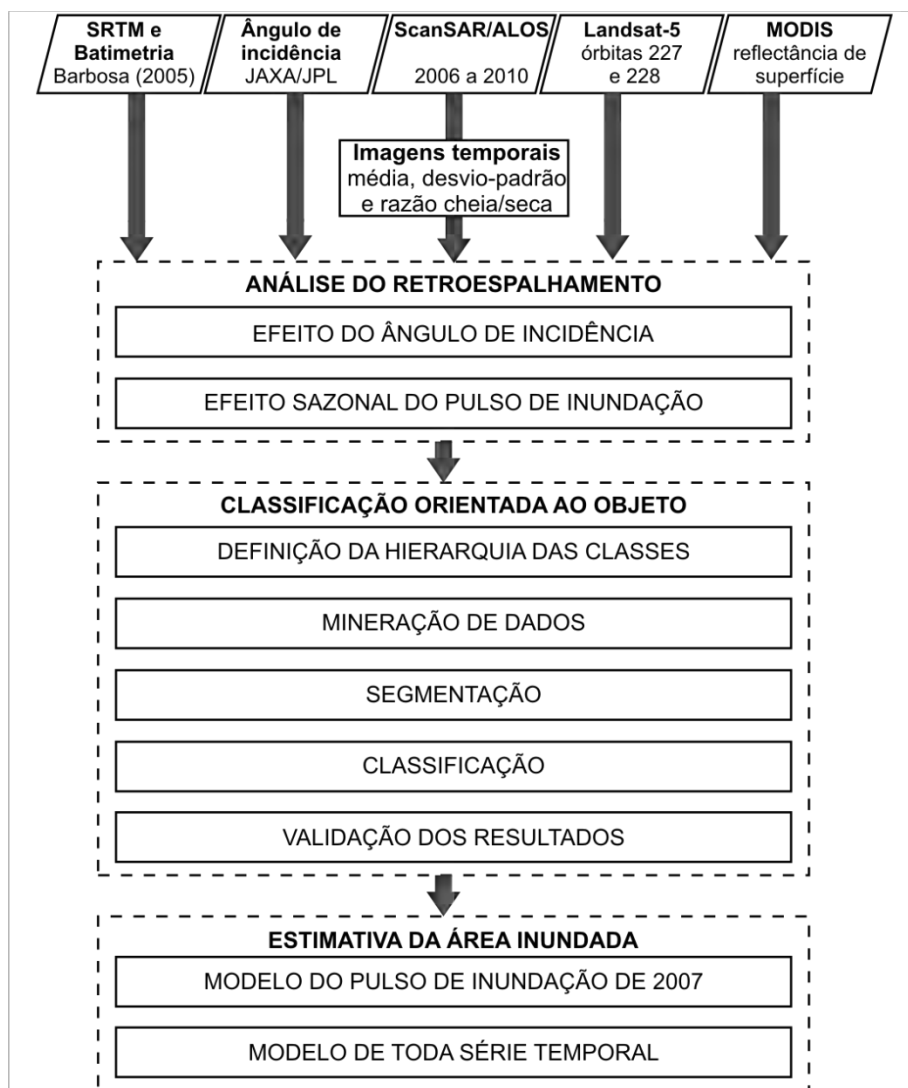


Figura 3.11 – Etapas da metodologia aplicada.

3.4.1. Análise do retroespalhamento

A análise do retroespalhamento dos variados tipos de cobertura da terra nas imagens ScanSAR foi realizada sob dois enfoques: i) efeito do ângulo de incidência sobre a variação do retroespalhamento ao longo do campo de visada das imagens; e ii) efeito da variação sazonal causada pelo pulso de inundação sobre o retroespalhamento dos tipos de cobertura da planície de inundação do LGC.

3.4.1.1. Efeito do ângulo de incidência

Para avaliar o efeito da variação do ângulo de incidência ao longo do campo de visada das imagens ScanSAR/ALOS, o retroespalhamento de alguns alvos foi investigado para testar duas hipóteses.

A primeira, baseada no estudo de Lang et al. (2008), o qual utilizou dados Radarsat-1 em banda C, pressupõe que o retroespalhamento das áreas de floresta inundada é mais afetado pelo efeito do ângulo de incidência do que o das áreas de floresta não inundada. Isto ocorreria porque a presença de superfície d'água abaixo do dossel favoreceria a ocorrência da reflexão especular nos maiores ângulos de incidência, resultando em menores valores de retroespalhamento no *far range*. De acordo com esta hipótese, os valores de retroespalhamento das áreas de florestas inundada e não inundada devem ficar mais semelhantes do *near* para o *far range* da imagem ScanSAR.

A segunda hipótese é a de que o efeito do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento medido em superfícies lisas, para a banda L, pode ser muito distinto dependendo do tipo de interação física ocorrente entre a radiação eletromagnética e o alvo. Se esta hipótese se confirmar, embora as superfícies de solo e água apresentem valores de retroespalhamento muito similares em certos ângulos de incidência, ocorreria uma diferença significativa no sinal de retorno de cada cobertura ao longo do campo de visada das imagens. O

modelo de ressonância de Bragg poderia justificar essas diferenças (ROBINSON, 2004; MARTIN, 2004).

Para testar estas hipóteses, o seguinte procedimento foi realizado: i) georreferenciamento das imagens TM/Landsat-5, livres de cobertura de nuvens, das órbitas 227 e 228 (a Tabela 3.4 apresenta as datas de aquisição e suas respectivas cotas na estação de Curuai); ii) Coleta de amostras das áreas de floresta inundada (FI), floresta não inundada (FNI), solo (S) e águas abertas (AA) nas imagens ScanSAR/ALOS (órbita 409) das datas 30/11/2006 (para S e AA) e 02/06/2007 (para FI e FNI), utilizando como referência os dados de campo e as imagens TM/Landsat-5 georreferenciadas ; e iii) análise estatística da variação de retroespalhamento ao longo do campo de visada das imagens da órbita 409.

Tabela 3.4 – Imagens TM/Landsat-5 utilizadas como referência para a coleta de amostras da análise do ângulo de incidência.

Tipo de cobertura	Data ScanSAR	Nível d'água (cm)	Órbita-Data TM/Landsat-5	Nível d'água (cm)
Floresta não inundada	02/06/2007	1010	228-28/06/2007	993,5
			227-21/06/2007	1010
Floresta inundada	02/06/2007	1010	228-28/06/2007	993,5
			227-21/06/2007	1010
Solo	30/11/2006	452	228-15/10/2006	458
			227-24/10/2006	422
Água aberta	30/11/2006	452	228-15/10/2006	458
			227-24/10/2006	422

As imagens TM/Landsat-5 escolhidas para a análise eram de datas e níveis d'água próximos aos das imagens ScanSAR (Tabela 3.4). Elas foram registradas a partir de imagens TM/Landsat-5 ortorretificadas disponíveis no catálogo GeoCover (sistema de projeção cartográfica Lat Long, datum WGS84) apresentando RMSE inferiores a 0,5 *pixel*.

Amostras das quatro classes analisadas (FI, FNI, S e AA) foram coletadas a cada um grau (1°) de ângulo de incidência, ao longo do campo de visada das imagens da órbita 409. Ao menos uma amostra (polígono) foi coletada para cada ângulo de incidência para as quatro classes, com exceção da classe FNI que não pôde ser amostrada nos ângulos 27° e 28° devido à localização do Rio Tapajós. O tamanho de cada amostra foi proporcional à extensão do tipo de cobertura na área analisada, com os seguintes números mínimos de *pixels*: FI (150), FNI (500), S (150) e AA (500) (a localização das amostras está apresentada na Figura 3.12). O número de amostras mínimo por classe para esta análise foi de 23, sendo que cada uma representava um valor médio de retroespalhamento dos pixels.

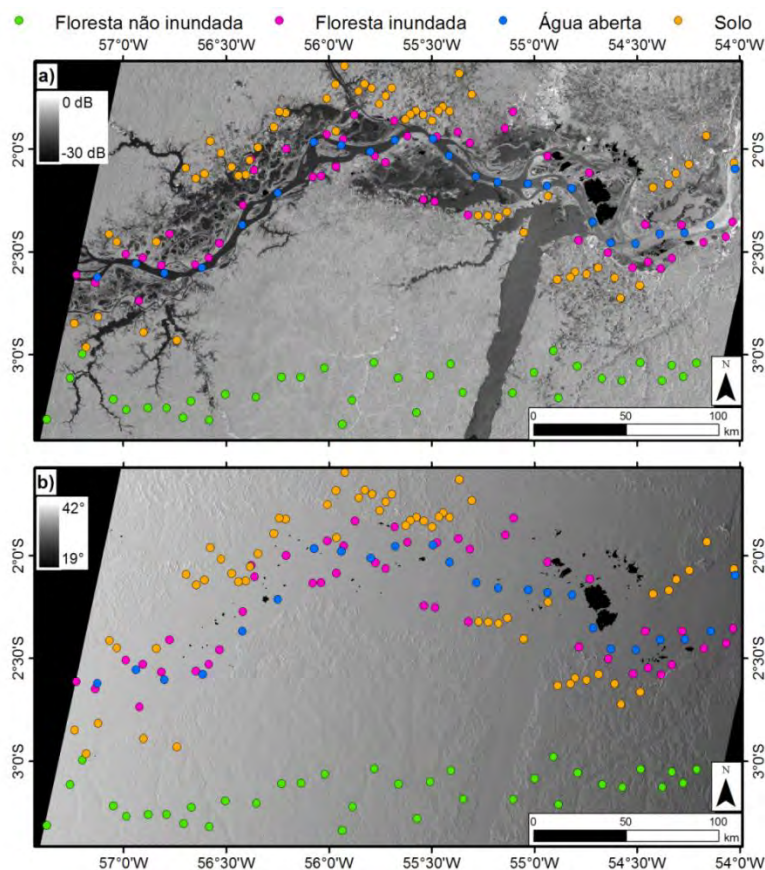


Figura 3.12 – Localização das amostras adquiridas para a análise do ângulo de incidência em: a) imagem ScanSAR filtrada e não corrigida adquirida em 30/11/2006; e b) imagem ângulo de incidência local para as imagens ScanSAR/PALSAR produzidas pela JAXA/JPL no âmbito da Iniciativa K&C. Em ambas as imagens, as áreas pretas não contém dados. © JAXA/METI 2007.

Durante o processo de seleção de amostras, as imagens de ângulo de incidência obtidas também foram investigadas para que os efeitos topográficos sobre o retroespalhamento fossem minimizados. As amostras eram prioritariamente adquiridas em áreas mais planas, sem variações significativas de relevo (Figura 3.13).

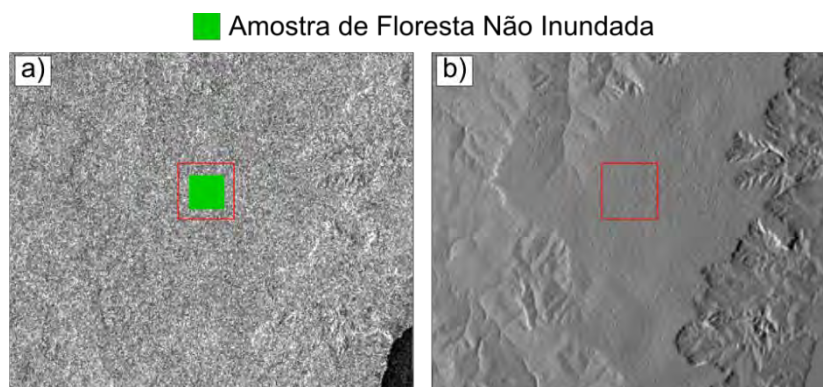


Figura 3.13 – Exemplo de amostra selecionada para a classe Floresta Não Inundada em: a) imagem ScanSAR/ALOS sem correção do ângulo de incidência; e b) imagem de ângulo de incidência gerada pela JAXA a partir do SRTM.
© JAXA/METI 2007.

As duas hipóteses foram testadas estatisticamente utilizando modelos múltiplos de regressão linear, ajustados com o retroespalhamento das classes como variável dependente, em função das variáveis independentes: ângulo de incidência (em graus); e uma variável binária (ou *dummy*) que indicava a presença (1) ou a ausência (0) da correção do terreno quanto ao ângulo de incidência local:

$$\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1(\theta) + \beta_2(\text{corr}) + \beta_3(\text{corr} * \theta) \quad (3.1)$$

Onde: β_i são os coeficientes de regressão, θ é o ângulo de incidência (analisado em graus), σ^0 é o retroespalhamento da classe analisada (analisado em amplitude) e *corr* é a variável binária indica a presença ou ausência de correção do terreno (tendo valores 1 e 0, respectivamente).

Optou-se por utilizar modelos múltiplos lineares para analisar a variação do retroespalhamento das classes em função do ângulo de incidência porque por meio destes seria possível também analisar a eficiência da correção aplicada pela JAXA quanto ao efeito do terreno.

Além disso, analisaram-se as razões entre os valores médios de retroespalhamento nas classes FI e FNI e S e AA para melhor quantificar o efeito do ângulo de incidência. As razões foram calculadas tanto para as imagens corrigidas quanto para aquelas não corrigidas em relação ao efeito do terreno sobre o ângulo de incidência.

Para corroborar a análise do efeito do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento dos tipos de cobertura S e AA, estes alvos também foram analisados em áreas de sobreposição entre as 406 e 412. Para tanto, coletou-se uma amostra de cada alvo, ambas com mais de 160 *pixels*, na faixa de sobreposição entre as cenas (Figura 3.14), e calculou-se o retroespalhamento médio de cada amostra.

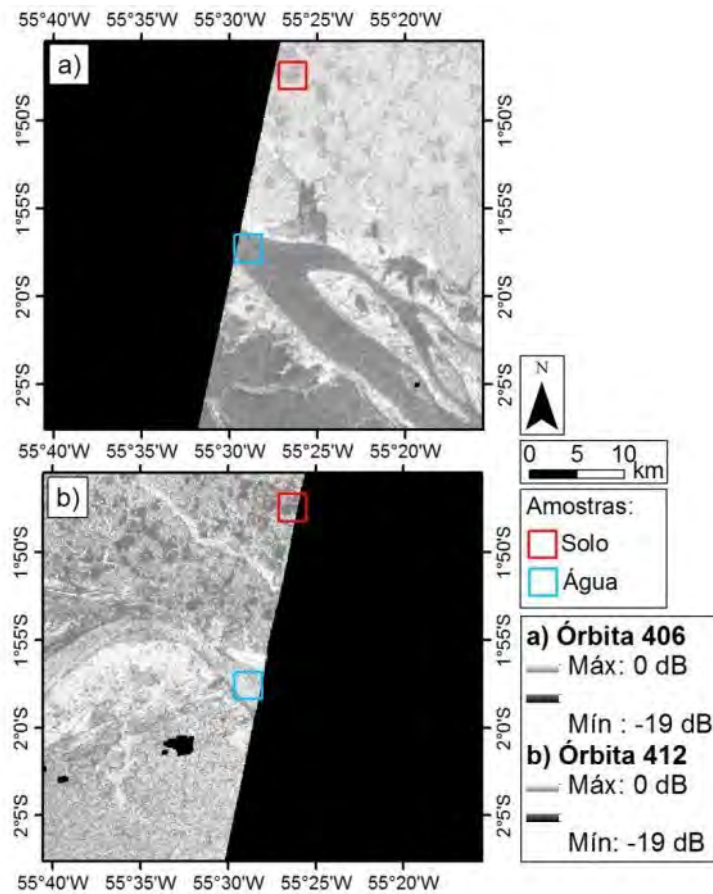


Figura 3.14 – Exemplos de áreas de solo (vermelho) e água (azul) em trechos de imagens ScanSAR/ALOS corrigidas para o efeito do terreno sobre o ângulo de incidência das órbitas: a) 406; e b) 412.
© JAXA/METI 2007.

3.4.1.2. Efeito sazonal do pulso de inundação

Esta etapa consistiu em uma análise detalhada de cada tipo de cobertura da terra na área de interesse, correspondente à planície de inundação do LGC. Estudos anteriores mostraram heterogeneidade significativa no retroespalhamento dos tipos de cobertura das áreas inundáveis Amazônicas, tanto em função das características dos alvos quanto em função da variação sazonal do nível d'água (SILVA et al., 2010; MARTINEZ; LE TOAN, 2007; HESS et al., 1995). Para esta etapa, as classes utilizadas na análise do efeito do ângulo de incidência foram expandidas e modificadas da seguinte forma (Tabela 3.5):

- As classes de floresta foram refinadas para incluir somente as áreas pertencentes à planície de inundação (sujeitas à inundação), e constituem duas classes: Floresta Inundada (FI) e Floresta Não Inundada (FNI);
- As classes de solo foram divididas em dois estados possíveis, de acordo com a intensidade de retroespalhamento: Solo Rugoso/Úmido (SR) e Solo Liso/Seco (SL), apresentando maiores e menores valores de retroespalhamento, respectivamente;
- A classe águas abertas foram subdividida em Lisa (AAL) e Rugosa (AAR), também devido à intensidade de retroespalhamento (presença de vento e espalhamento de Bragg); e
- As áreas de macrófitas foram incluídas como duas classes: Macrófitas Emergentes (ME) de elevada biomassa e Macrófitas Flutuantes (MF) de baixa biomassa.

Tabela 3.5 – Tipos de cobertura da planície de inundação do Rio Amazonas identificadas em campo, utilizadas para a análise do ângulo de incidência e utilizadas para a análise sazonal e classificação.

Identificadas em campo	Análise do ângulo de incidência	Análise da variação sazonal e amostras para classificação
Floresta não inundada	Floresta não inundada	Floresta não inundada
Floresta inundada	Floresta inundada	Floresta inundada
Solo	Solo	Rugoso/úmido
		Liso/seco
Água aberta rugosa	Água aberta	Rugosa
Água aberta lisa		Lisa
Macrófitas emergentes	---	Macrófitas emergentes
Macrófitas flutuantes		Macrófitas flutuantes

O pulso de inundação de 2007 foi escolhido para esta análise sazonal, por possuir o maior número de imagens ScanSAR/ALOS disponíveis, adquiridas em diferentes níveis d'água. A análise iniciou-se com a coleta de amostras de cada classe, a qual utilizou, além das próprias imagens ScanSAR, as imagens Landsat-5 georreferenciadas e os dados levantados em campo como referência.

A seleção de amostras seguiu dois critérios: i) a forma dos polígonos amostrais variou para garantir áreas de retroespalhamento ‘puro’ de cada classe; e ii) o tamanho mínimo total amostrado por classe foi de 500 *pixels*, sendo que cada polígono amostral continha no mínimo 20 *pixels*, para permitir uma estimativa estatística do retroespalhamento que minimizasse o efeito local da ocorrência do *speckle* (Tabela 3.6). O número total de *pixels* por classe variou de acordo com a proporção da classe na área estudada.

Tabela 3.6 – Número e tamanho total das amostras para a análise da variação sazonal do retroespalhamento das oito classes analisadas na Planície do LGC nas imagens ScanSAR/ALOS.

Classe	Número de amostras	Tamanho das amostras (<i>pixels</i>)	Data ScanSAR de coleta
Floresta Não Inundada (FNI)	34	4568	02/09/2007
Floresta Inundada (FI)	90	4881	02/09/2007
Água Aberta Rugosa (AAR)	45	7465	02/09/2007
Água Aberta Lisa (AAL)	54	2660	02/09/2007
Solo Liso/Seco (SL)	33	841	30/11/2006
Solo Rugoso/Úmido (SR)	28	941	30/11/2006
Macrófitas Emergentes (ME)	13	574	02/06/2007
Macrófitas Flutuantes (MF)	26	649	02/06/2007

Primeiramente, as características de retroespalhamento de cada tipo de cobertura do solo foram analisadas em uma única imagem, para identificar as sobreposições entre as distribuições das classes. As sobreposições foram investigadas com base no retroespalhamento médio calculado para os polígonos amostrais, utilizando gráficos de densidade de probabilidade e estatísticas descritivas (média, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, máximo e mínimo).

Depois disso, foram exploradas as variações sazonais de retroespalhamento das amostras ao longo do pulso de inundação, com o objetivo de identificar características com potencial para discriminar as classes definidas. Esta etapa foi realizada através da inspeção de gráficos do tipo *box plot*.

Toda esta análise de retroespalhamento foi realizada em termos de amplitude, a partir dos dados ScanSAR/ALOS corrigidos para variações de terreno, os quais foram também posteriormente utilizados nas etapas de mineração de dados e de classificação. Para permitir comparações entre os valores de retroespalhamento encontrados no trabalho com os valores encontrados na literatura, os resultados das estatísticas calculadas foram convertidos para σ^0 (em dB). Para os produtos do sensor PALSAR em nível de processamento 1.5, esta conversão segue (ROSENQVIST et al., 2007):

$$\sigma^0 = 10 \times \log_{10}(\text{DN}^2) + \text{CF} \quad (3.2)$$

Onde: DN é a amplitude expressa em número digital e CF é o coeficiente de calibração para produtos padrões do PALSAR, e equivale à -83 dB para imagens (SHIMADA et al., 2009).

3.4.2. Classificação orientada ao objeto

3.4.2.1. Definição da hierarquia das classes

As oito classes exploradas na análise da variação sazonal do retroespalhamento foram organizadas em quatro níveis hierárquicos, em função de suas características de retroespalhamento e seus padrões de variação sazonal. A classificação da área estudada em função do tipo de cobertura da terra foi necessária como etapa preliminar ao mapeamento da inundação, devido à condição de inundação variar entre as classes.

O primeiro nível de classificação identifica três classes na área estudada, definidas por padrões gerais de inundação: Terra firme (áreas que não inundam ao longo do pulso de inundação); Planície de inundação (áreas que inundam em algumas fases do pulso de inundação); e Águas abertas permanentes (áreas de águas abertas no menor nível d'água do pulso de

inundação) (Figura 3.15). O segundo nível de classificação divide a área classificada como Planície de inundação no Nível 1 em duas classes, também consideradas como espacialmente constantes ao longo do ano: Floresta e Não Floresta. Para estes dois primeiros níveis, um único resultado de classificação é válido para todas as datas de um período analisado (um resultado para o pulso de inundação de 2007 e outro para os anos de 2009 e 2010).

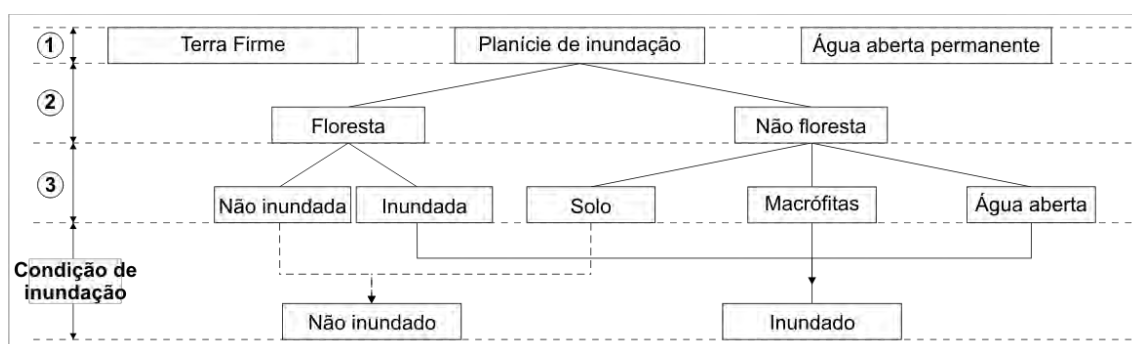


Figura 3.15 – Hierarquia das classes.

No Nível 3, a área classificada como Floresta é dividida em duas classes, dependendo da sua condição de inundação (Floresta Inundada e Floresta Não Inundada); enquanto que a área classificada no Nível 2 como Não floresta é dividida em Solo, Macrófitas e Água aberta. O último nível une os tipos de cobertura em duas possíveis condições de inundação: Inundado e Não Inundado. A condição ‘inundado’ é representada pelas classes Águas Aberta, Macrófitas e Florestas Inundadas, e a condição ‘Não Inundado’ inclui as classes Solo, Florestas Não Inundadas e Terra Firme (Figura 3.15). Estes dois últimos níveis geram um mapa para cada data da série temporal estudada.

3.4.2.2. Mineração de dados

A mineração de dados foi utilizada para identificar limiares numéricos de retroespalhamento que pudessem separar as classes, sendo escolhido o aplicativo gratuito *WEKA data mining*. O algoritmo foi aplicado de duas formas principais: i) gerando uma árvore para todas as classes: com o objetivo de identificar padrões gerais de agrupamento das classes; e ii) gerando árvores de

decisão para discriminar as classes mais semelhantes: no intuito de explorar em mais detalhes as combinações de limiares que poderiam classificá-las.

Um conjunto de atributos foi selecionado como informação de entrada para o algoritmo de mineração de dados, para classes amostradas na etapa do efeito sazonal do pulso de inundação: Média do Retroespalhamento Temporal (MRT); Desvio padrão do Retroespalhamento Temporal (DRT); Retroespalhamento da Cheia (RC); Retroespalhamento da Seca (RS); Razão entre os retroespalhamentos da Cheia sobre a Seca (C/S); Retroespalhamento da data de Coleta das Amostras (RCA). Este último atributo foi importante para melhor caracterizar o retroespalhamento de cada classe na data em que foram selecionadas as amostras.

Deve-se destacar, entretanto, que a árvore de decisão final foi definida pelo analista por meio da integração destes limiares radiométricos, extraídos por mineração de dados, com os limiares de imagens ópticas, extraídos através de inspeção visual, com auxílio das ferramentas de exploração de atributos do aplicativo e-Cognition 8. A realização da análise no e-Cognition de cada imagem óptica foi importante porque estas apresentavam diferenças de condições de imageamento entre as datas (principalmente ângulo de visada e cobertura de nuvens para as imagens MODIS e Landsat-5, respectivamente).

3.4.2.3. Segmentação

Para a criação dos objetos foi utilizado o algoritmo multiresolução implementado no e-Cognition 8 (DEFINIENS, 2008). A segmentação do Nível 1 baseou-se nas seguintes imagens: imagens temporais (MRT e DRT), imagem da Cheia (RC - nível d'água mais alto em 02/06/2007), imagem da Seca (RS - nível d'água mais baixo em 30/11/2006) e o SRTM.

No segundo nível, a segmentação foi aplicada somente dentro das áreas classificadas no Nível 1 como Planície de inundação, sendo utilizadas apenas duas imagens temporais: MRT e DRT. Como o objetivo do Nível 2 era discriminar áreas de Floresta e Não Floresta, o atributo MRT permitiu a identificação de áreas de alto retroespalhamento ao longo de todo ano, considerando que as áreas de floresta apresentam alto sinal retroespalhado (WANG et al., 1995). A elevada variabilidade sazonal do retroespalhamento das áreas de florestas inundadas decorrentes do *double bounce* foi considerado por meio da inclusão da imagem DRT.

Para o Nível 3 da classificação, foram utilizadas as imagens MRT, DRT, RC, RS e C/S. Apenas uma segmentação foi realizada para toda a série temporal, ou seja, os objetos gerados para estes níveis foram os mesmos para todas as datas classificadas.

3.4.2.4. Classificação

A árvore de decisão gerada foi implementada no software e-Cognition 8 para realização da classificação. É importante notar que a abordagem de classificação aplicada neste estudo considera que pelo menos uma imagem óptica livre de nuvens estaria disponível na fase de seca do pulso de inundação (baixo nível d'água). Isto ocorre em função da principal confusão observada entre classes nos dados de banda L (solo e água), que pode ser minimizada com a utilização de bandas na região do infravermelho.

O algoritmo de classificação hierárquica foi aplicado separadamente para a série temporal de 2007 e para as datas de 2009 e 2010, resultando em dois mapas de cobertura no Nível 2 de classificação. As diferenças entre eles ocorreram nas classes Floresta, Não Florestas e Água Aberta Permanente. Esta última foi definida a partir de imagens TM/Landsat-5 de duas datas:

15/10/2006 para o pulso de inundação de 2007 e 08/11/2009 e para os anos de 2009 e 2010.

A partir dos mapas de Nível 2, cada data da série temporal foi então classificada no Nível 3, considerando o retroespalhamento dos objetos na data analisada, suas variações temporais de retroespalhamento (MRT, DRT, RC, RS e C/S), seus valores em imagens ópticas e no modelo de elevação SRTM, além da informação de nível d'água na estação fluviométrica de Curuai. Devido à similaridade radiométrica de algumas classes nas imagens ScanSAR, foi necessária a inserção de duas classes intermediárias abaixo da classe Não Floresta, chamadas de 'Claros' e 'Escuras'.

A classe 'Claros' inclui as subclasses Água Aberta Rugosa (AAR), Macrófitas Emergentes (EM) e Solo Rugoso/Úmido (SR), enquanto que a classe 'Escuras' inclui as subclasses Água Aberta Lisa (AAL), Macrófitas Flutuantes (MF) e Solo Liso/Seco (SL). Ao final do processo de classificação do Nível 3 tais classes são reagrupadas em Água Aberta (AA), Macrófita (M) e Solo (S) (Figura 3.16), e a estas são atribuídas à respectiva condição de inundação.

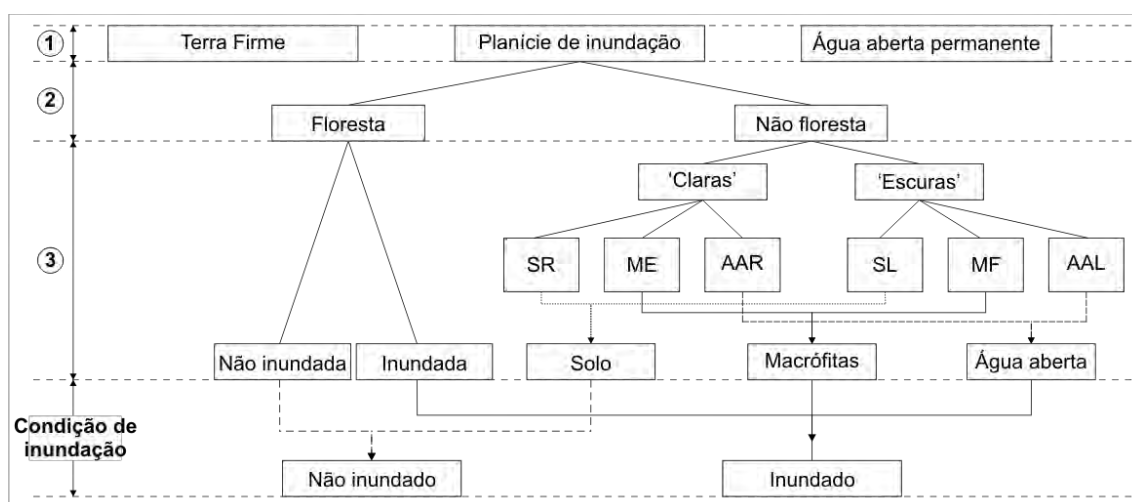


Figura 3.16 – Processo de classificação hierárquica.

A elaboração das regras de decisão e a aplicação dos processos de classificação no e-Cognition 8 foi feita de maneira iterativa, por meio de diversos testes e verificações com as imagens Landsat-5 disponíveis. O processo de classificação considerou, além dos limiares extraídos dos dados de sensoriamento remoto (ScanSAR, ópticas e SRTM), características das classes verificadas em campo (como altura e presença de água).

3.4.2.5. Validação dos resultados

A acurácia da classificação foi avaliada em todos os níveis da hierarquia de classes por diferentes abordagens. Uma distribuição aleatória estratificada de 200 pontos (50 por classe) foi realizada para o Nível 2, e os mesmos pontos foram utilizados para a validação do Nível 1. Estes pontos foram visualmente interpretados, com base em dados de campo e imagens de alta resolução espacial (Google Earth TM), além da imagem TM/Landsat-5 da seca (15/10/2006) utilizada principalmente para validação das áreas de água permanente.

Para o Nível 3, o tamanho da amostra de validação foi aumentado para 500 pontos, interpretados de maneira similar à realizada nos níveis 1 e 2, para duas datas de níveis d'água distintos: 30/11/2006, representando a seca (NA=452 cm); e 18/07/2007, representando a cheia (NA=959 cm). A escolha da data de 18/07/2007, ao invés da data de maior nível d'água (02/06/2007, NA=1010 cm) se deve à existência de uma imagem Landsat-5 com nível d'água muito próximo (14/07/2007, NA=963 cm).

Como o estudo não contou com dados de validação para a condição de inundação das florestas, a alternativa adotada foi a simulação da área inundada a partir do modelo de elevação que acopla a batimetria de Barbosa (2005) com o SRTM. Utilizando as cotas das datas de seca e cheia, foi realizado um fatiamento sobre este modelo de elevação, obtendo-se uma

aproximação das áreas de florestas inundadas (Figura 3.17). A condição de inundação das florestas foi verificada para os mesmos pontos amostrais do Nível 3.

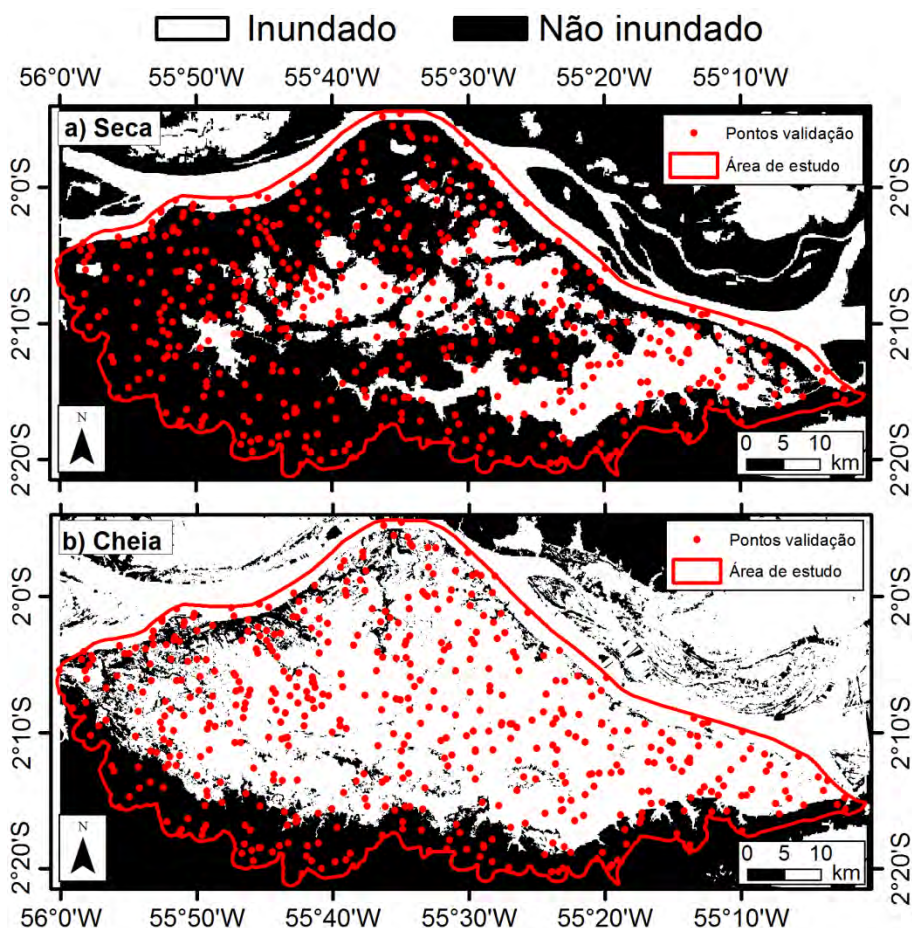


Figura 3.17 – Mapas gerados por fatiamento com base no modelo que acopla a batimetria de Barbosa (2005) com o SRTM, utilizados para a validação da condição de inundação das florestas. a) Data que representa a seca (30/11/2006) e b) data que representa a cheia (18/07/2007).

3.4.3. Estimativa da área inundada

Um modelo estatístico foi ajustado para descrever a relação entre as áreas inundadas e o nível d'água registrado na estação fluviométrica de Curuai. Verificou-se nos dados do pulso de inundação de 2007 que o aumento da área inundada na planície do LGC em função da cota na estação de Curuai poderia ser representado por um modelo polinomial de segundo grau até um

determinado ponto de máximo (da parábola), e a partir deste ponto a área inundada tendia a uma estabilização.

Desta forma, ajustou-se um modelo para representar o aumento da área inundada em função da cota em Curuai, inicialmente utilizando somente as áreas inundadas correspondentes às datas do pulso de inundação de 2007:

$$AI = \beta_0 + \beta_1 \times NA + \beta_2 \times NA^2$$

Onde: β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes da regressão polinomial de segundo grau, AI é a área inundada (em km²) e NA é o nível d'água em Curuai (em cm).

As coordenadas do ponto máximo da parábola, a partir da qual a área inundada permanece constante, foi determinada seguindo as relações matemáticas:

$$NA_{m\acute{a}x} = \frac{-\beta_1}{2 \times \beta_2} \quad (3.3)$$

$$AI_{m\acute{a}x} = -\left(\frac{\beta_2^2 - 4 \times \beta_1 \times \beta_0}{4 \times \beta_2}\right) \quad (3.4)$$

Onde: β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes da regressão polinomial de segundo grau, $AI_{m\acute{a}x}$ é a área máxima inundada (em km²) e $NA_{m\acute{a}x}$ é o nível d'água em Curuai a partir do qual a área inundada não aumenta (em cm).

Este modelo foi validado por meio da comparação dos valores estimados com os valores mapeados para as cinco datas de 2009 e 2010. Foram calculados o coeficiente de determinação (R^2) do modelo de 2007 e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE, *Root Mean Squared Error*) entre os valores previstos (estimados a partir do modelo de 2007) e observados (mapeados pelo algoritmo de classificação) das datas de 2009 e 2010:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{obs},i} - x_{\text{est},i})^2}{n}} \quad (3.3)$$

Onde: x_{obs} são os valores de área inundada mapeados (em km^2), x_{sim} os valores de área inundada estimados pelo modelo do pulso de inundação de 2007 (em km^2) e n o tamanho da amostra utilizada para ajustar os modelo.

Para a obtenção um valor percentual do erro médio quadrático, este valor foi dividido pela média dos valores observados (mapeados). Após esta validação, um novo modelo foi ajustado, incluindo todas as datas, a fim de aumentar a quantidade de dados de ajuste do modelo e possibilitar uma maior robustez e generalidade para previsões de inundação na área estudada. Este modelo também foi de regressão polinomial de 2º grau para representar a variação da área inundada em função do nível d'água em Curuai até o ponto máximo da curva parabólica, e acima deste ponto a área inundada é considerada constante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise do retroespalhamento

4.1.1. Efeito do ângulo de incidência

A análise gráfica da variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência sugere que o retroespalhamento das florestas inundadas apresenta maior tendência de decaimento com o aumento do ângulo de incidência do que o das florestas não inundadas (Figura 4.1).

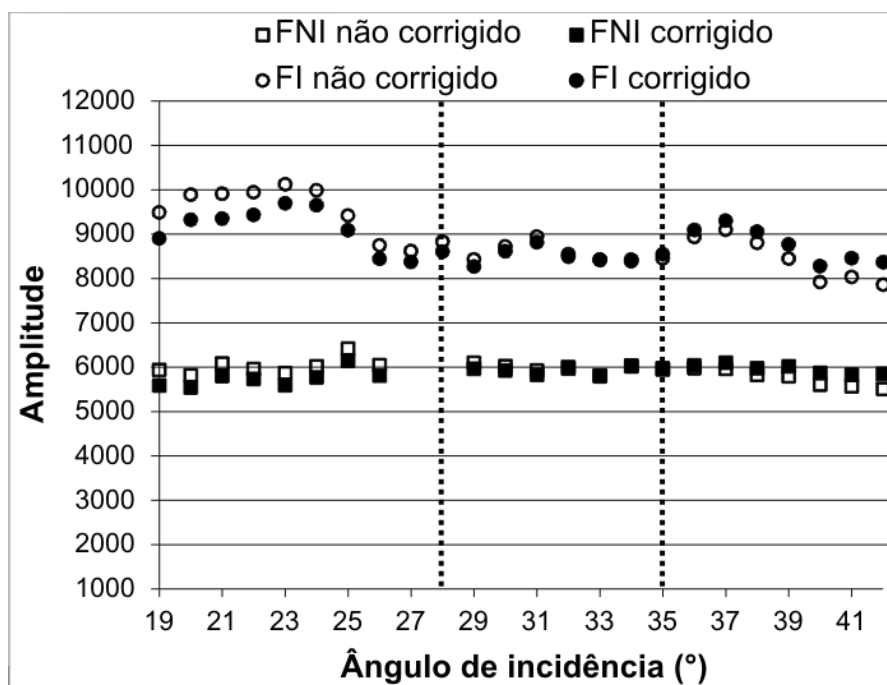


Figura 4.1 – Variação das médias de retroespalhamento das amostras em função do ângulo de incidência das imagens ScanSAR para FI e FNI. As linhas tracejadas limitam a faixa de ângulos de incidência em que a planície de inundação do LGC está inserida.

No entanto, analisando o p-valor dos coeficientes β_1 para dos modelos múltiplos de regressão linear ajustados (Tabela 4.1), e considerando um nível de significância de 5%, nota-se que a variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência não foi significativa para ambas as classes:

$$\text{FI: } \sigma^0 = 11328,1 - 79,2(\theta) - 1511,3(\text{corr}) + 46,53(\text{corr} * \theta) \quad (4.1)$$

$$\text{FNI: } \sigma^0 = 6384,9 - 15,2(\theta) - 919,9(\text{corr}) + 28,7(\text{corr} * \theta) \quad (4.2)$$

Tabela 4.1 – Valores de erro padrão e p-valor de cada coeficiente ajustado nos modelos múltiplos de regressão lineares relacionando a variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência (com e sem correção quanto ao efeito do terreno) das classes FI e FNI.

Coeficiente	Classe FI			Classe FNI		
	Valor estimado	Erro padrão	p-valor	Valor estimado	Erro padrão	p-valor
β_0	11328,1	363,6	$<2 \times 10^{-16}$	6384,9	142,9	$<2 \times 10^{-16}$
β_1	-79,2	11,6	2×10^{-8}	-15,2	4,5	0,002
β_2	-1511,3	514,2	0,0052	-919,9	202,2	5×10^{-5}
β_3	46,53	16,4	0,0070	28,7	6,4	7×10^{-5}

A análise do nível de significância dos coeficientes de regressão β_2 e β_3 indica que correção aplicada foi eficiente (com p-valores $<0,05$) para as classes de floresta analisadas (Tabela 4.1).

Por meio dos valores das razões entre FI/FNI, observou-se a tendência de aproximação entre o retroespalhamento destes alvos citado por Lang et al. (2008) na imagem não corrigida para o efeito do terreno. Os valores desta razão variaram de 0,46 a 0,62 para os ângulos de incidência de 19° a 42° (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Razão entre as médias de retroespalhamento das amostras de florestas inundadas sobre florestas não inundadas para três ângulos de incidência representativos (*near range*: 19°; *mid range*: 30°; e *far range*: 42°).

Ângulo de incidência (°)	FI/FNI não corrigido	FI/FNI corrigido
19	0,46	0,50
30	0,57	0,57
42	0,62	0,59

Apesar desta aproximação dentro da cena ScanSAR/ALOS ter sido pequena, os resultados desta análise sugerem que em uma imagem com maior variação de ângulo de incidência os valores de retroespalhamento das florestas inundadas e não inundadas tenderiam apresentar valores semelhantes. Entre os ângulos de incidência da imagem ScanSAR/ALOS que cobrem a planície de inundação do LGC (29° a 35°) a variação é pequena para os dois tipos de cobertura da terra (em torno de 0,02 e 0,22 dB para FI e FNI, respectivamente) e não influenciou na posterior elaboração das regras de decisão e classificação.

A mesma análise gráfica foi realizada para os alvos solo e águas abertas (Figura 4.2), e verificou-se que o efeito do ângulo de incidência é muito distinto entre estas classes. Enquanto ocorre um intenso decaimento do retroespalhamento da classe AA, o retroespalhamento da classe S permanece aproximadamente estável ao longo de todo o campo de visada da imagem.

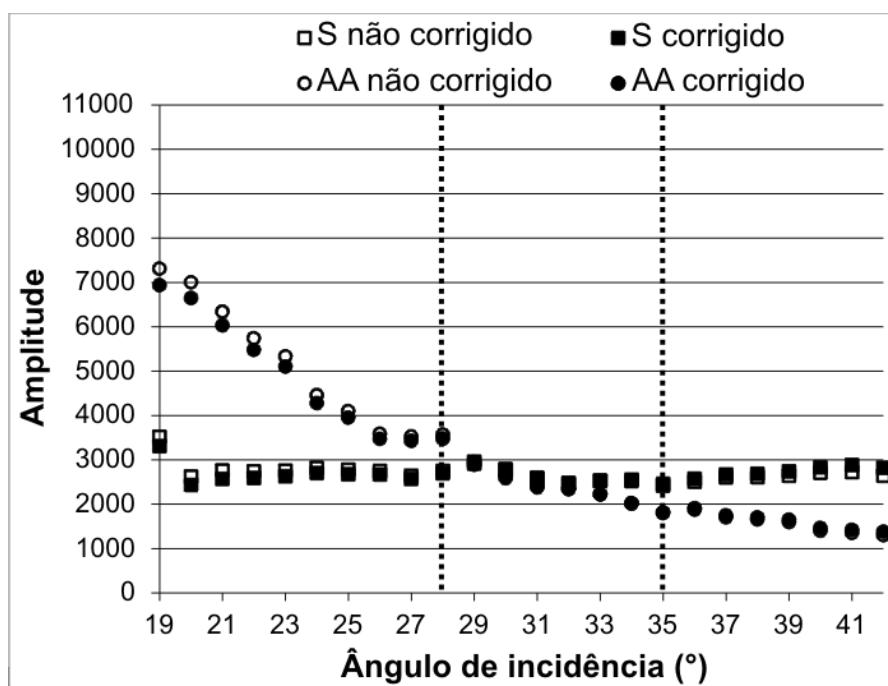


Figura 4.2 – Variação das médias de retroespalhamento das amostras em função do ângulo de incidência das imagens ScanSAR para S e AA. As linhas tracejadas limitam a faixa de ângulos de incidência em que a planície de inundação do LGC está inserida.

Isto também foi verificado na análise com os modelos múltiplos de regressão ajustados, em que variação do coeficiente β_1 para o modelo de S não foi significativa enquanto que do modelo ajustado para AA foi altamente significativa (considerando o nível de significância de 5%) (Tabela 4.3):

$$S: \quad \sigma^0 = 3172,6 - 15,5(\theta) - 504,0(\text{corr}) + 15,8(\text{corr} * \theta) \quad (4.2)$$

$$AA: \quad \sigma^0 = 10841,2 - 248,6(\theta) - 650,7(\text{corr}) + 18,7(\text{corr} * \theta) \quad (4.3)$$

Tabela 4.3 – Valores de erro padrão e p-valor de cada coeficiente ajustado nos modelos múltiplos de regressão lineares relacionando a variação do retroespalhamento em função do ângulo de incidência (com e sem correção quanto ao efeito do terreno) das classes S e AA.

Coeficiente	Classe S			Classe AA		
	Valor estimado	Erro padrão	p-valor	Valor estimado	Erro padrão	p-valor
β_0	3172,6	174,9	$<2 \times 10^{-16}$	10841,2	572,8	$<2 \times 10^{-16}$
β_1	-15,5	5,6	0,008	-284,6	18,3	$<2 \times 10^{-16}$
β_2	-504,0	247,3	0,050	-650,7	810,0	0,426
β_3	15,79	7,9	0,052	18,7	25,9	0,473

Para a classe S, tanto os dados corrigido quanto os não corrigidos não apresentaram variação significativa em função do ângulo de incidência (p-valor dos coeficientes β_2 e $\beta_3 > 0,05$). Já para a classe AA, a correção do terreno não reduziu significativamente o efeito do ângulo de incidência, e tanto os dados corrigidos quanto os não corrigidos apresentaram variação significativa (p-valor dos coeficientes β_2 e $\beta_3 < 0,05$) de retroespalhamento ao longo do campo de visada das imagens ScanSAR/ALOS. Isto confirmou a hipótese de que o retroespalhamento de AA é mais susceptível ao efeito do ângulo de incidência do que o de S, apesar de apresentarem rugosidades muito semelhantes para dados de SAR adquiridos em banda L (HESS et al., 2003; MARTINEZ; LE TOAN, 2007), o que pode ser explicado pelo modelo de espalhamento de Bragg (ROBINSON, 2004).

A diferença na intensidade de retroespalhamento entre AA e S, expressa pela razão AA/S, foi também observada ao longo do campo de visada da imagem ScanSAR (Tabela 4.4). Do *near* para o *far range*, a razão variou de 0,49 a 1,44, enquanto que a razão entre FI e FNI foi menos afetada pelo aumento do ângulo de incidência.

Tabela 4.4 – Razão entre as médias de retroespalhamento das amostras de águas abertas sobre solo para três ângulos de incidência representativos (*near range*: 19°; *mid range*: 30°; e *far range*: 42°).

Ângulo de incidência (°)	AA/S não corrigido	AA/S corrigido
19	0,47	0,49
30	1,04	1,04
42	1,42	1,44

A grande diferença do efeito do ângulo de incidência sobre o retroespalhamento dos alvos também foi observada nos valores médios amostrados nas órbitas 406 (de 13/07/2007) e 412 (de 23/07/2007) (representando *far* e *near range*, respectivamente). Apesar de as datas de aquisição serem diferentes e de a superfície d'água do Rio Amazonas estar sujeita, provavelmente, a condições distintas de vento (direção e intensidade), observou-se uma ampla diferença (de aproximadamente 12 dB) no retroespalhamento entre as cenas das duas órbitas. Por outro lado, a diferença entre o retroespalhamento da área de solo amostrada foi muito inferior (da ordem de 2 dB).

No âmbito do mapeamento da inundação na planície de inundação do LGC, realizado com imagens da órbita 409 (ângulo de incidência de 28° a 35°), o principal aspecto observado nesta análise foi que, nos ângulos de incidência em que se encontra a área da planície de inundação do LGC, ocorre grande semelhança entre os valores de retroespalhamento das classes S e AA. Além disso, a variação de retroespalhamento das águas abertas na área mapeada ainda foi ampla (5,95 dB) e, conseqüentemente, para discriminar as áreas de

águas abertas, as regras de classificação tiveram que considerar dois limiares de classificação distintos de retroespalhamento em função do ângulo de incidência. Contudo, trabalhos futuros interessados em áreas maiores (toda a planície de inundação do Rio Amazonas, por exemplo) poderiam explorar essa diferente susceptibilidade do retroespalhamento de solo e de água aberta ao efeito do ângulo de incidência como parte do processo de classificação digital de imagens.

4.1.2. Efeito sazonal do pulso de inundação

A análise do retroespalhamento das classes nas imagens ScanSAR da data em que as amostras foram coletadas demonstrou grande potencial de confusão entre algumas das classes (Tabela 4.5 e Figura 4.3). Em decorrência das sobreposições entre as distribuições das classes, identificou-se a possibilidade de separar as mesmas em três grupos principais. As classes de 'Floresta' (Inundada e Não Inundada) apresentaram os maiores valores de retroespalhamento (superior a aproximadamente -9 dB); as classes SR, AAR e ME apresentaram valores de retroespalhamento médio, variando aproximadamente de -9 a -17,5 dB, e foram chamadas de 'Claras'; e as classes SL, AAL e MF apresentaram os menores retroespalhamentos (inferiores a aproximadamente -17,5 dB), sendo chamadas de 'Escuras'.

Tabela 4.5 – Estatísticas descritivas dos tipos de cobertura do solo analisados na imagem ScanSAR da data em que as amostras foram coletadas.

Tipo de cobertura	Média (dB)	Mediana (dB)	Desvio padrão (dB)	Coefficiente de variação (%)	Máximo (dB)	Mínimo (dB)
FNI	-7,5	-7,4	0,6	7,9	-6,7	-9,0
FI	-4,2	-4,2	0,9	20,7	-0,9	-5,9
AAR	-15,2	-15,3	0,8	5,6	-13,7	-17,2
AAL	-21,6	-21,7	0,7	3,2	-19,0	-22,8
SL	-19,8	-19,9	0,7	3,5	-18,0	-21,2
SR	-14,5	-14,4	1,5	10,5	-10,9	-18,8
ME	-13,4	-14,2	3,5	26,0	-9,1	-21,1
MF	-20,9	-21,2	1,4	6,7	-17,5	-23,6

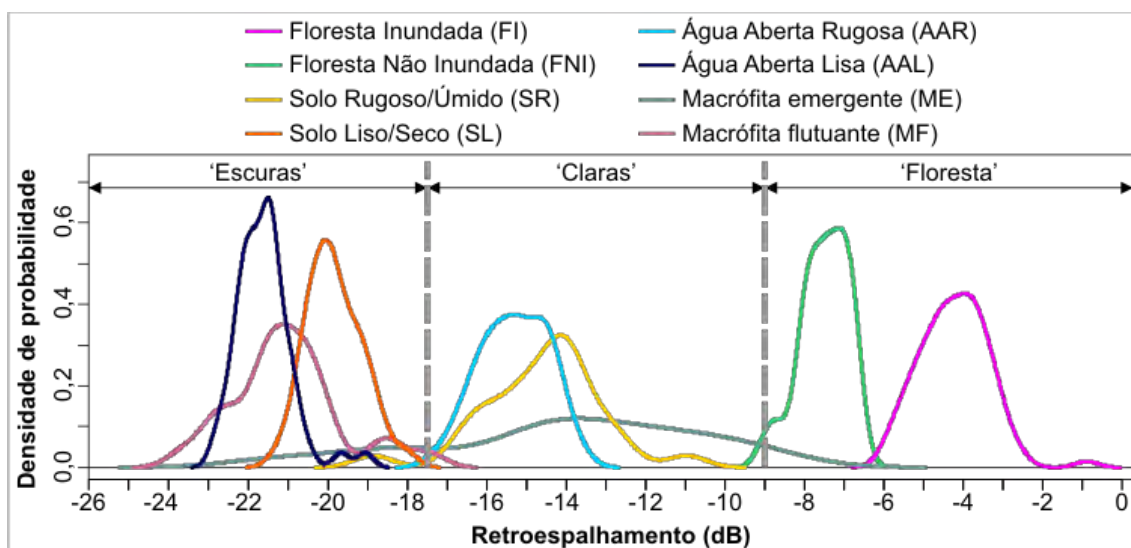


Figura 4.3 – Gráfico de densidade de probabilidade do retroespalhamento das oito classes na data em que as amostras foram coletadas.

Deve-se destacar, entretanto, que apesar da classe ME apresentar a média inserida no grupo 'Claros' (-13,4 dB), ela foi a de maior variação radiométrica, com valores distribuídos aos três grupos definidos. Posteriormente, este comportamento foi considerado na definição das regras de decisão da classificação.

Esta análise apresentou valores similares àqueles encontrados em estudos anteriores com dados de SAR (banda L) (MARTINEZ; LE TOAN, 2007;

COSTA, 2004; HESS et al., 1995) (Tabela 4.6). As classes de florestas foram as que apresentaram as maiores similaridades com os valores encontrados na literatura.

Tabela 4.6 – Valores de retroespalhamento encontrados na bibliografia e neste estudo para as classes estudadas.

Estudo	Florestas não inundadas	Florestas inundadas	Água aberta	Solo (rugoso /seco)	Macrófitas emergentes
Hess et al. (1995)*	-8 dB	-5 dB	-24 dB	-13 dB	-10 dB
Hess et al. (2003)*	-7,4 dB	-5,3 dB	-16,7 dB	-12,6 dB	-8,3 dB
Costa (2004)**	-7 dB	-4 dB	---	-11,3 dB	-9 dB
Martinez e Le Toan (2007)**	-8 dB	-6 dB	-17 dB	-12 dB	---
Presente estudo	-7,4 dB*	-4,2 dB*	-15,3 dB*	-14,4 dB*	-14,2 dB
	-7,5 dB**	-4,2 dB**	-15,2 dB**	-14,5 dB**	-13,4 dB

* Valores de mediana das distribuições; ** Valores de média das distribuições.

A diferença de retroespalhamento entre classes FNI e FI (em torno de 3 dB) sugeriu que estas pudessem ser facilmente segregadas, mas considerável confusão entre estas classes foi observada durante o processo de classificação digital. Analisando-se a sobreposição entre as distribuições dos valores isolados de *pixels* para duas classes (ao invés das médias de cada polígono amostral, Figura 4.4a), verificou-se que o tamanho dos objetos resultantes da segmentação pode ter implicado em confusão entre estas classes.

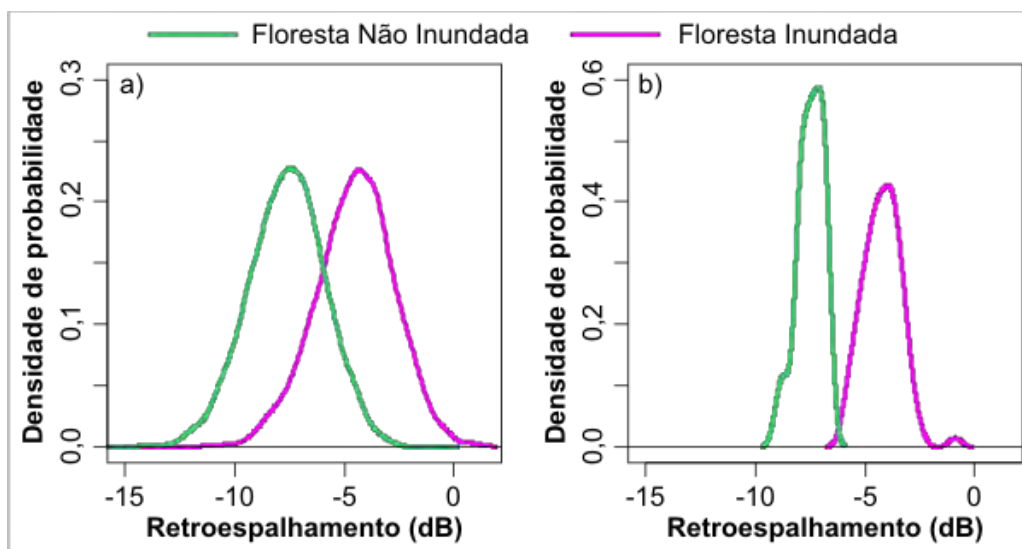


Figura 4.4 – Gráficos de densidade de probabilidade para as classes FNI e FI: a) em *pixels* totais amostrados; e b) médias dos polígonos amostrados.

Isto ocorre em função do *speckle* nos dados de SAR, o qual foi minimizado na análise do retroespalhamento médio dentro dos polígonos amostrados (de tamanho mínimo de 150 e 500 *pixels* para FI e FNI, respectivamente) (Figura 4.4b). Se forem analisados objetos de imagem de menor tamanho (número de *pixels*), esta sobreposição tende a aumentar, aumentando o potencial de confusão entre as classes.

O comportamento radiométrico das áreas de água aberta apresentou valores médios superiores aos encontrados em estudos anteriores, o que ocorreu provavelmente pelas diferenças em ângulo de incidência (28 a 35° no presente estudo) e condições de vento. Como mostrado anteriormente, maiores ângulos de incidência implicam em menores valores do retroespalhamento de superfícies lisas, e os estudos anteriores foram realizados sob ângulos de 34 a 43° (HESS et al., 2003; MARTINEZ; LE TOAN, 2007) e 35° (HESS et al., 1995; COSTA, 2004). Por outro lado, a intensidade do vento sobre a superfície d'água implica em um comportamento bimodal da distribuição de retroespalhamento deste alvo (reflexão predominantemente especular das superfícies sem ondas), e o LGC apresenta um comprimento eólico particularmente longo, favorecendo este tipo de ocorrência.

Observou-se nos dados analisados a proximidade entre o retroespalhamento das classes de solo e água aberta, inerente aos dados de SAR adquiridos em banda L (HESS et al., 1995). Embora os valores de retroespalhamento do solo publicados na bibliografia pesquisada tenham sido superiores aos encontrados neste trabalho, o comportamento bimodal da distribuição das classes já havia sido identificado anteriormente em decorrência da umidade e rugosidade variáveis (HESS et al., 2003; BALENZANO et al., 2011; SHI et al., 1997).

Embora tenham sido verificadas sobreposições entre as distribuições do retroespalhamento das classes de solo e de águas abertas, tanto para 'Claros' quanto para 'Escuros', a análise temporal do sinal retroespalhado por estes alvos permitiu a identificação de diferenças que puderam ser exploradas no processo de classificação. As áreas cobertas por solo apresentam uma maior variação temporal de retroespalhamento ao longo do pulso de inundação, em resposta às mudanças de umidade e ocupação da superfície por cobertura vegetal herbácea (BALENZANO et al., 2011; SHI et al., 1997). Por outro lado, a rugosidade de superfícies de água aberta é apenas afetada pelo vento, implicando em variações temporais aleatórias e de menor frequência, que tendem a aproximar um valor médio estável de retroespalhamento ao longo do ano. Isto pode ser verificado na comparação entre as classes 'Claros' SR e AAR (Figura 4.5) e 'Escuros' SL e AAL (Figura 4.6).

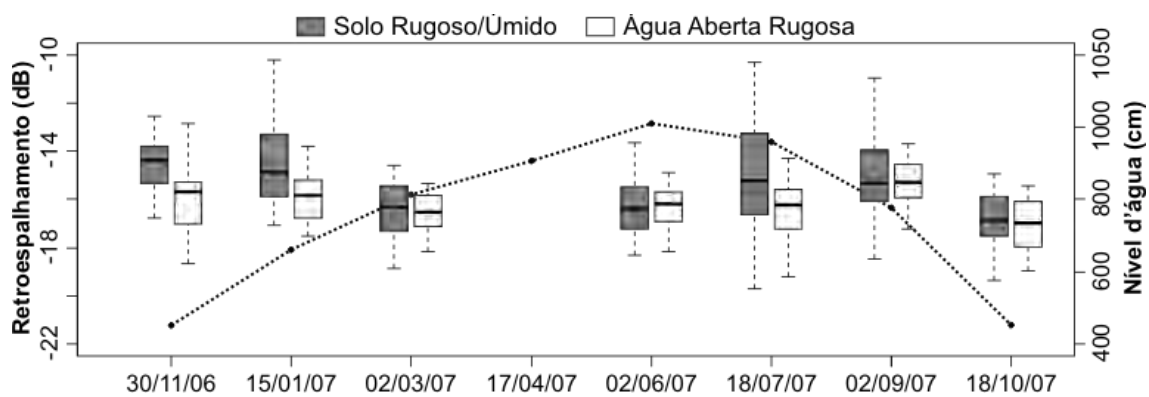


Figura 4.5 – Variação temporal do retroespalhamento das classes SR e AAR ao longo do pulso de inundação de 2007. As linhas escuras dentro das caixas são as medianas, os extremos das caixas são os quartis 25% e 75% e os extremos são quartis 5% e 95%.

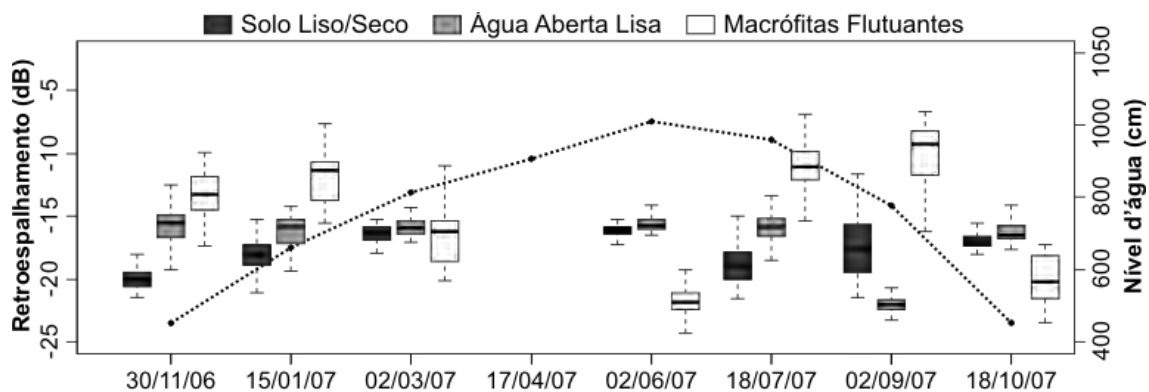


Figura 4.6 – Variação temporal do retroespalhamento das classes SL, AAL e MF ao longo do pulso de inundação de 2007. As linhas escuras dentro das caixas são as medianas, os extremos das caixas são os quartis 25% e 75% e os extremos são quartis 5% e 95%.

Notou-se que a única data em que AAL foi significativamente inferior aos valores médios observados para as águas abertas (em torno de -15 a -16 dB) foi na data em que as amostras de água sem vento foram selecionadas (02/09/2007), pois nas demais datas os polígonos selecionados provavelmente apresentavam rugosidade de superfície em decorrência da intensidade do vento.

O retroespalhamento de uma única data das macrófitas apresentaram valores inferiores aos encontrados na literatura (Tabela 4.6). Isto pode ter ocorrido

devido ao pequeno número de amostras coletadas para representar este tipo de cobertura, como sugerido pelo maior desvio-padrão (3,5 dB para macrófitas emergentes). Não foram coletadas mais amostras em função da pequena representatividade das áreas de macrófitas durante a data em que uma imagem Landsat-5 livre de nuvens (28/06/2007) estava disponível para auxiliar o processo de amostragem.

Outro aspecto relevante do retroespalhamento das classes de macrófitas foi o comportamento bimodal de sua distribuição em função das espécies predominantes. Macrófitas emergentes são altas, verticalmente orientadas e acumulam grande biomassa, o que favorece a ocorrência dos mecanismos de espalhamento dos tipos volumétrico e *double bounce*. Macrófitas flutuantes, por outro lado, são orientadas horizontalmente e apresentam baixa biomassa, resultado na predominância de espalhamento de superfície e gerando baixos valores de retroespalhamento (Silva et al., 2008). Esta classe tem um comportamento temporal bastante específico: apresenta baixos valores de retroespalhamento apenas na data de cheia (02/06/2007) (Figura 4.6), pois nas demais datas estas áreas são parcialmente ou totalmente cobertas por solo e vegetação herbácea seca.

4.2. Classificação orientada ao objeto

4.2.1. Regras de decisão e processo de classificação

Para a discriminação das oito classes analisadas, o algoritmo J4.8 da ferramenta de mineração de dados *WEKA* gerou árvores de decisão com limiares capazes de discriminar as classes. Além destes, os limiares da imagem Landsat-5 da seca e do SRTM foram organizados em uma sequência lógica de processos para a classificação dos níveis 1 e 2 (Figura 4.7), gerando dois resultados resultado para a série temporal analisada (um para o pulso de inundação de 2007 e outro para os anos de 2009 e 2010 – Figura 4.8).

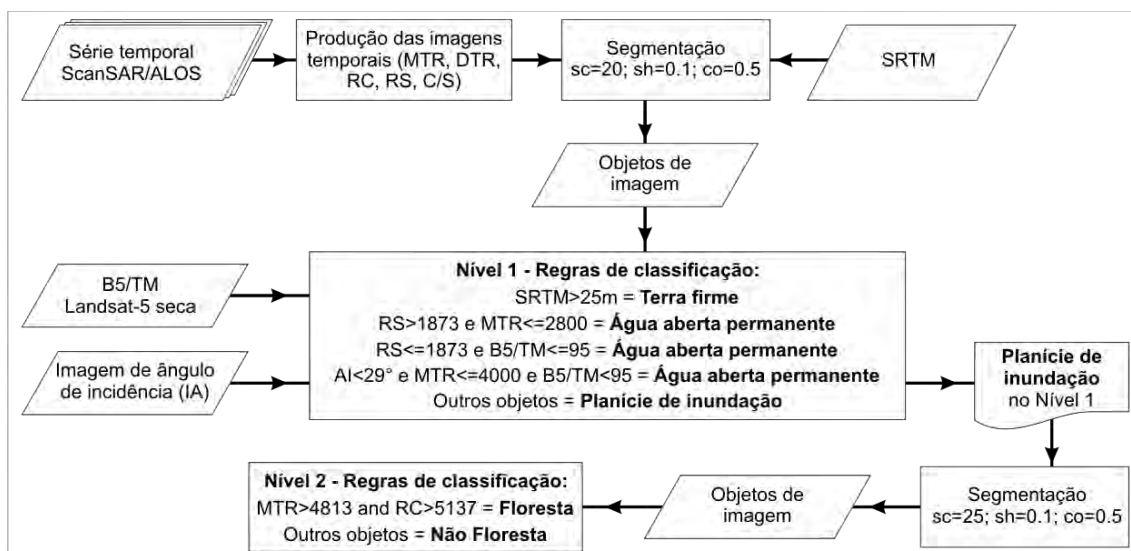


Figura 4.7 - Processos da classificação orientada ao objeto para os níveis 1 e 2. sc=escala; sh=forma; co=compacidade; RS=Retroespalhamento da Seca; RC=Retroespalhamento da Cheia; MTR=Média Temporal do Retroespalhamento; C/S= Razão do retroespalhamento da Cheia pela Seca; DTR=Desvio padrão Temporal do Retroespalhamento; B5/TM= Banda 5 do Landsat-5/TM adquirida na época da seca (baixo nível d'água); e IA=Ângulo de Incidência.

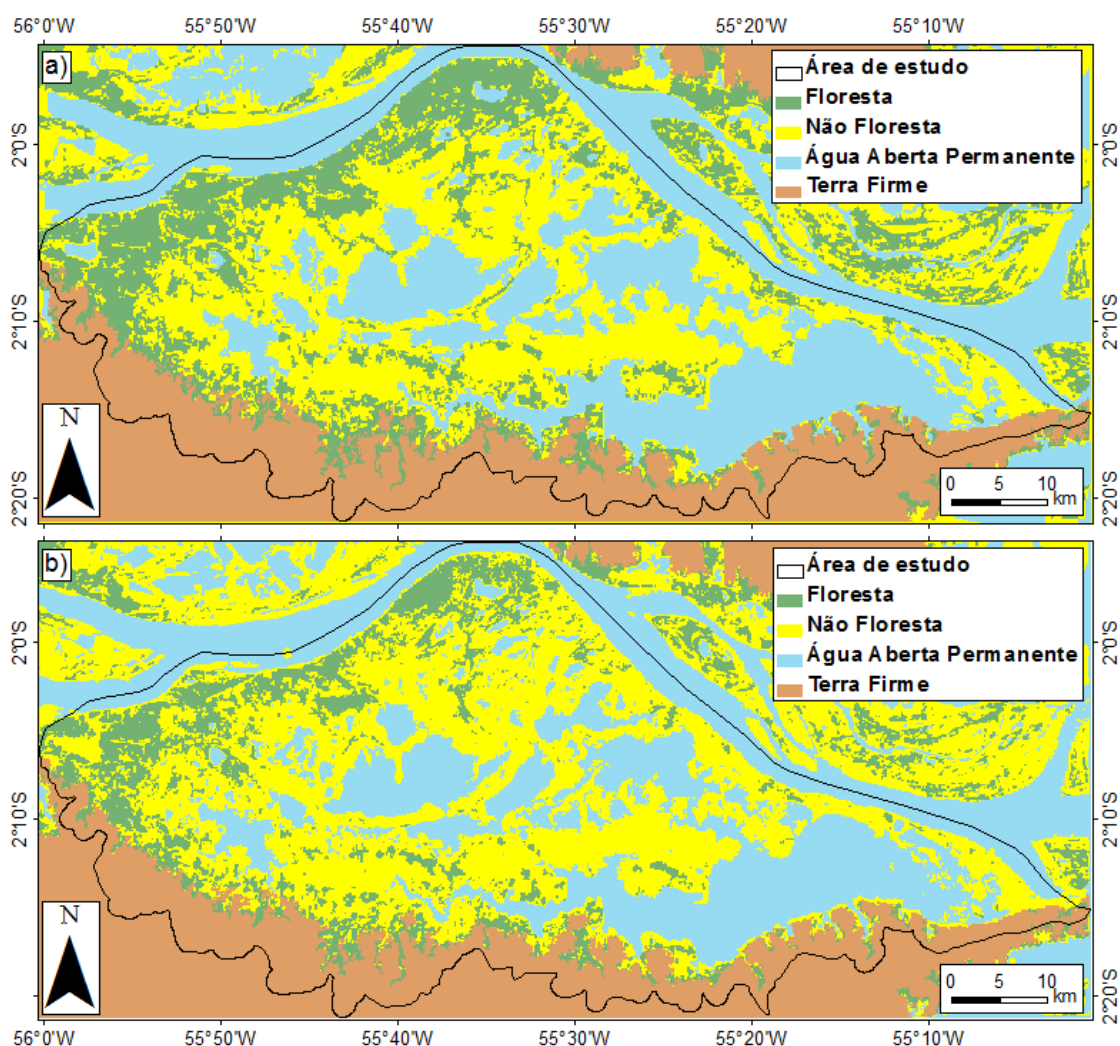


Figura 4.8 – Resultado do Nível 2 da classificação para a) o pulso de inundação de 2007 e b) para os anos de 2009 e 2010.

A diferença da área classificada como Floresta e Não Floresta nos períodos relativos a 2007 e 2009/2010 ocorreu principalmente devido à utilização de diferentes imagens de média de retroespalhamento (MRT). Como as datas de 2009 referiam-se a períodos de níveis d'água extremamente elevados, boa parte das áreas de floresta e de arbustos, encontravam-se cobertos por água durante parte do pulso de inundação, o que resultou em uma redução do retroespalhamento médio.

De forma similar à realizada nos níveis superiores, a classificação do Nível 3 considerou os limiares extraídos por mineração de dados e os limiares baseados no dado SRTM, mas também incluiu para cada data da série temporal a imagem MODIS, para minimizar a confusão entre as classes de solo e água, e também a informação de nível d'água (Figura 4.9). Neste nível da classificação, as áreas de Não Floresta tiveram que ser subdivididas em duas classes intermediárias ('Claras' e 'Escuras'), de acordo com o retroespalhamento da imagem da data analisada.

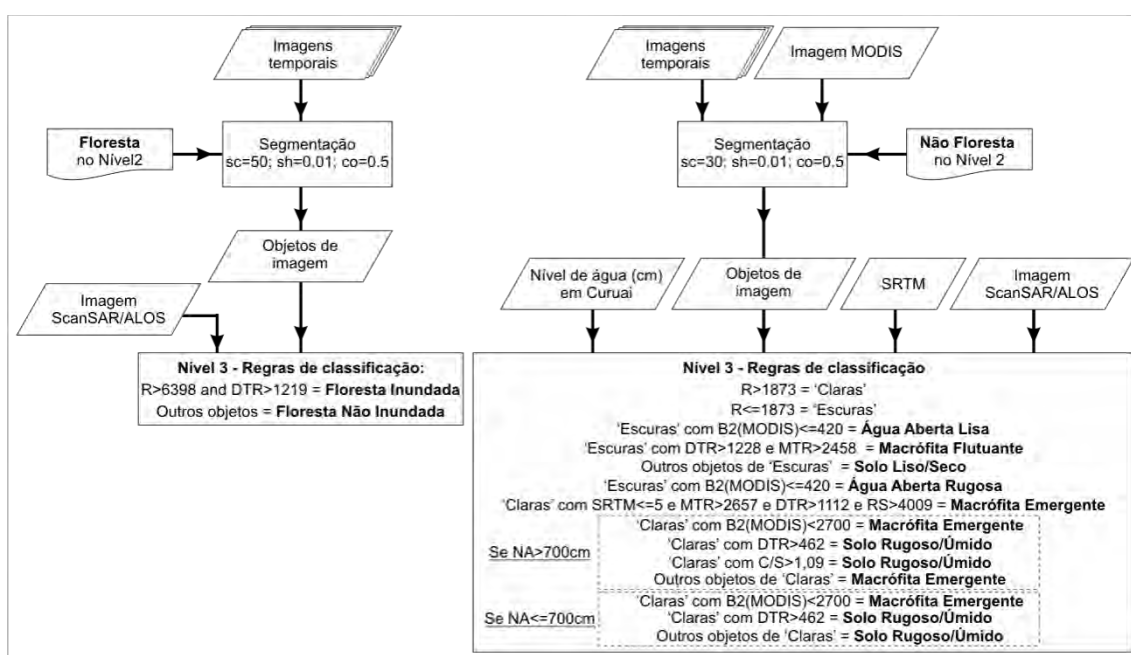


Figura 4.9 - Processos da classificação orientada ao objeto para o Nível 3. sc=escala; sh=forma; co=compacidade; R= Retroespalhamento da data classificada; RC=Retroespalhamento da Cheia; MTR=Média Temporal do Retroespalhamento; C/S= Razão do retroespalhamento da Cheia pela Seca; DTR=Desvio padrão Temporal do Retroespalhamento; B5/TM= Banda 5 do Landsat-5/TM adquirida na época da seca (baixo nível d'água); B2(MODIS)= Banda 2 do MODIS para a data classificada; e NA=Nível d'água em Curuai.

As classes 'Escuras' puderam ser facilmente separadas devido à utilização de imagens MODIS para classificar AAL e SL, e às características temporais bem definidas das classes MF (principalmente seu baixo retroespalhamento ocorrendo apenas no período de cheia).

Para discriminar as classes 'Claras', as imagens MODIS foram igualmente importantes para diferenciar SR de AAR. No entanto, para identificar a classe ME, a qual apresentou a maior variação radiométrica na análise de retroespalhamento, foram aplicadas três estratégias:

- Por se tratar de uma vegetação aquática, a ocorrência de água implica em menores valores de número digital da banda 2 (infravermelho próximo) do MODIS do que os encontrados para a classe SR;
- Esta classe ME ocorre em áreas mais baixas da planície de inundação do LGC; sendo assim, o SRTM também foi utilizado para identificá-las;
- Por meio de inspeção visual das imagens Landsat-5 disponíveis para o pulso de inundação de 2007, identificou-se que acima do nível d'água de 700 cm, as áreas restantes classificadas como 'Claras' eram predominantemente de ME. Em caso de nível d'água inferior a 700 cm estas áreas eram, em sua maioria, compostas por SR.

Os resultados da classificação do nível 3 aplicada para todas as datas da série temporal analisada estão apresentadas nas Figuras 4.10 a 4.21.

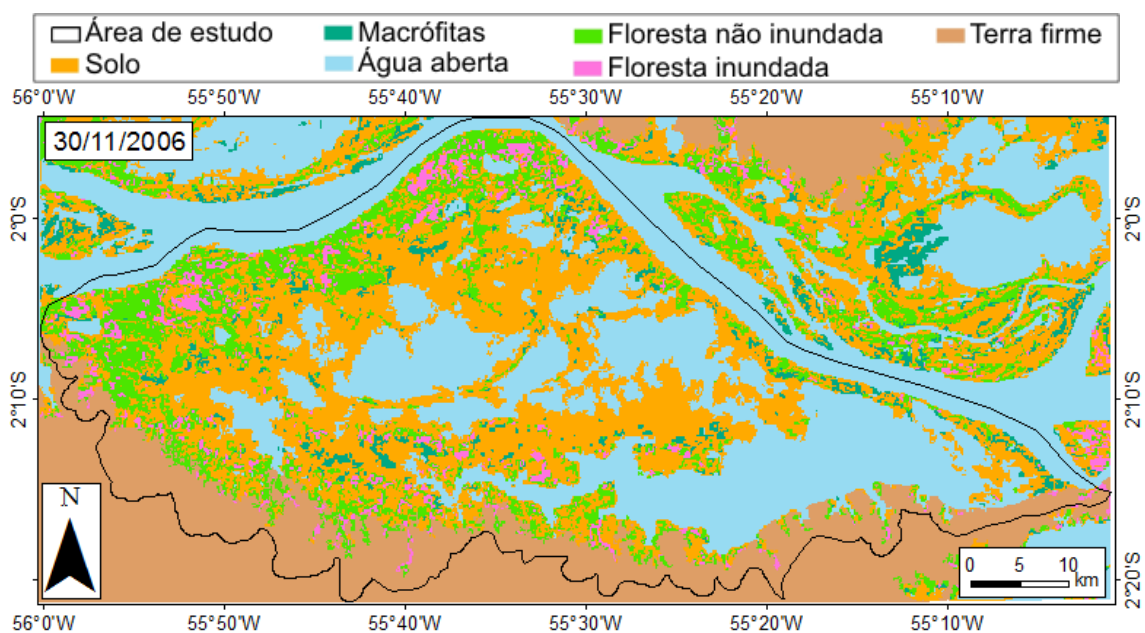


Figura 4.10 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 30/11/2006.

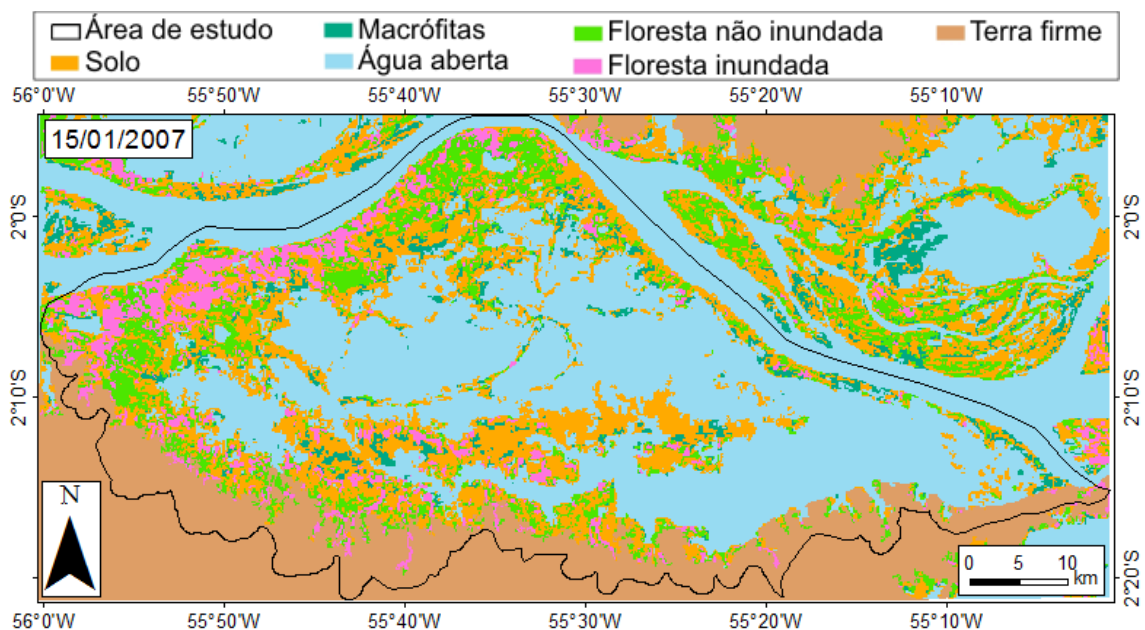


Figura 4.11 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 15/01/2007.

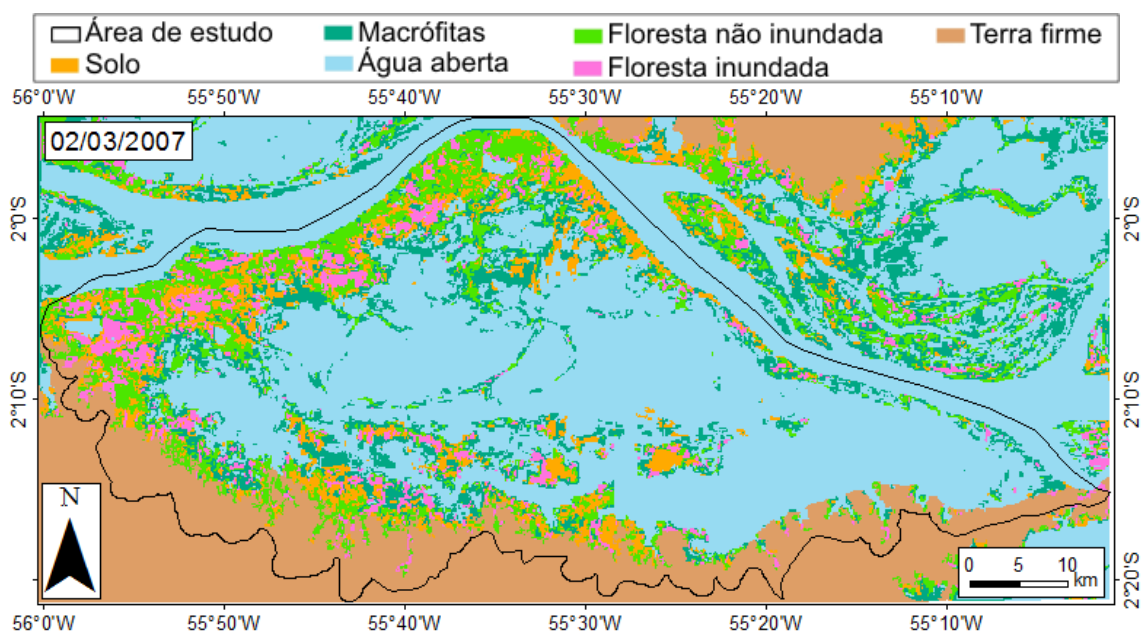


Figura 4.12 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/03/2007.

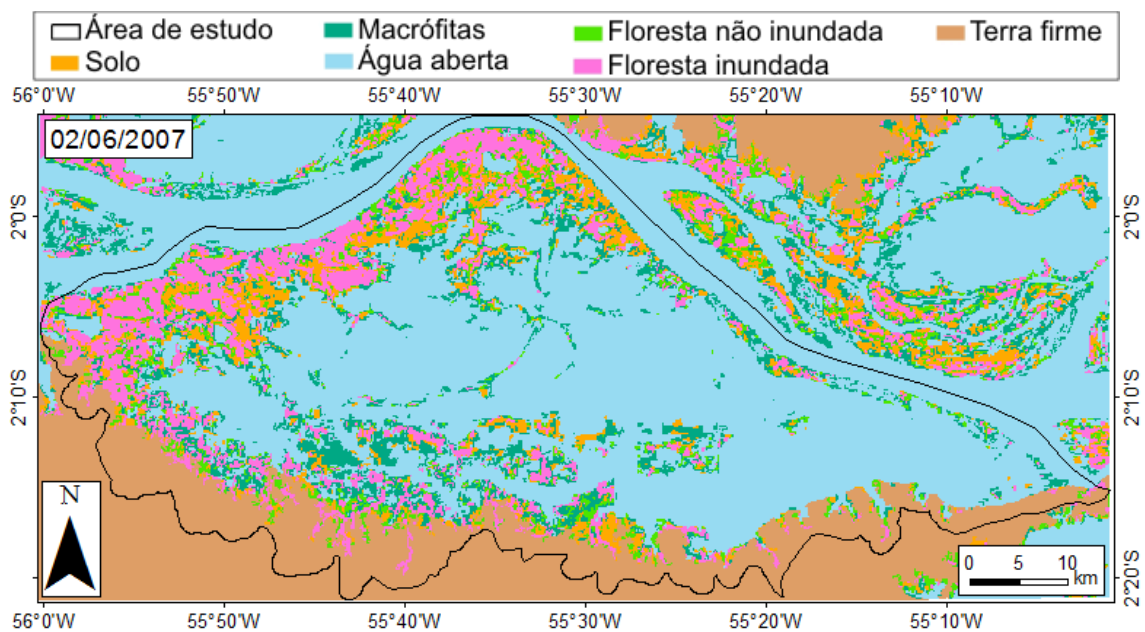


Figura 4.13 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/06/2007.

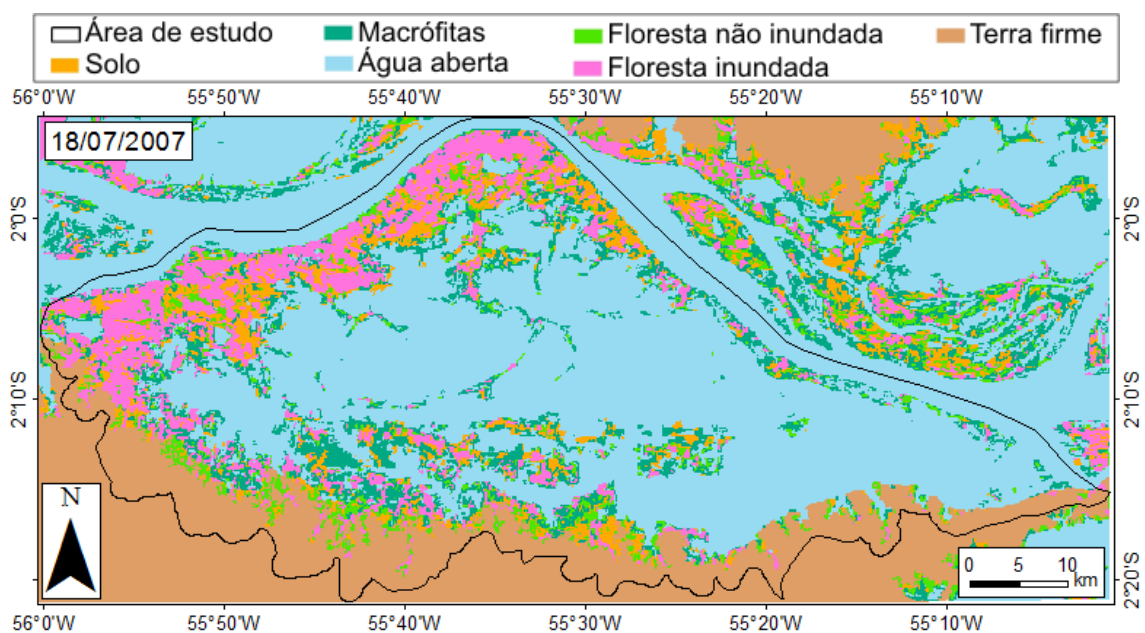


Figura 4.14 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 18/07/2007.

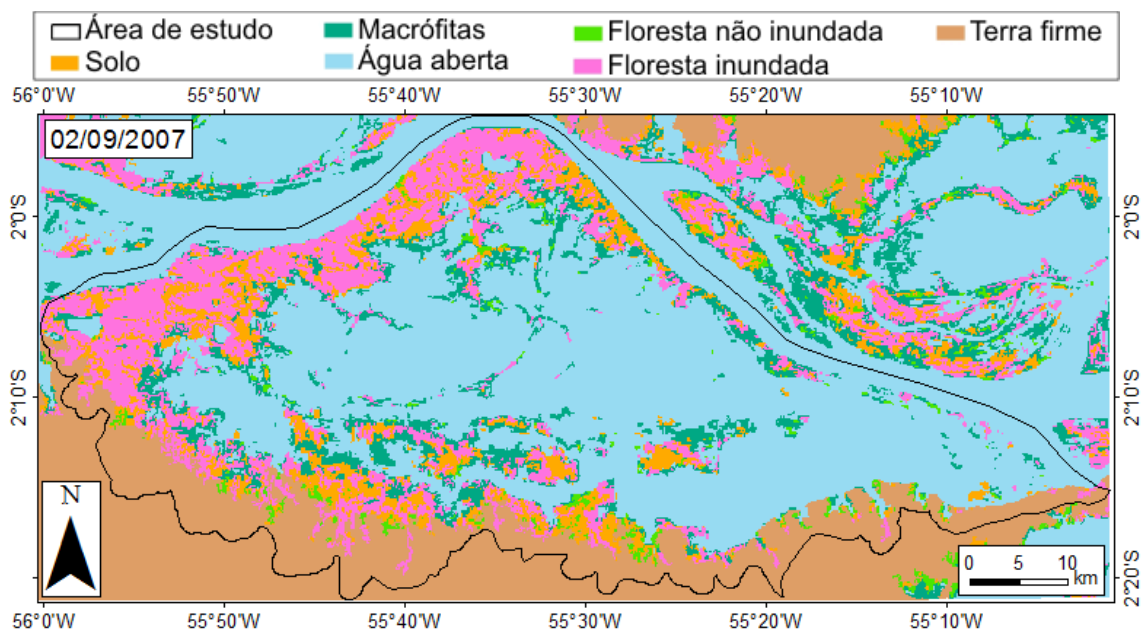


Figura 4.15 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 02/09/2007.

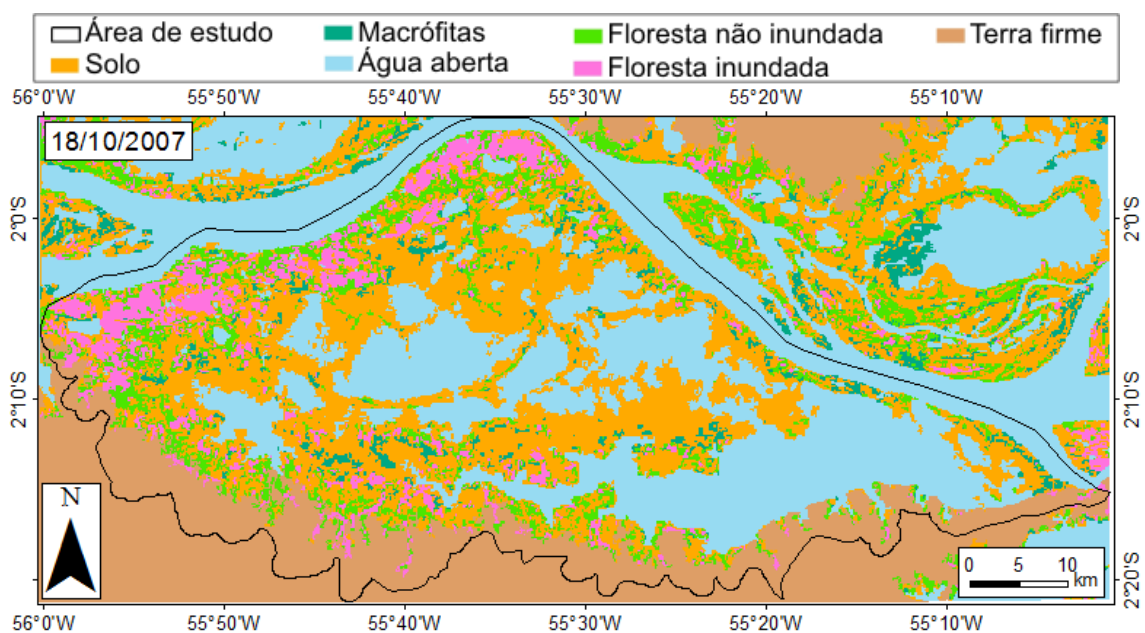


Figura 4.16 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 18/10/2007.

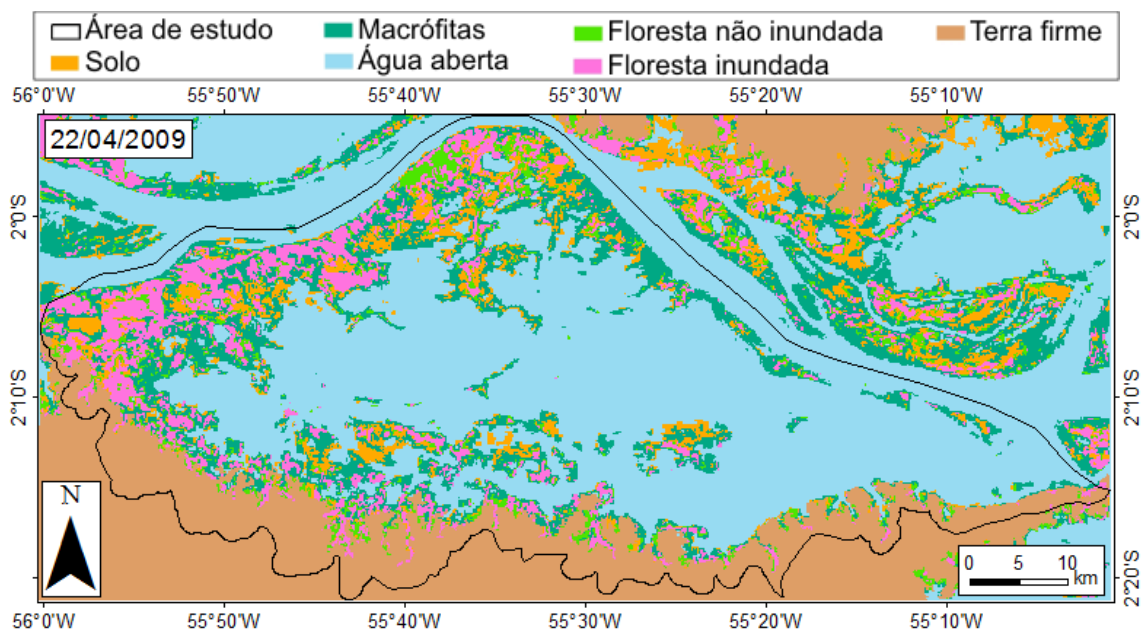


Figura 4.17 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 22/04/2009.

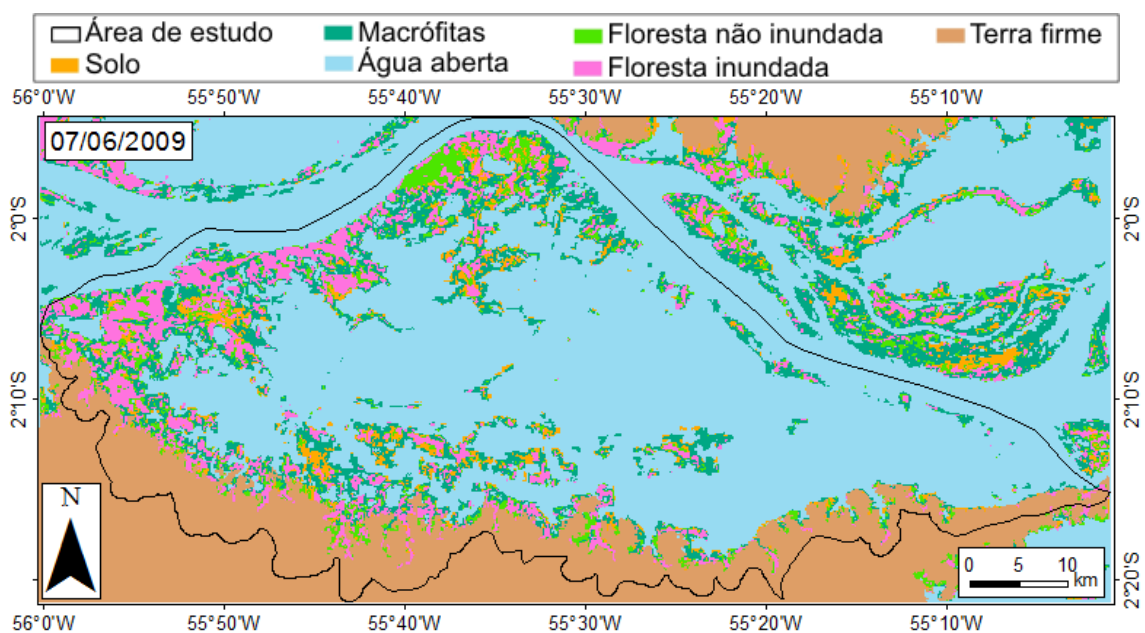


Figura 4.18 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 07/06/2009.

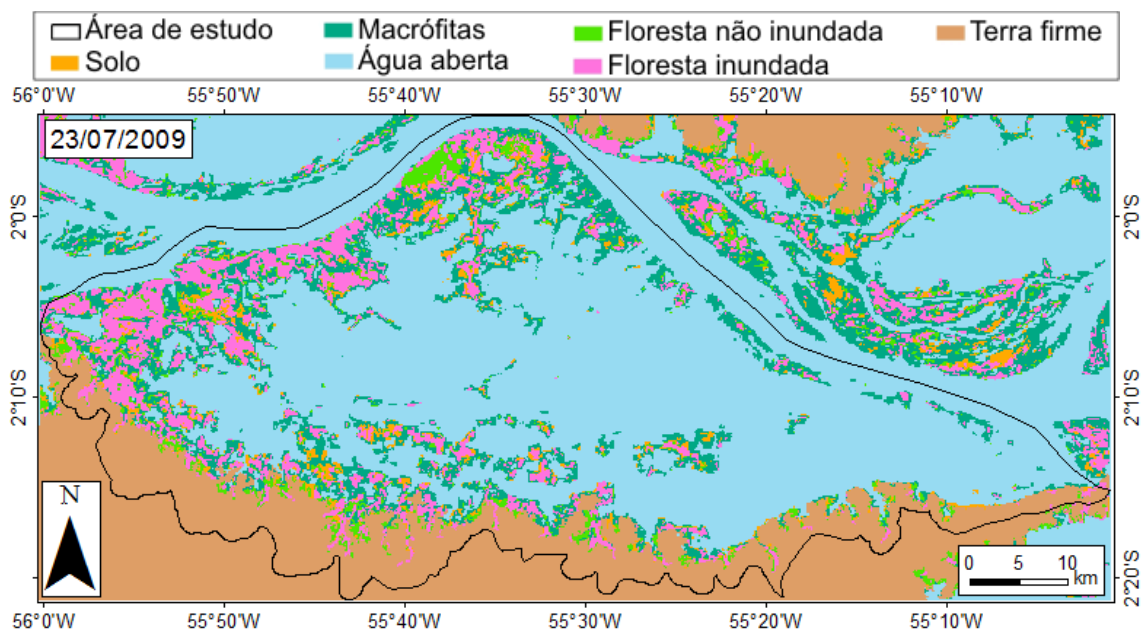


Figura 4.19 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 23/07/2009.

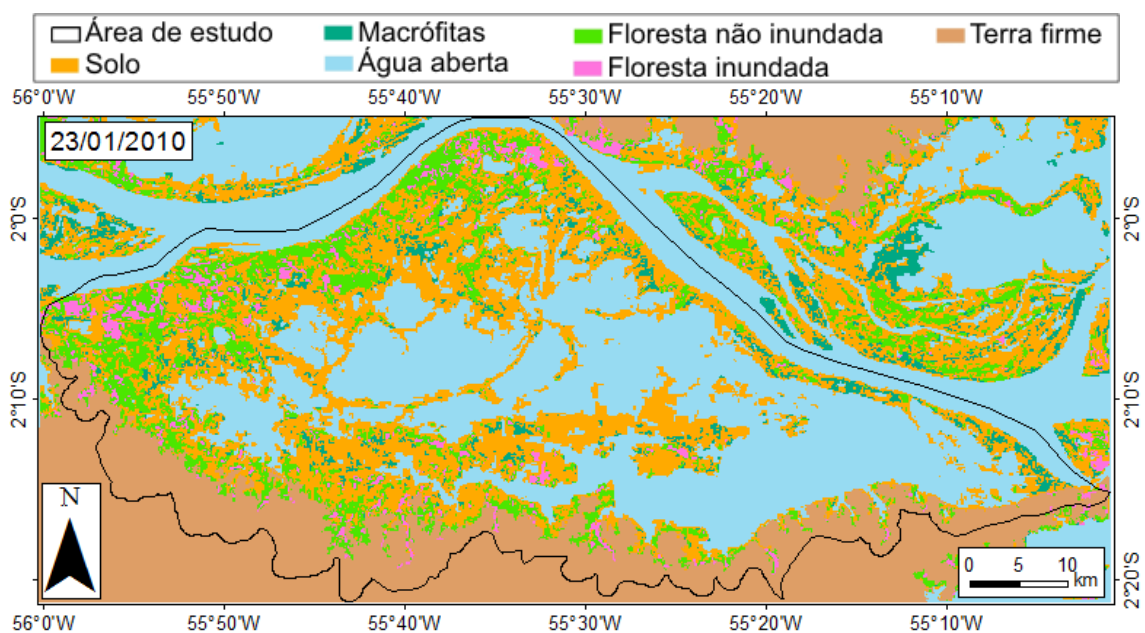


Figura 4.20 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 23/01/2010.

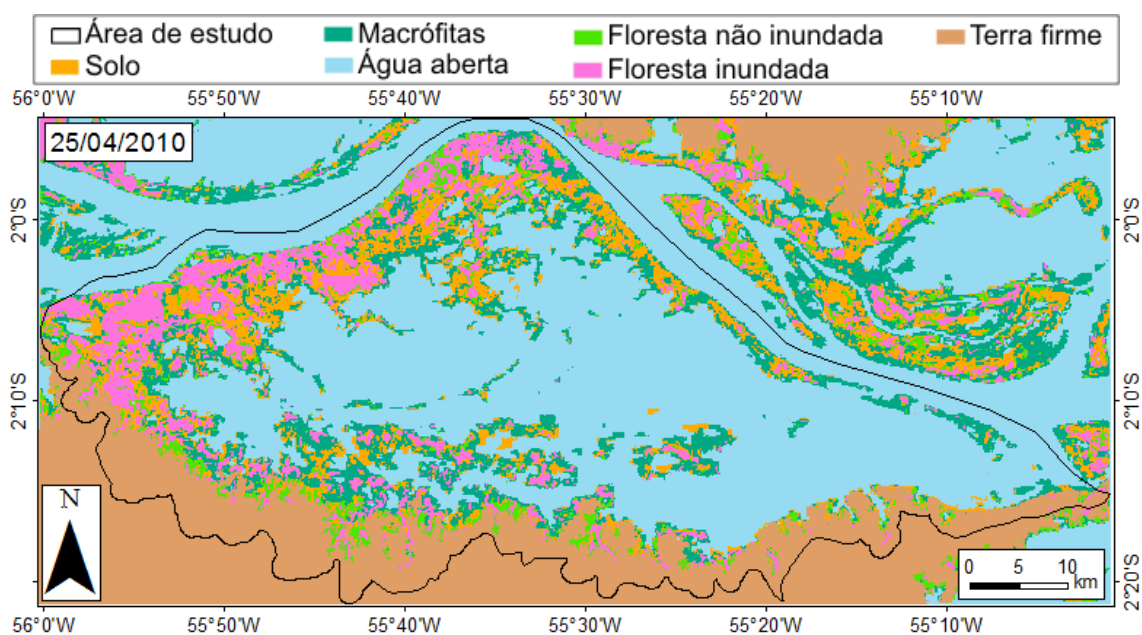


Figura 4.21 – Resultado do Nível 3 da classificação na planície de inundação do LGC para 25/04/2010.

4.2.2. Validação da classificação

À medida que a hierarquia das classes aumentou, sua acurácia de classificação tendeu a diminuir. O Nível 1 apresentou a maior exatidão global e índice kappa, 91% e 0,86, respectivamente. O maior erro de comissão observado neste nível foi para a classe Água Aberta Permanente (12%), enquanto que a maior omissão ocorreu para a classe Planície de Inundação (10%) (Tabela 4.7).

No Nível 2, a classificação apresentou os valores de acurácia de 83% e 0,77 para exatidão global e índice kappa, respectivamente. As classes de Floresta e Não Floresta foram as que apresentaram os maiores erros de classificação (omissão e comissão) (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Matrizes de confusão baseada nos pontos amostrais para o níveis 1 e 2 da classificação.

Nível 1						
Referência						
	Terra firme	Água aberta permanente	Planície de inundação		Total	Omissão
Terra firme	46	0	4		50	8%
Água aberta permanente	0	44	4		48	8%
Planície de inundação	4	6	92		102	10%
Total	50	50	100		200	
Comissão	8%	12%	8%			
Ex. global = 91 % kappa = 0,86						
Nível 2						
Referência						
	Terra firme	Água aberta permanente	Floresta	Não floresta	Total	Omissão
Terra firme	46	0	3	1	50	8%
Água aberta permanente	0	44	1	3	48	8%
Floresta	2	1	40	10	53	25%
Não floresta	2	5	6	36	49	27%
Total	50	50	50	50	200	
Comissão	8%	12%	20%	28%		
Ex. global = 83 % kappa = 0,77						

Para a data de seca, no Nível 3, a exatidão global foi de 77% e ocorreram os principais erros de comissão nas classes FNI (40%) e S (33%) e de omissão nas classes FI (100%) e M (92%). A exatidão global para a data de cheia foi levemente inferior do que na data da seca (76%), porque um maior número de classes apresentaram elevados erros de comissão e de omissão (S, M, FI, e FNI) (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Matriz de confusão baseada nos pontos amostrais para o Nível 3 da classificação das datas de seca (30/11/2006) e cheia (18/07/2007).
 TF=Terra firme; AA=Água aberta; FNI=Floresta Não Inundada;
 FI=Floresta Inundada; S=Solo; M=Macrófita.

Nível 3 – Nov. 2006 (seca)								
	Referência						Total	Omissão
	TF	AA	FNI	FI	S	M		
TF	72	0	2	0	1	0	75	4%
AA	0	149	0	0	17	0	166	10%
FNI	2	2	51	0	24	0	79	35%
FI	0	0	6	0	0	0	6	100%
S	1	18	24	0	110	4	157	30%
M	0	1	2	0	13	1	17	94%
Total	75	170	85	0	165	5	500	
Comissão	4%	12%	40%	-	33%	80%		

Ex. global = 77 % kappa = 0,68

Nível 3 – Jul. 2007 (cheia)								
	Referência						Total	Omissão
	TF	AA	FNI	FI	S	M		
TF	72	0	2	0	1	0	75	4%
AA	0	248	2	5	0	16	271	8%
FNI	2	5	11	8	0	21	47	77%
FI	0	0	17	23	0	0	40	43%
S	1	1	3	6	2	9	22	91%
M	0	14	1	7	0	23	45	49%
Total	75	268	36	49	3	69	500	
Comissão	4%	7%	69%	53%	33%	67%		

Ex. global = 76 % kappa = 0,63

A tendência de redução da acurácia à medida que aumentam os níveis é esperada para abordagens de classificação hierárquica, pois as classes dos primeiros níveis consideravelmente diferentes, em termos de características sazonais e radiométricas, são divididas em diversas classes com propriedades progressivamente mais similares (WALKER et al., 2010). O erro de classificação das classes de Floresta e Não Floresta, por exemplo, foi responsável por uma parte da confusão entre S e FNI (na data da seca) e M e FNI (na data da cheia).

Apesar de o Nível 3 apresentar a menor acurácia de classificação, a combinação destas classes em termos de condição de inundação permitiu a compensação parcial do grau de erro da classificação, resultando em uma elevada acurácia para o mapeamento da inundação, tanto para a seca quanto para a cheia (Tabela 4.9). Isto ocorreu porque grande parte da confusão neste nível foi observada entre classes que apresentaram a mesma condição de inundação. Por exemplo, a grande confusão que ocorreu entre S e FNI na data de seca não reduziu a acurácia final do mapeamento da inundação, pois ambas as classes não são inundadas. O mesmo ocorreu na data da cheia para as classes AA e M. A exatidão global dos mapas de inundação para seca e cheia, respectivamente, foram 88% e 90%.

Tabela 4.9 – Matriz de confusão baseada nos pontos amostrais para condição de inundação das datas de seca (30/11/2006) e cheia (18/07/2007).

Condição de inundação – Nov. 2006 (seca)				
Referência				
	Inundado	Não inundado	Total	Omissão
Inundado	152	38	190	20%
Não inundado	23	287	310	7%
Total	175	325	500	
Comissão	8%	12%		
Ex. global = 88 % kappa = 0,74				
Condição de inundação – Jul. 2007 (cheia)				
Referência				
	Inundado	Não inundado	Total	Omissão
Inundado	362	28	390	7%
Não inundado	24	86	110	22%
Total	386	114	500	
Comissão	8%	12%		
Ex. global = 90 % kappa = 0,70				

O principal erro da seca foi observado nas áreas não inundadas classificadas como inundadas (erro de omissão de 20%), superestimando as áreas inundadas. O contrário ocorreu na data de cheia, quando o principal erro ocorreu com as áreas inundadas sendo classificadas como não inundadas (erro de omissão de 22%), subestimando as áreas inundadas.

4.3. Estimativas de área inundada

Um importante destaque deve ser feito com respeito aos resultados da classificação de Floresta e Não floresta no Nível 2. Estas classes apresentaram diferentes áreas mapeadas para os dois períodos analisados (2007 e 2009/2010), pois foram classificadas a partir de médias calculadas para os referidos períodos, e com um diferente número de imagens (7 cenas para 2007 e 12 cenas para 2009/ 2010).

Desta maneira, a área de Floresta foi reduzida em 82,5 km², implicando em menores áreas de FI e FNI para as datas de 2009 e 2010, e um aumento na área das classes AA, M e S. Para verificar se esta diferença poderia ter resultado em erros no mapeamento da inundação, comparou-se as áreas das classes em cenas obtidas em níveis d'água muito próximos: 18/07/2007 (NA=959 cm) e 25/04/2010 (NA=952 cm) (Tabela 4.10). Para estas cotas relativamente elevadas, foi observada relativa constância dos valores de AA, S e FNI, enquanto provavelmente grande parte da área que não foi classificada como FI na data de 2010 (redução de 6%) foi classificada com Macrófitas (aumento de 5%).

Tabela 4.10 – Áreas relativas das classes no Nível 3 na área de estudo em 18/07/2007 (NA=959 cm) e 25/04/2010 (NA=952 cm).

Classe	18/07/2007	25/04/2010
	Área (%)	Área (%)
Floresta Inundada	17%	11%
Floresta não inundada	2%	4%
Solo	10%	11%
Macrófita	10%	15%
Água aberta	61%	59%

Estes resultados indicam que a geração de diferentes resultados de classificação no Nível 2 não diminuiu a acurácia do mapeamento da inundação, uma vez que as áreas de floresta inundada foram classificadas como

macrófitas (ambas inundadas). Uma alternativa para eliminar esta discrepância entre os períodos seria utilizar um único resultado no Nível 2 para ambas as séries de imagens.

Analisando o comportamento das áreas das classes no Nível 3 ao longo do pulso de inundação de 2007, seria esperado que as classes 'inundadas' AA e FI acompanhassem o nível d'água da régua de Curuai ao longo do pulso de inundação, com o contrário ocorrendo com as classes 'não inundadas' S e FNI. Nos resultados obtidos, AA e S realmente seguiram este comportamento esperado (Figuras 4.22 e 4.23), mas o mesmo não aconteceu para as classes FI e FNI (Figuras 4.24 e 4.25).

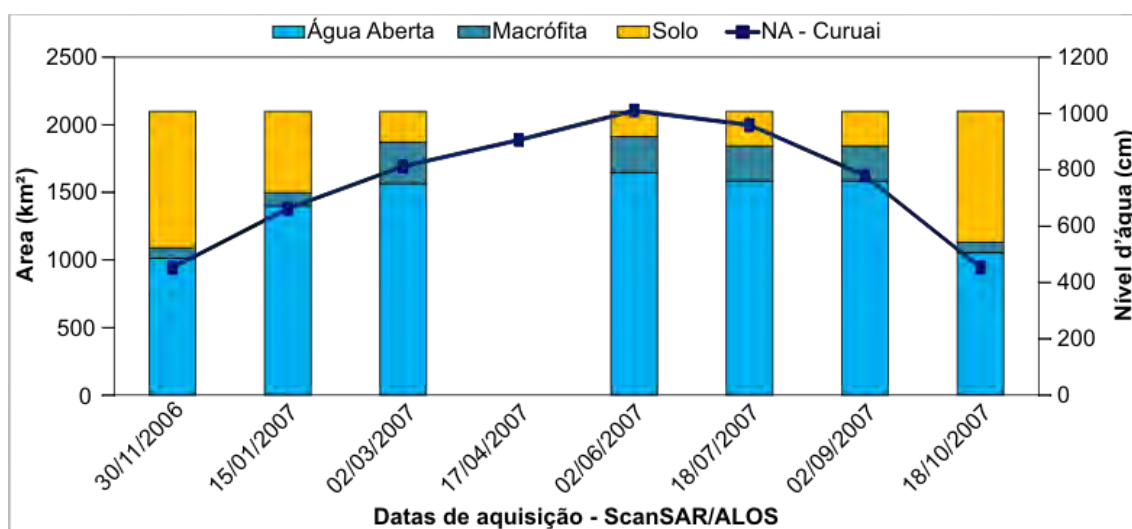


Figura 4.22 – Áreas das classes AA, M e S ao longo do pulso de inundação de 2007.

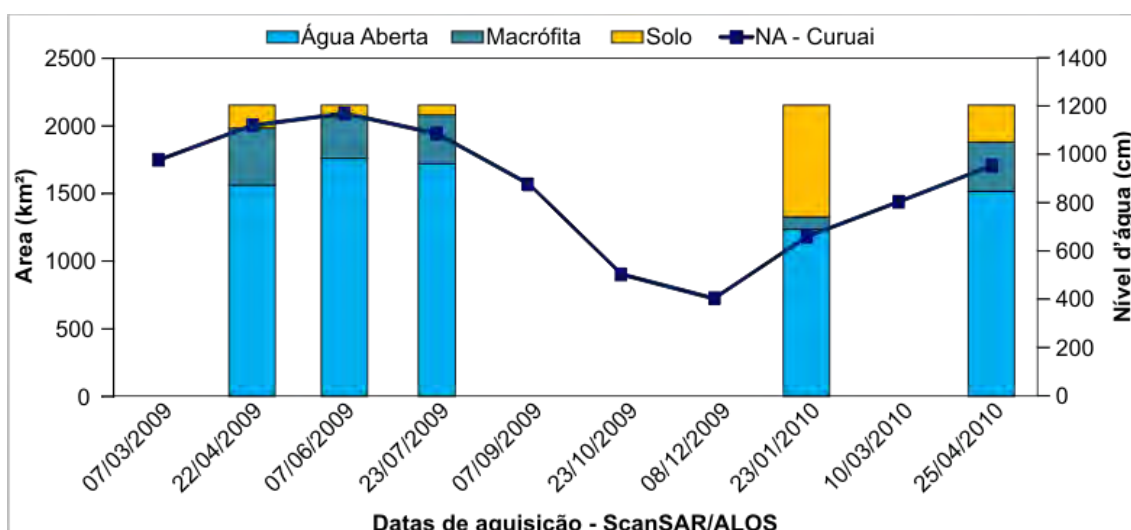


Figura 4.23 – Áreas das classes AA, M e S ao longo dos anos de 2009 e 2010.

Não era esperado que as áreas de macrófitas acompanhassem o nível d'água ao longo do pulso de inundação de 2007 (verificado na Figura 4.22), como documentado por Silva et al. (2010) utilizando dados de SAR em banda C. Isto provavelmente ocorreu porque a banda L não foi capaz de detectar as macrófitas com pouca biomassa, no início da fase de enchente, classificando-as como solo ou água.

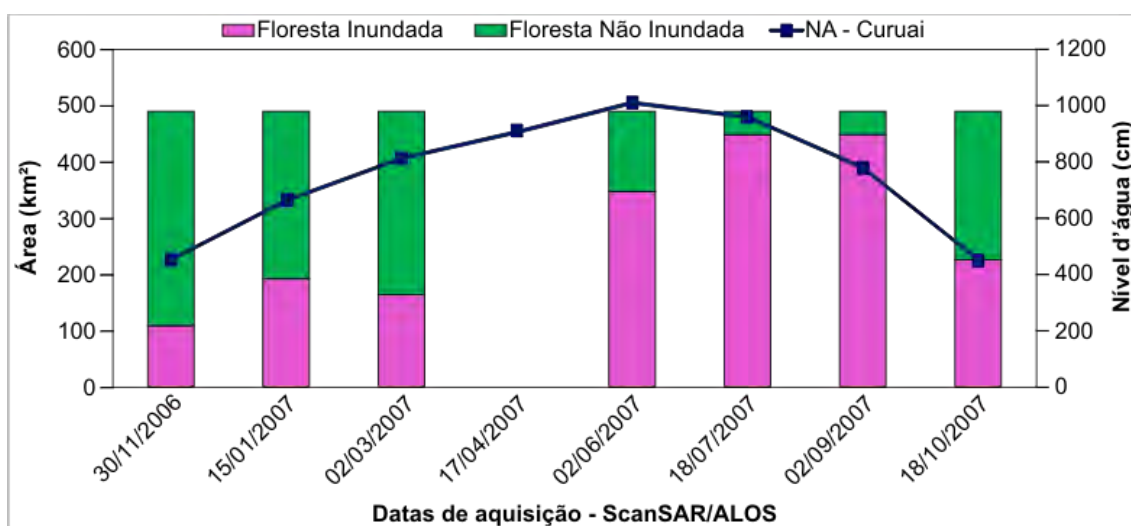


Figura 4.24 – Áreas das classes FI e FNI ao longo do pulso de inundação de 2007.

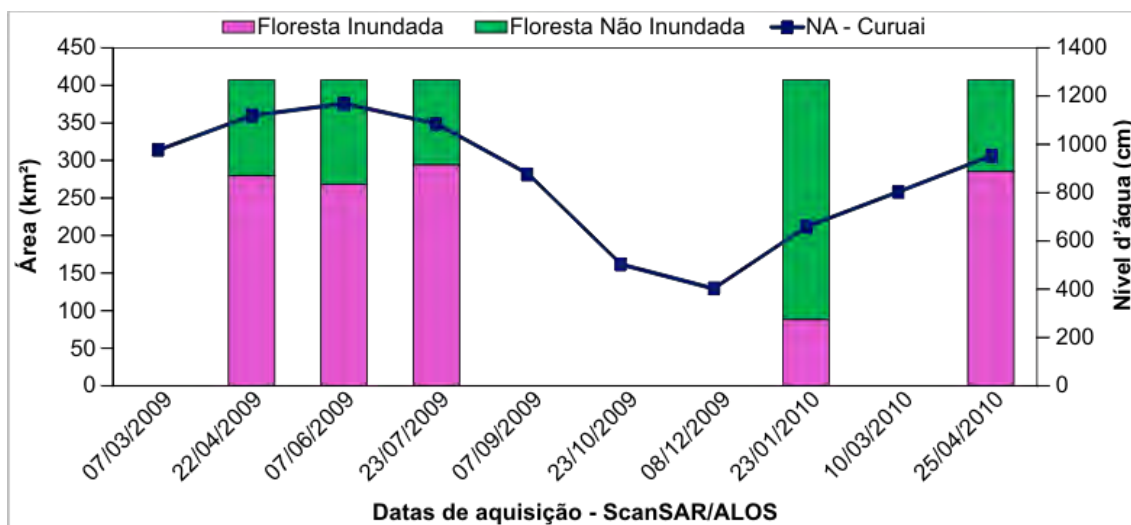


Figura 4.25 – Áreas das classes FI e FNI ao longo dos anos de 2009 e 2010.

A maior área de FI foi observada no período de vazante. Para o pulso de inundação de 2007 a maior área da classe FI foi observada durante os meses de Julho e Setembro (ambas com 488,6 km²). Apesar de não haver mais imagens disponíveis na vazante de 2009 (como a data de 07/09/2009, por exemplo), a data do final de Julho deste ano (fase inicial da vazante) também foi a de maior área relativa para a classe FI (294,3 km²).

As maiores áreas de FI nas datas da vazante do que nas datas de cheia do Rio Amazonas podem estar relacionadas a dois fatores: i) baixa acurácia de classificação para discriminar FI e FNI; e ii) nas datas da cheia boa parte da classe FI está totalmente coberta por água, uma vez que esta classe inclui vegetação arbustiva, resultando em um baixo retroespalhamento o que impossibilita o algoritmo de identificar estas áreas de floresta.

A extensão total inundada para todas as datas seguiu o comportamento do nível d'água, sendo maior nas datas de maiores cotas (Tabela 4.11 e Apêndice A). Seguindo o estudo de Barbosa (2005), um modelo polinomial de segundo grau foi ajustado para representar a variação da área inundada em função da cota na estação fluviométrica de Curuai.

Tabela 4.11 – Áreas inundadas mapeadas (em km²) para a série temporal analisada.

Data	Área total inundada mapeada (km ²)	Nível d'água em Curuai (cm)
30/11/2006	1156,0	452
15/01/2007	1670,2	662
02/03/2007	2036,4	812
02/06/2007	2258,8	1010
18/07/2007	2257,7	959
02/09/2007	2239,9	779
18/10/2007	1319,3	453
22/04/2009	2260,4	1119
07/06/2009	2332,5	1169
23/07/2009	2372,2	1085
23/01/2010	1371,8	658
25/04/2010	2159,4	952

4.3.1. Modelo do pulso de inundação de 2007

O modelo polinomial de 2º grau ajustado entre a área total inundada durante o pulso de inundação de 2007 e o nível d'água na estação de Curuai (Figura 4.26) apresentou R² de 0,94 (p<0,05). Por se tratar de um modelo polinomial de 2º grau, cujo gráfico é uma parábola, este modelo é válido até o ponto máximo da parábola, de coordenadas nível d'água=1087 cm e área inundada=2299 km². Portanto, após a cota de 1087 cm na estação de Curuai, um modelo linear constante é válido para o cálculo da área inundada:

- Para nível d'água em Curuai ≤ 1087 cm:

$$AI = (-2,67 \times 10^{-3} \pm 0,001) \times NA^2 + (5,81 \pm 2) \times NA - 858,7 \pm 757 \quad (4.4)$$

- Para nível d'água em Curuai > 1087 cm:

$$AI = 2299 \quad (4.5)$$

Onde: NA é o nível d'água (em cm) na estação de Curuai e AI é a área inundada na planície do LGC (em km²).

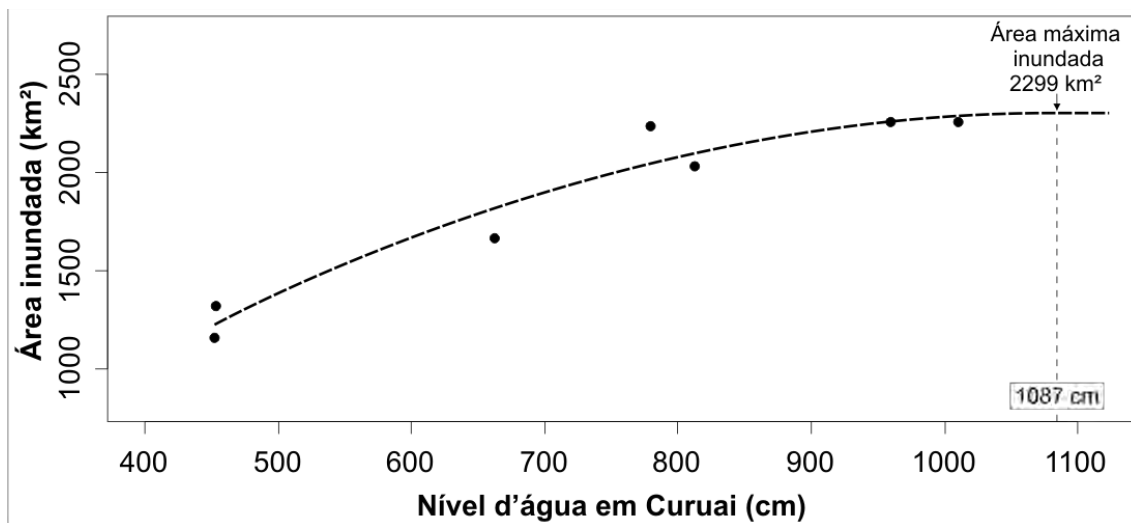


Figura 4.26 – Modelo ajustado com os resultados do mapeamento do pulso de inundação de 2007 na planície de inundação do LGC.

Os resultados do mapeamento da inundação para as 5 datas de 2009 a 2010 foram utilizados para a validação do modelo (Tabela 4.12). O modelo teve um RMSE de 202,4 km² (equivalente a 10 % da média dos valores observados) sem nenhum padrão de super ou subestimativa identificado para as datas de níveis d'água mais elevados (> 950 cm). No entanto, uma considerável superestimativa da área inundada foi observada na data relativa à fase de enchente de 2010 (32% superior à área observada).

Tabela 4.12 – Validação do modelo do pulso de inundação de 2007 com as datas dos anos de 2009 e 2010.

Data ScanSAR	Nível d'água (cm)	Área inundada			Razão Est./Obs.
		Observada (km ²)	Estimada (km ²)	Diferença (km ²)	
22/04/2009	1119	2260,38	2299,0	38,6	1,02
07/06/2009	1169	2332,46	2299,0	-33,5	0,99
23/07/2009	1085	2372,18	2298,7	-73,5	0,97
23/01/2010	658	1371,81	1806,3	434,5	1,32
25/04/2010	952	2159,43	2249,7	90,3	1,04

O modelo ajustado com os dados do pulso de inundação de 2007 estimou eficientemente a área inundada para a maioria das datas de 2009 e 2010, com

exceção da data da enchente de 2010 (23 de Janeiro) em que a área foi amplamente superestimada.

Contudo, os dois anos utilizados para validação foram anos considerados 'extremos' em termos de nível d'água na Bacia do Rio Amazonas, tendo respectivamente o maior e o menor nível d'água observados nos últimos 50 anos. Embora o modelo tenha sido eficiente na previsão das áreas inundadas de 2009, a superestimativa da data de 2010 pode estar relacionada à seca extrema que ocorreu durante o início do pulso de inundação deste ano (LEWIS et al., 2011), refletindo em maiores áreas secas durante a fase de enchente.

4.3.2. Modelo de toda série temporal

O modelo ajustado com os resultados do mapeamento de todas as datas disponíveis (série temporal de 2006 a 2010) para representar a variação da área inundada em função da cota em Curuai (Figura 4.27), apresentou R^2 inferior ao do modelo anterior (0,89; p -valor $<0,05$), tendo seu ponto máximo modificado (nível d'água=1249 cm e área inundada=2365 km²):

- Para nível d'água em Curuai ≤ 1249 cm:

$$AI = (-1,86 \times 10^{-3} \pm 0,001) \times NA^2 + (4,648 \pm 1,5) \times NA - (538,7 \pm 587) \quad (4.6)$$

- Para nível d'água em Curuai > 1249 cm:

$$AI = 2365 \quad (4.7)$$

Onde: NA é o nível d'água (em cm) na estação de Curuai e AI é a área inundada na planície do LGC (em km²).

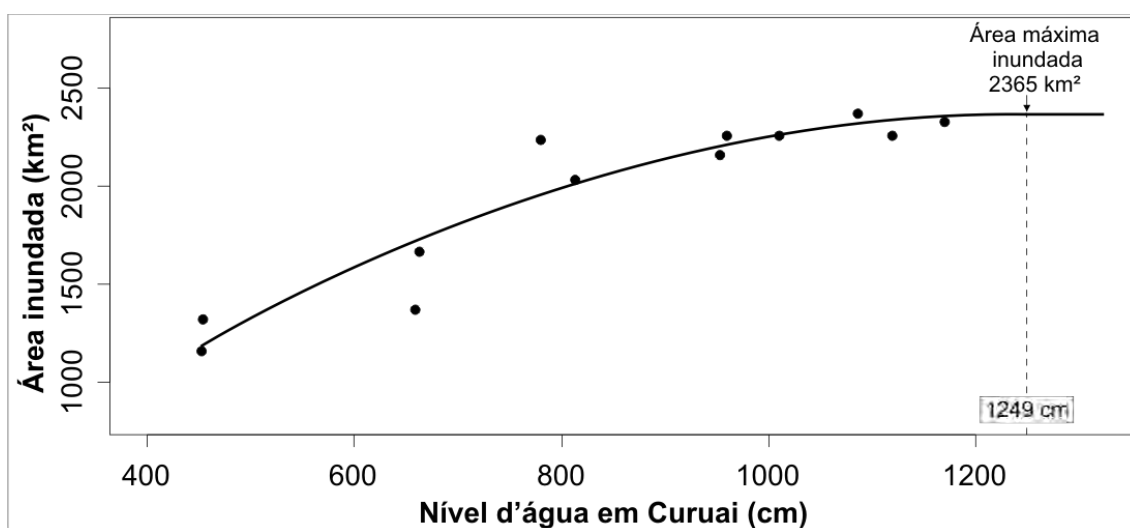


Figura 4.27 – Modelo ajustado com os resultados do mapeamento para toda a série temporal analisada (2006 a 2010) na planície de inundação do LGC.

Este modelo foi comparado com dois modelos que estimam as áreas de águas abertas também realizados para a planície de inundação do LGC: i) modelo de regressão linear ajustado por Bonnet et al. (2008), utilizando como base os resultados do mapeamento com imagens JERS-1 realizado por Martinez e Le Toan (2007); e ii) modelo de regressão polinomial de 2° grau ajustado por Barbosa (2005), realizado a partir de mapeamento com imagens Landsat-5. A Tabela 4.13 apresenta os modelos citados e o modelo ajustado para toda série temporal no presente estudo, bem como os valores do coeficiente de determinação e do p-valor, e na Figura 4.28 estão apresentadas as curvas dos três modelos para o intervalo de nível d'água em Curuai das datas mapeadas de 2006 a 2010 (452 a 1169 cm).

Tabela 4.13 – Modelos ajustados nos trabalhos de Bonnet et al. (2008), Barbosa (2005) e no presente estudo (toda série temporal). AI é a área inundada (km²) e NA é o nível d'água (em cm) na estação de Curuai.

Autor	Modelo de variação da área inundada	R ²	p-valor
Bonnet et al. (2008)	$AI = -2,16 \times NA - 35$	0,99	*
Barbosa (2005)	$AI = -0,8 \times 10^{-3} \times NA^2 + 2,43 \times NA - 177,4$	0,99	$<10^{-4}$
Presente estudo	$AI = -1,86 \times 10^{-3} \times NA^2 + 4,65 \times NA - 538,7$	0,89	$4,4 \times 10^{-5}$

* Valor não apresentado em Bonnet et al. (2008).

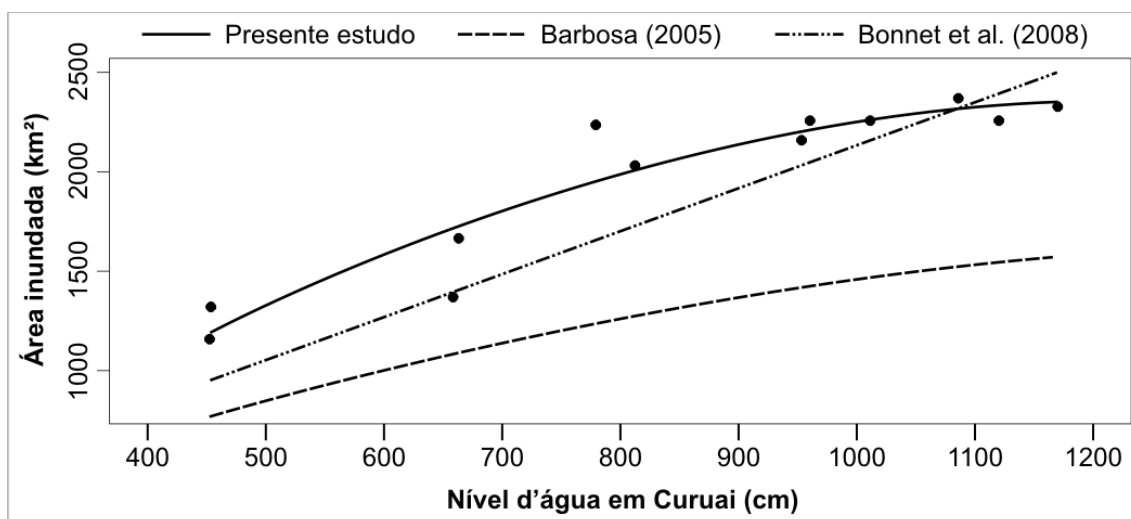


Figura 4.28 – Modelos de regressão entre área inundada e nível d'água em Curuai ajustados pelo presente estudo, por Barbosa (2005) e por Bonnet et al. (2008).

Em relação ao modelo ajustado neste trabalho, Bonnet et al. (2008) subestima a área inundada para os menores valores de cota em Curuai (de 450 a 950cm), com exceção da data de Janeiro de 2010. Por outro lado, ele superestima a área inundada para as maiores cotas (acima de 1100 cm), devido à sua natureza linear. Observando-se a Figura 4.28, torna-se evidente que um ajuste não linear é o mais apropriado para estimar a área inundada na planície de inundação estudada. É esperado que as diferenças nas áreas inundadas para cotas extremas sejam reduzidas e se aproximem de um valor constante devido às características topográficas da planície.

Já o modelo polinomial de Barbosa (2005) foi muito semelhante ao ajustado neste trabalho, diferindo principalmente em magnitude (inferior na ordem de 500 a 700 km²). Esta diferença é justificada pelo mapeamento apenas das áreas de água aberta realizado pelo autor. O valor médio das áreas de florestas inundadas, somado às áreas de macrófitas, equivale a uma área 500 km², confirmando que a diferença entre os modelos deve-se principalmente a não inclusão destas áreas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia desenvolvida neste estudo para o monitoramento de inundação pode auxiliar diversas questões científicas, tais como avaliações do impacto de variações anuais no pulso de inundação do Rio Amazonas sobre aspectos socioeconômicos da comunidade ribeirinha, estudos sobre o transporte de sedimentos dentro do lago e na interface rio-lago, estudos sobre a zonação e crescimento dos diferentes tipos de vegetação, e estimativas mais robustas de trocas de carbono com a atmosfera.

O trabalho verificou grande potencial nas imagens ScanSAR/ALOS para o mapeamento da inundação, as quais podem fornecer informações frequentes e recorrentes de diversas datas do ano hidrológico. No entanto, a análise das características de imageamento e das propriedades dos alvos é uma etapa fundamental neste tipo de abordagem. Nesta etapa foram identificadas as similaridades radiométricas dos alvos de interesse nas imagens e foram explorados os atributos temporais que favoreceram a classificação do uso do solo, preliminar ao mapeamento da inundação.

O mapeamento realizado pela técnica de classificação hierárquica orientada ao objeto apresentou como vantagem a independência da etapa de edição manual, o que retardaria a produção de mapas de área inundada para toda série temporal. Por outro lado, tendo em vista as potenciais confusões de classificação dos tipos de cobertura da terra, foi imprescindível a utilização de dados auxiliares, principalmente os de sensores ópticos, para auxiliar a classificação. Uma alternativa viável seria a utilização de dados de SAR adquiridos em menores comprimentos de onda, os quais são mais sensíveis a pequenas alterações de rugosidade dos alvos lisos (AUBERT et al., 2011). Atualmente, a plataforma Radarsat-2 oferece imageamento em banda C, no modo ScanSAR, com resolução espacial de 100 ou 50 metros, e largura de faixa de 500 ou 300 km, respectivamente (MORENA et al., 2004).

Deve-se destacar também, que a validação do estado de inundação das áreas de florestas e arbustos foi realizada por uma aproximação, utilizando o modelo de elevação que acopla a batimetria de Barbosa (2005) com o SRTM, o que certamente implicou em erro. Para validação das classes Floresta Inundada e Não Inundada com maior precisão, seria ideal que existisse uma rede de monitoramento do nível d'água concomitante à aquisição das imagens nas áreas de floresta da planície de inundação do LGC. Poderia ser utilizado, por exemplo, o método dos termo-sensores (ou *i-buttons*) aplicado por Affonso et al. (2011b) para lagos da Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Mamirauá (RDSM), na região de Tefé, Alto Rio Amazonas, que permitem a obtenção de informações de nível d'água nas florestas.

Embora o sensor PALSAR/ALOS tenha cessado recentemente suas operações, devido a uma falha no sistema de painéis solares, a continuidade da missão ALOS manterá o modo de observação ScanSAR no satélite ALOS-2. O modo ScanSAR/ALOS-2 apresentará um aumento da área observável, porque conterà uma antena com capacidade de visada para os dois lados (JAXA, 2012; SUZUKI et al., 2009). Este aspecto é muito promissor para o monitoramento da inundação em grandes áreas alagáveis, pois irá reduzir o período de revisita do modo ScanSAR de 46 para 14 dias.

Estudos futuros focados em grandes áreas inundáveis poderão utilizar estes dados de SAR de amplo campo de visada adquiridos em diversas órbitas, a fim de melhor controlar, e talvez até fazer uso, das variações no ângulo de incidência, e assim permitir um monitoramento operacional destas áreas inundáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, A.G.; BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M. (a) Water quality changes in floodplain lakes due to the Amazon River flood pulse: Lago Grande de Curuai (Pará). **Brazilian Journal of Biology**, v.71, n.3, p.601-610, 2011.

AFFONSO, A.G. et al. (b) Estudo da dinâmica de inundação na várzea Amazônica através de termo-sensores de campo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011. Curitiba, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.5092-5099.

ALCÂNTARA, E. H. et al. A contribution to understanding the turbidity behaviour in an Amazon floodplain. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14, n.2, p.351-364, 2010.

ALSDORF, D. et al. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. **Nature**, v.404, p. 174-177, 2000.

ARDILA, J.P.; TOLPEKIN, V.; BIJKER, W. Angular backscatter variation in L-band ALOS ScanSAR Images of tropical forest areas. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v.7, n.4, p.821-825, 2010.

AUBERT, M. et al. Remote Sensing of Environment Analysis of TerraSAR-X data sensitivity to bare soil moisture, roughness, composition and soil crust. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.8, p.1801-1810, 2011.

BALENZANO, A. et al. Dense temporal series of C- and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.4, n.2, p.439-450, 2011.

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. 2005. 286p. (INPE-14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, C.C.F. et al. Metodologia de análise de dinâmica de área e volume inundável: o exemplo da várzea do Lago Grande de Curuai. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.58, n.3, p. 201-210, 2006.

BARBOSA, C.C.F. et al. Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. **Limnology**, v.11, p.155-166, 2010.

BELGER, L. FORSBERG, B.R.; MELACK, J.M. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial wetlands in the upper Negro River basin, Brazil. **Biogeochemistry**, v.105, n.1-3, p.171-183, 2011.

BENZ, U. et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.58, n.3-4, p.239-258, 2004.

BONNET, M. et al. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). **Journal of Hydrology**, v.349, n.1-2, p.18-30, 2008.

CHAPMAN, B.; MCDONALD, K.; HESS, L. **K&C Science Report – Phase 2: ALOS image mosaics for wetland mapping**. JAXA-EORC, 2010. Disponível em: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/kyoto/phase_1/KC-Phase1-report_Chapman_v3.4-1.pdf. Acesso em: 20 jan. 2012.

CLOUDE, S.R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.1, p.68-78, 1997.

COSTA, M.P.F. et al. Biophysical properties and mapping of aquatic vegetation during the hydrological cycle of the Amazon floodplain using JERS-1 and Radarsat. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.7, p.1401-1426, 2002.

COSTA, M.P.F. Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation in the Amazon floodplain. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.10, p.1817-1835, 2004.

DEFINIENS. **Definiens developer 7: user guide**. Munich, The Imaging Intelligence Company, 2008. 506 p.

DONG, Y.; FORESTER, B.C.; MILNE, A.K. Segmentation of radar imagery using the Gaussian Markov random field model. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n.8, p.1617-1639, 1999.

ENGLE, D.; MELACK J.M. Methane emissions from the Amazon floodplain: enhanced release during episodic mixing of lakes. **Biogeochemistry**, v.51, p.71–90, 2000.

EVANS, T.L. et al. Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian Pantanal. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v.3, n.4, p.560-575, 2010.

FRAPPART, F. et al. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. **Remote Sensing of Environment**, v.99, n.4, p.387-399, 2005.

FREEMAN, A; DURDEN, S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.3, p.963-973, 1998.

FRERY, A.C. CORREIA, A.H.; FREITAS, C.C. Classifying multifrequency fully polarimetric imagery with multiple sources of statistical evidence and contextual information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.10, p.3098-3109, 2007.

HENDERSON, F.; LEWIS, A. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. 3.ed. New York: Wiley, 1998. v.3. 896 p.

HENDERSON, F.; LEWIS, A. Radar detection of wetland ecosystems: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.20, p.5809-5835, 2008.

HESS, L.L.; MELACK, J.M.; SIMONETT, D.S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v.11, n.7, p.1313-1325, 1990.

HESS, L.L. et al. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33, n.4, p.896-904, 1995.

HESS, L.L. et al. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v.87, n.4, p.404-428, 2003.

JAXA. Satellites and Spacecrafts: Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2). Disponível em: http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/index_e.html. Acesso em: 20 jan. 2012.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2005. 526 p.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective**. 2.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2007. 544 p.

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

JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R. E. The floodpulse concept in the river-floodplain systems. **Canadian Special Publication in Fisheries and Aquatic Sciences**, v.106, p.110-127, 1989.

LAANBROEK, H.J. Methane emission from natural wetlands: interplay between emergent macrophytes and soil microbial processes: a mini-review. **Annals of Botany**, v.105, n.1, p.141-53, 2010.

LANG, M.; TOWNSEND, P.; KASISCHKE, E. Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.10, p.3898-3907, 2008.

LE VINE, D. M. et al. The influence of antenna pattern on Faraday rotation in remote sensing at L-band. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.9, p.2737-2746, 2007.

LEWIS, S.L. et al. The 2010 Amazon Drought. **Science**, v.331, n.6017, p.554-554, 2011.

MARTIN, S. **An introduction to ocean remote sensing**. Cambridge: University Press, 2004. 426 p.

MARTINEZ, J.; TOAN, T.L. Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. **Remote Sensing of Environment**, v.108, n.3, p.209-223, 2007.

MELACK, J.M. et al. Regionalization of methane emissions in the Amazon Basin with microwave remote sensing. **Global Change Biology**, v.10, p.530-544, 2004.

MELACK, J.M.; HESS, L.L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon Basin. In: JUNK, W.J. et al. (eds.). **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. New York: Springer Verlag, 2010. cap. 3. p.43-60.

MEYER, F. J.; NICOLL, J. B. Prediction , detection , and correction of Faraday rotation in full-polarimetric L-band SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.46, n.10, p.3076-3086, 2008.

MITSCH, W.J.; GOSSELINK, J.G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. **Ecological Economics**, v.35, n.200, p.25-33, 2000.

MOREIRA-TURCQ, P. et al. Carbon sedimentation at Lago Grande de Curuai, a floodplain lake in the low Amazon region: insights into sedimentation rates. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.214, n.1-2, p.27-40, 2004.

- MORENA, L.C. JAMES, K.V.; BECK, J. An introduction to the RADARSAT-2 mission. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.30, n.3, p.221-234, 2004.
- NOVO, E.M.L.M. et al. Relationship between macrophyte stand variables and radar backscatter at L and C band, Tucuruí reservoir, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.7, p.1241-1260, 2002.
- NOVO, E.M.L.M. et al. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, v.7, n.3, p.153-161, 2006.
- PAPA, F. et al. Variations of surface water extent and water storage in large river basins: a comparison of different global data sources. **Geophysical Research Letters**, v.35, n.11, p.1-5, 2008.
- QUINLAN, J. R. **C4.5: programs for machine learning**. London: Morgan Kaufmann, 1993.
- RENÓ, V.F. et al. Assessment of deforestation in the Lower Amazon floodplain using historical Landsat MSS/TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.12, p.3446-3456, 2011.
- RICHARDS, J.A. **Remote sensing with imaging radar**. 3.ed. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 361 p.
- RICHEY, J.E. et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, v.416, n.6881, p.617-620, 2002.
- ROBINSON, I.S. **Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography**. Chichester: Springer-Praxis, 2004.
- RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J.E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.72, n.3, p.249-260, 2006.
- ROSENQVIST, A. et al. ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.45, n.11, p.3307-3316, 2007.
- RUDORFF, C.M. et al. Seasonal and spatial variability in CO₂ emissions from a large floodplain lake in the lower Amazon. **Journal of Geophysical Research - Biogeosciences**, v.117, n.G04007, 2011.
- SANT'ANNA, S.J.S.; MASCARENHAS, N.D.A. Comparação do desempenho de filtros redutores de "Speckle". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996. Salvador, BA. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p.871-877.

SANTOS, J.R. et al. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.7, p.1217-1229, 2002.

SARTORI, L.R. et al. Investigations on the full polarimetric palsar data to discriminate macrophytes species in the Amazon floodplain wetland. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2010, Honolulu, Hawaii. **Proceedings...** Honolulu: IEEE, 2010. p.413-416.

SCHMULLIUS, C.C.; EVANS D.L. Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.2713–2722, 1997.

SHI, J. et al. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n.5, p.1254-1266, 1997.

SHIMADA, M. et al. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.47, n.12, p.3915-3932, 2009.

SILVA, T.S.F. et al. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications. **Environmental monitoring and assessment**, v.140, n.1-3, p.131-145, 2008.

SILVA, T.S.F.; COSTA, M.P.F.; MELACK, J.M. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: a remote sensing approach. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.9, p.1998-2010, 2010.

SOUSA JUNIOR, M. A.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C.C . Segmentação de imagens JERS e TM/Landsat usando o segmentador incremental multi-níveis SegSAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005. Goiânia, GO. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p.4493-4499.

SUZUKI, S. et al. Overview of Japan's Advanced Land Observing Satellite-2 mission. **Proceeding of SPIE**, v. 7474, n.74740Q1-10, 2009.

THIEL, C. et al. Object-based classification of SAR data for the delineation of forest cover maps and the detection of deforestation – A viable procedure and its application in GSE Forest Monitoring. In: BLASCHKE, W.J. et al. (eds.).

Object-based image analysis: spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications. New York: Springer Verlag, 2008. cap. 3.4. p.327-344.

TOWNSEND, P.A. Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.3, p.443-460, 2002.

ULABY, F.; DUBOIS, P.; VANZYL, J. Radar mapping of surface soil moisture. **Journal of Hydrology**, v.184, n.1-2, p.57-84, 1996.

WALKER, W.S. et al. Large-Area Classification and Mapping of Forest and Land Cover in the Brazilian Amazon : A Comparative Analysis of ALOS/PALSAR and Landsat Data Sources. **IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and Remote Sensing**, v.3, n.4, p.594-604, 2010.

WANG, Y. et al. Understanding the radar backscattering from flooded and nonflooded Amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. **Remote Sensing of Environment**, v.54, n.3, p.324-332, 1995.

WITTEN, I.H.; FRANK, E. **Data mining:** practical machine learning tools and techniques. 2.ed. San Francisco: Elsevier,2005. 524p.

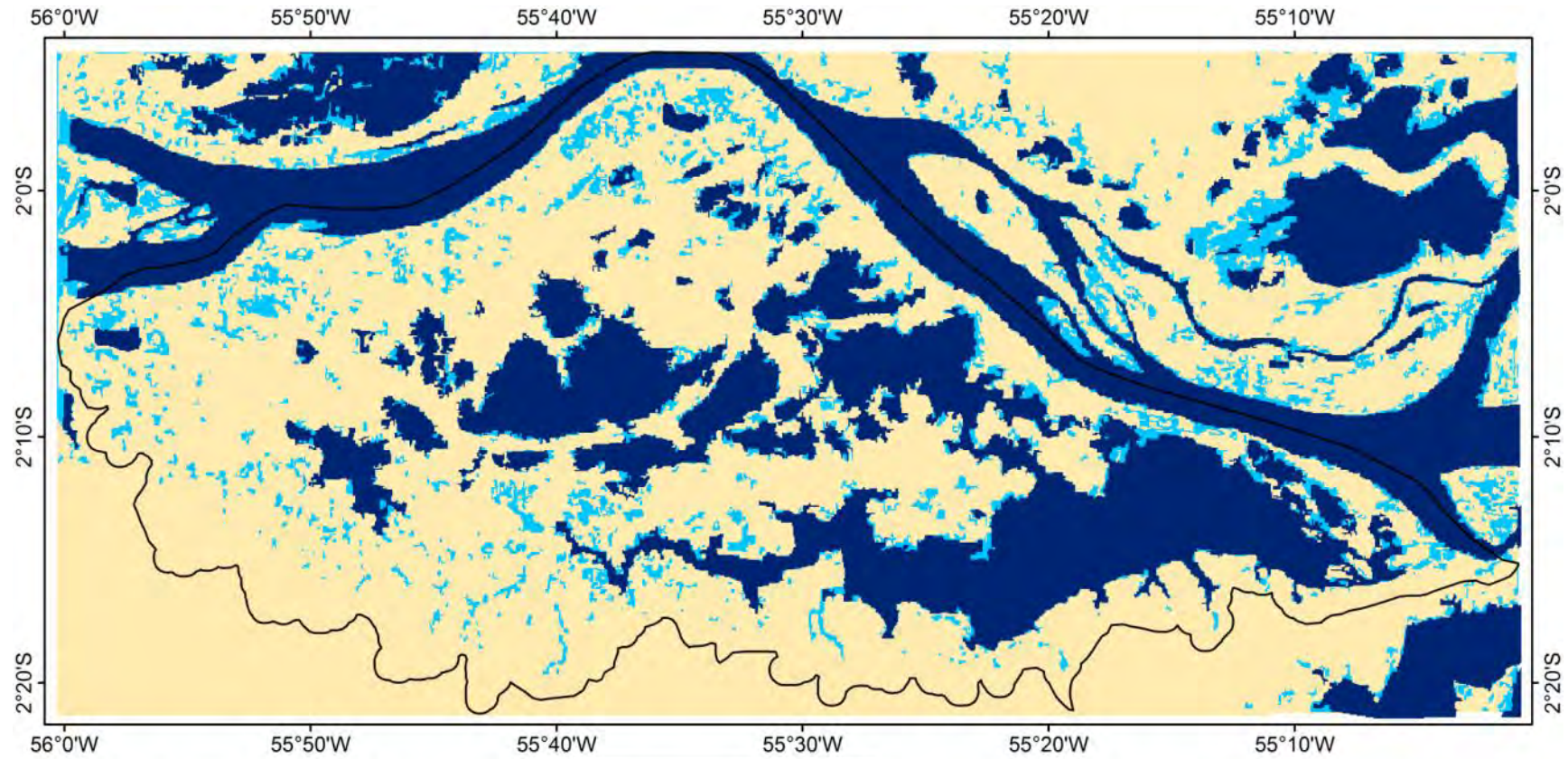
WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton: CRC, 2006. 370p.

ZUUR, A.F. et al. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer Science, 2009. 574p.

APÊNCICE A

MAPAS DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DO LAGO GRANDE DE CURUAI

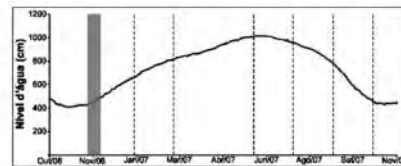
A.1 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 30/11/2006



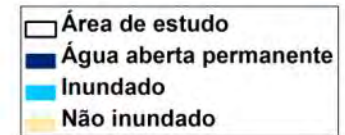
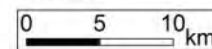
Pulso de inundação de 2007

Data: 30/11/2006

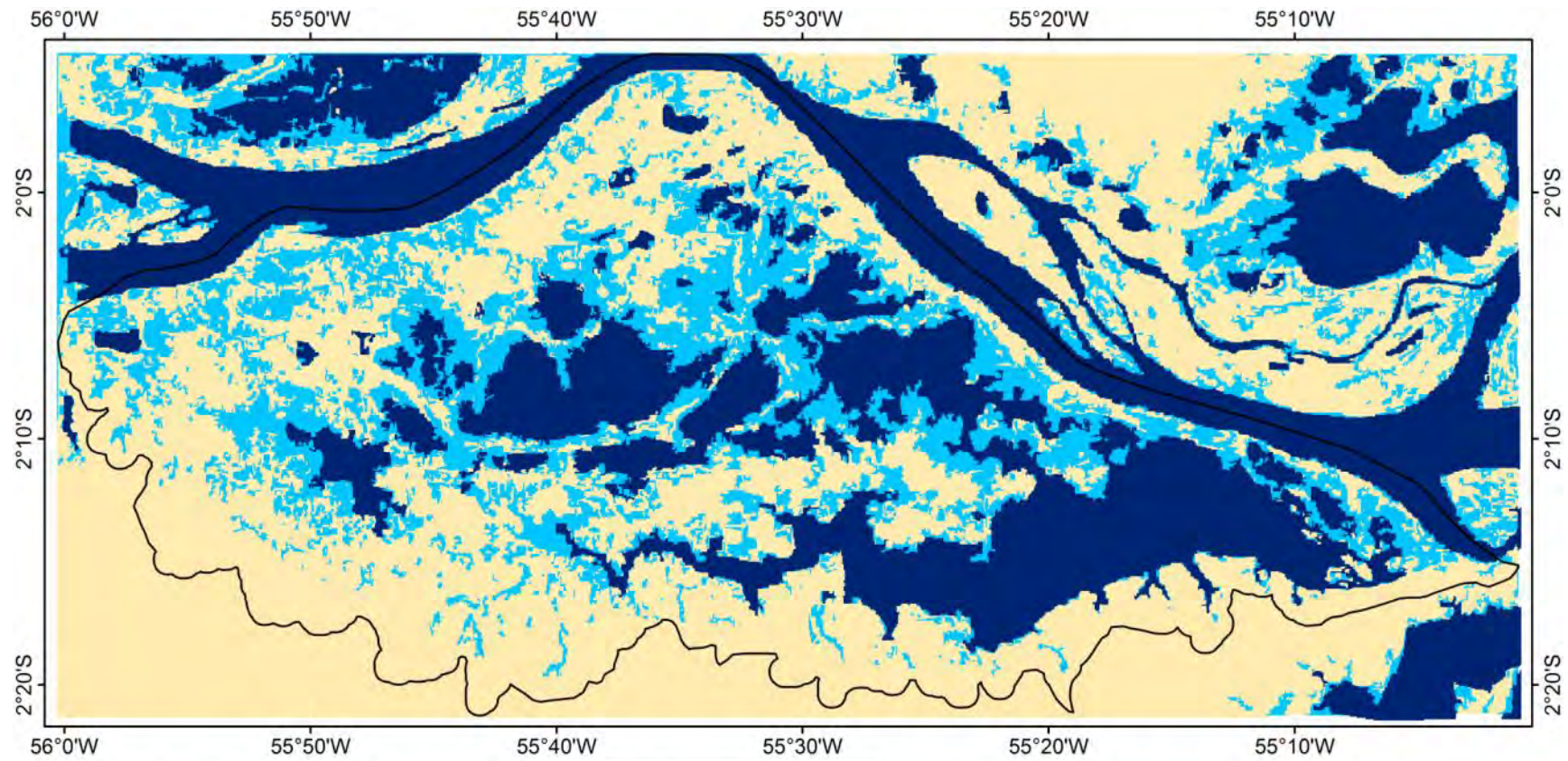
Nível d' gua em Curuai = 452 cm



Escala:



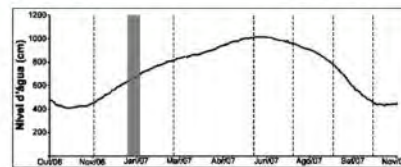
A.2 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 15/01/2007



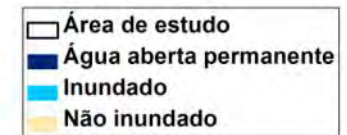
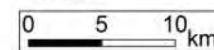
Pulso de inundação de 2007

Data: 15/01/2007

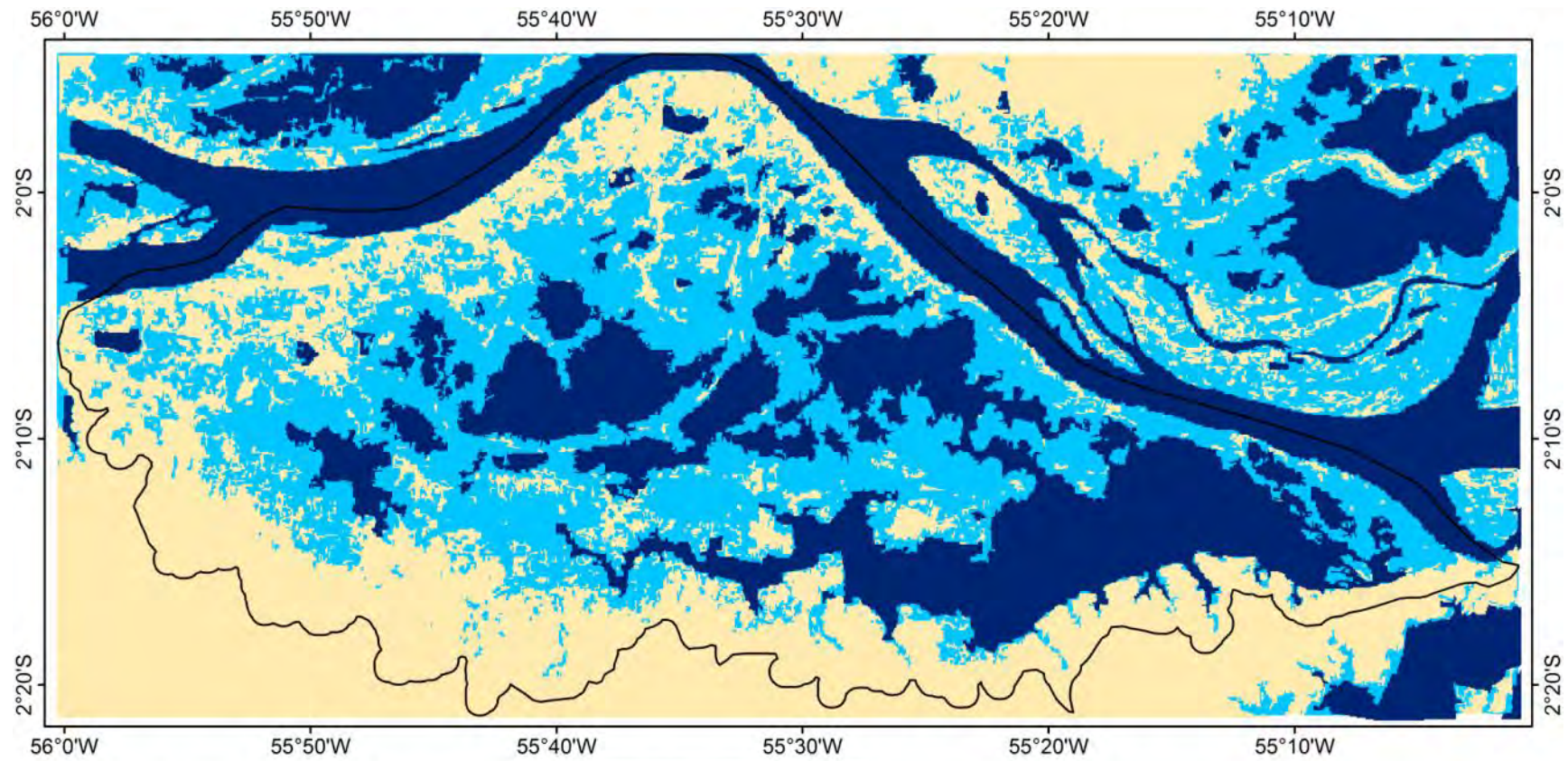
Nível d' gua em Curuai = 662 cm



Escala:



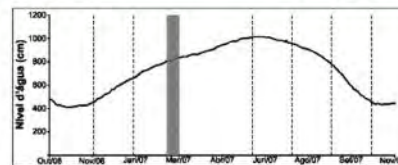
A.3 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 02/03/2007



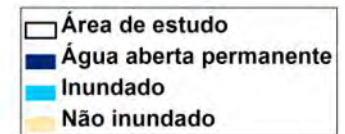
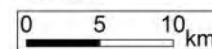
Pulso de inundação de 2007

Data: 02/03/2007

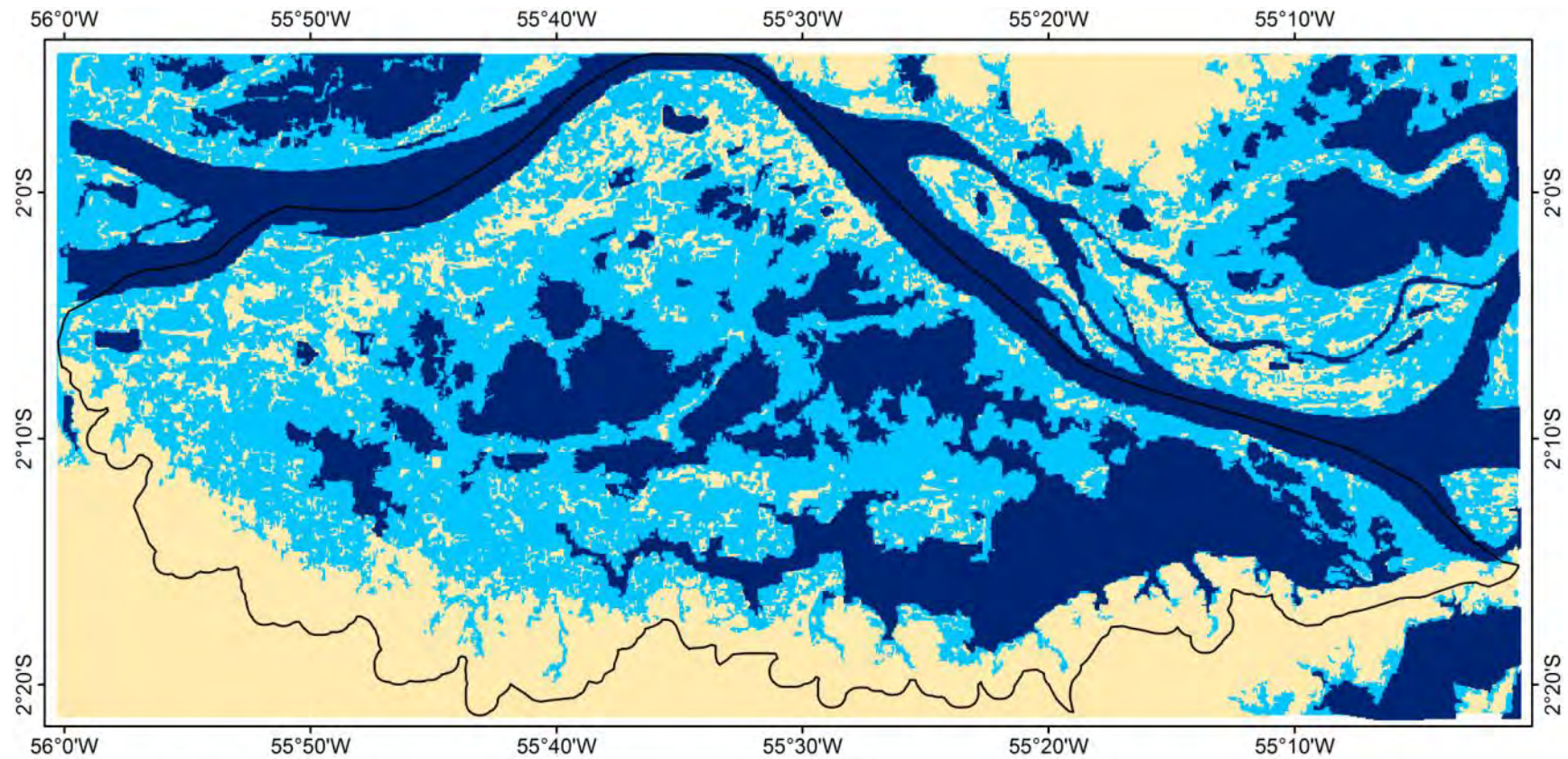
Nível d' gua em Curuai = 812 cm



Escala:



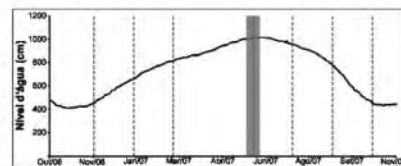
A.4 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 02/06/2007



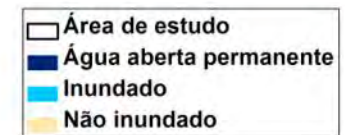
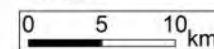
Pulso de inundação de 2007

Data: 02/06/2007

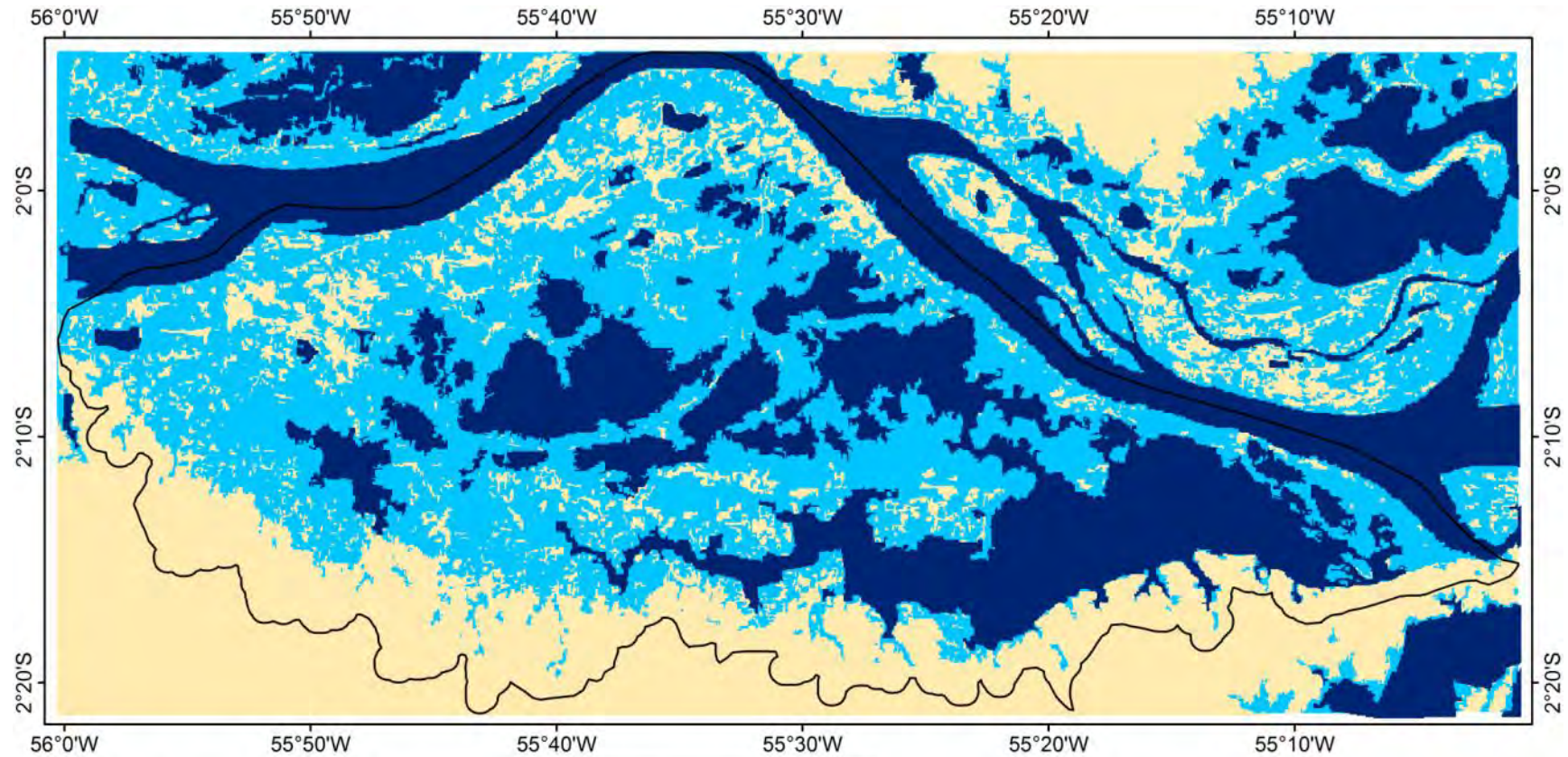
Nível d' gua em Curuai = 1010 cm



Escala:



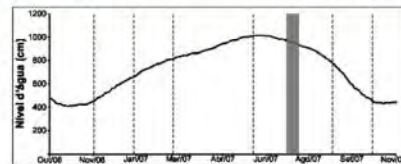
A.5 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 18/07/2007



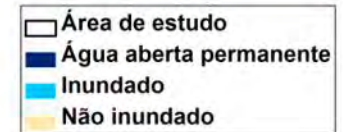
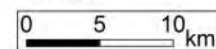
Pulso de inundação de 2007

Data: 18/07/2007

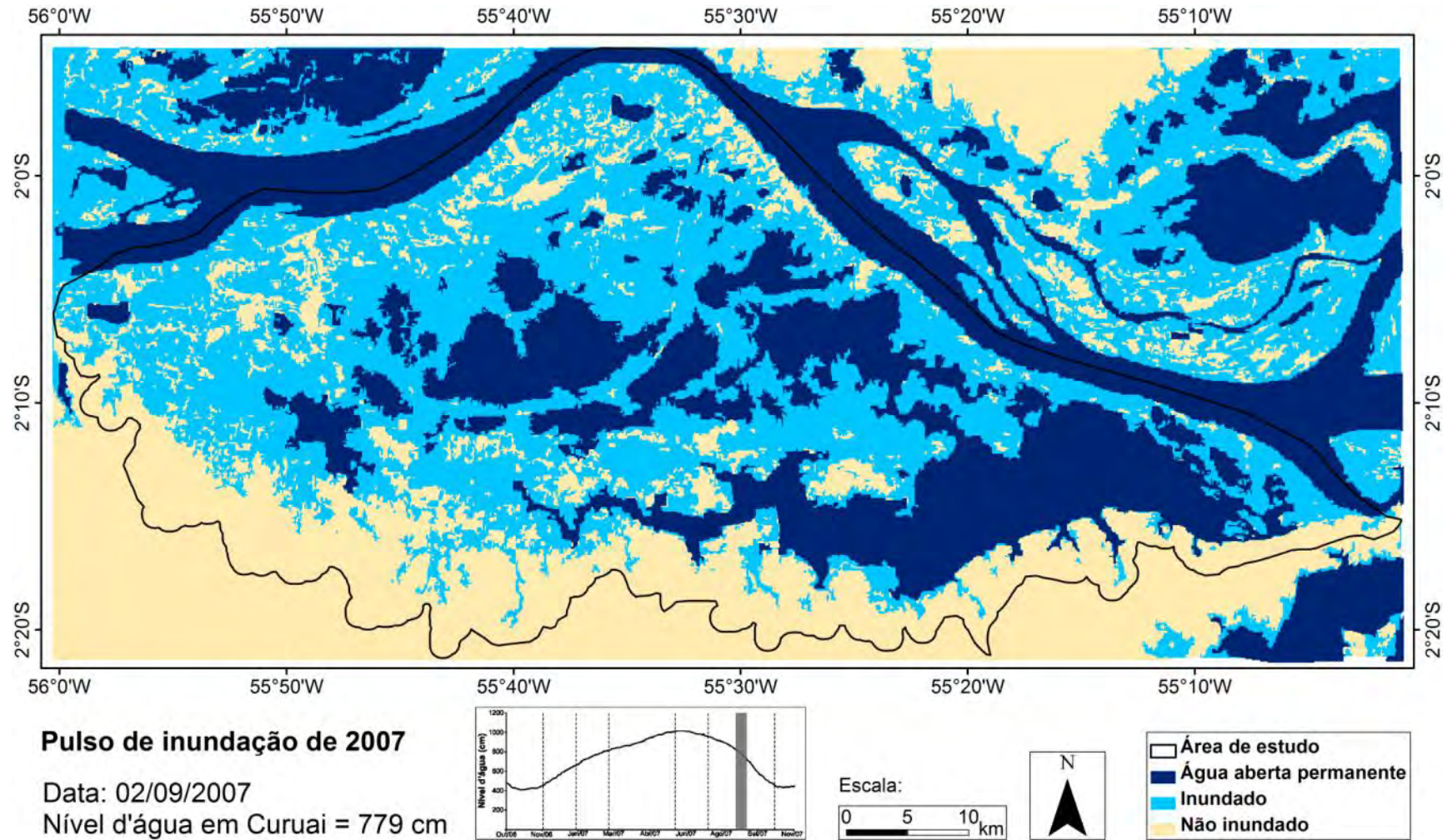
Nível d'água em Curuai = 959 cm



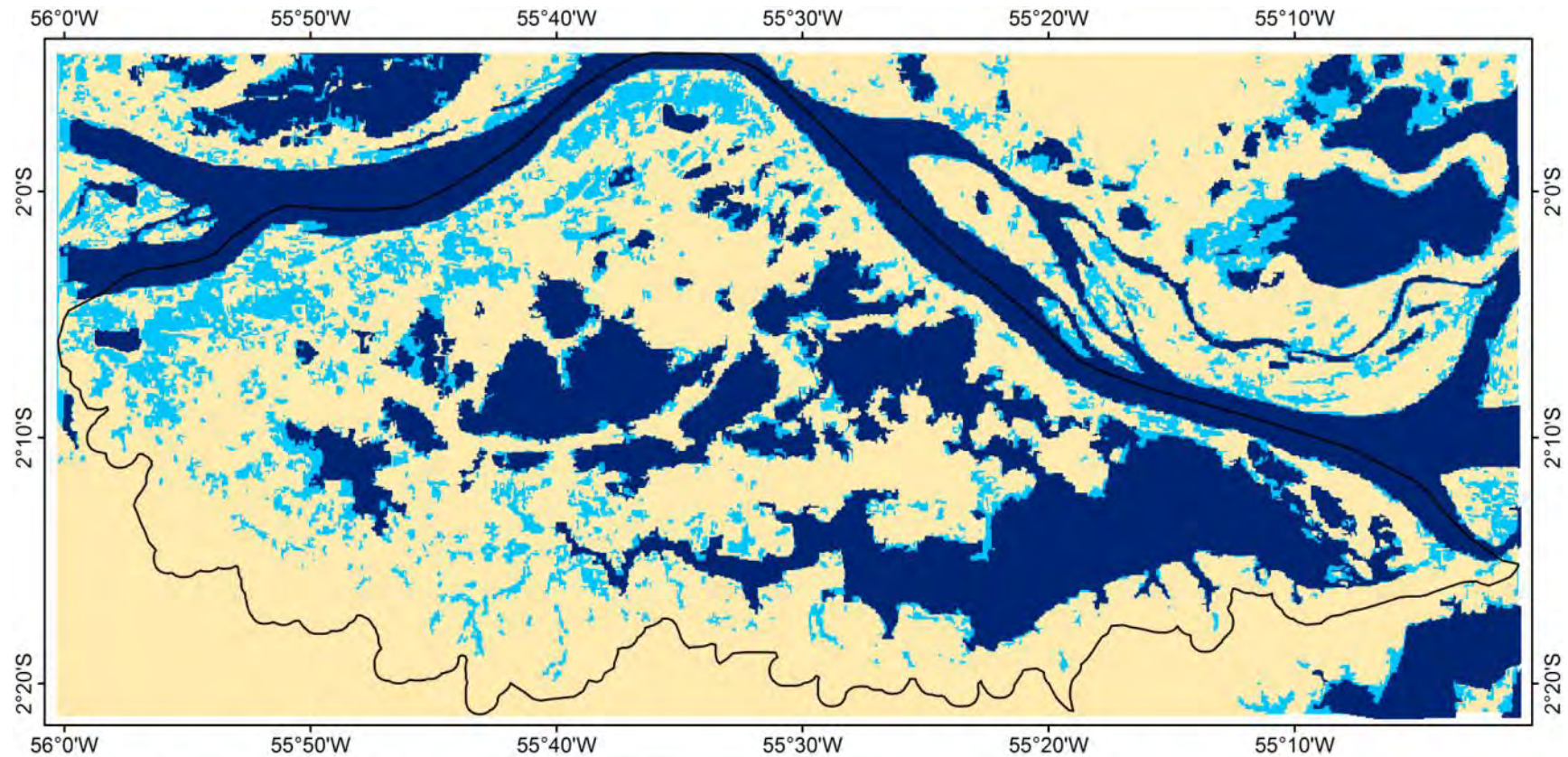
Escala:



A.6 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 02/09/2007



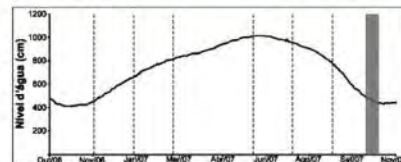
A.7 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 18/10/2007



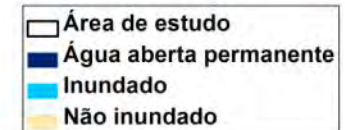
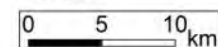
Pulso de inundação de 2007

Data: 18/10/2007

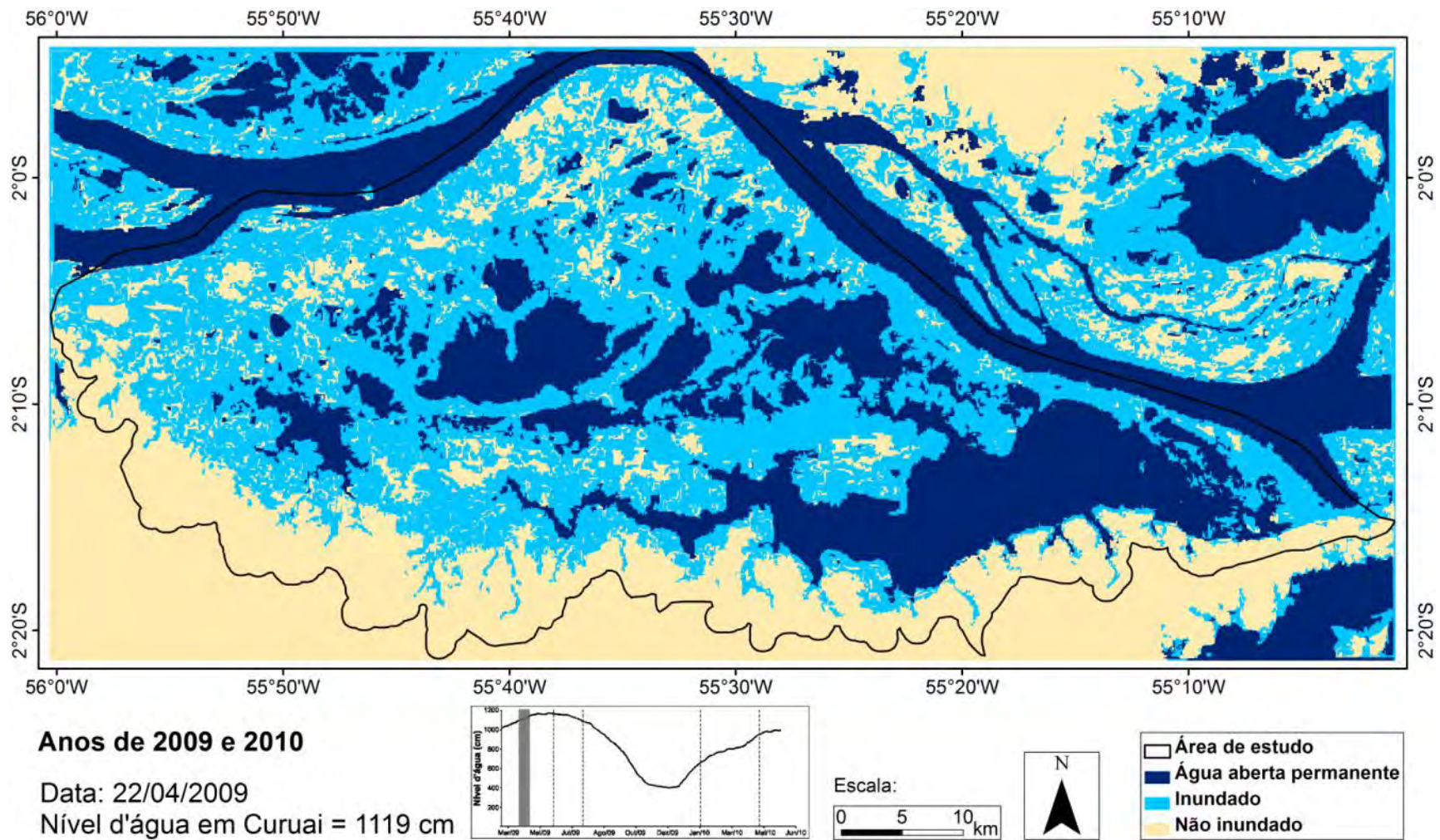
Nível d' gua em Curuai = 453 cm



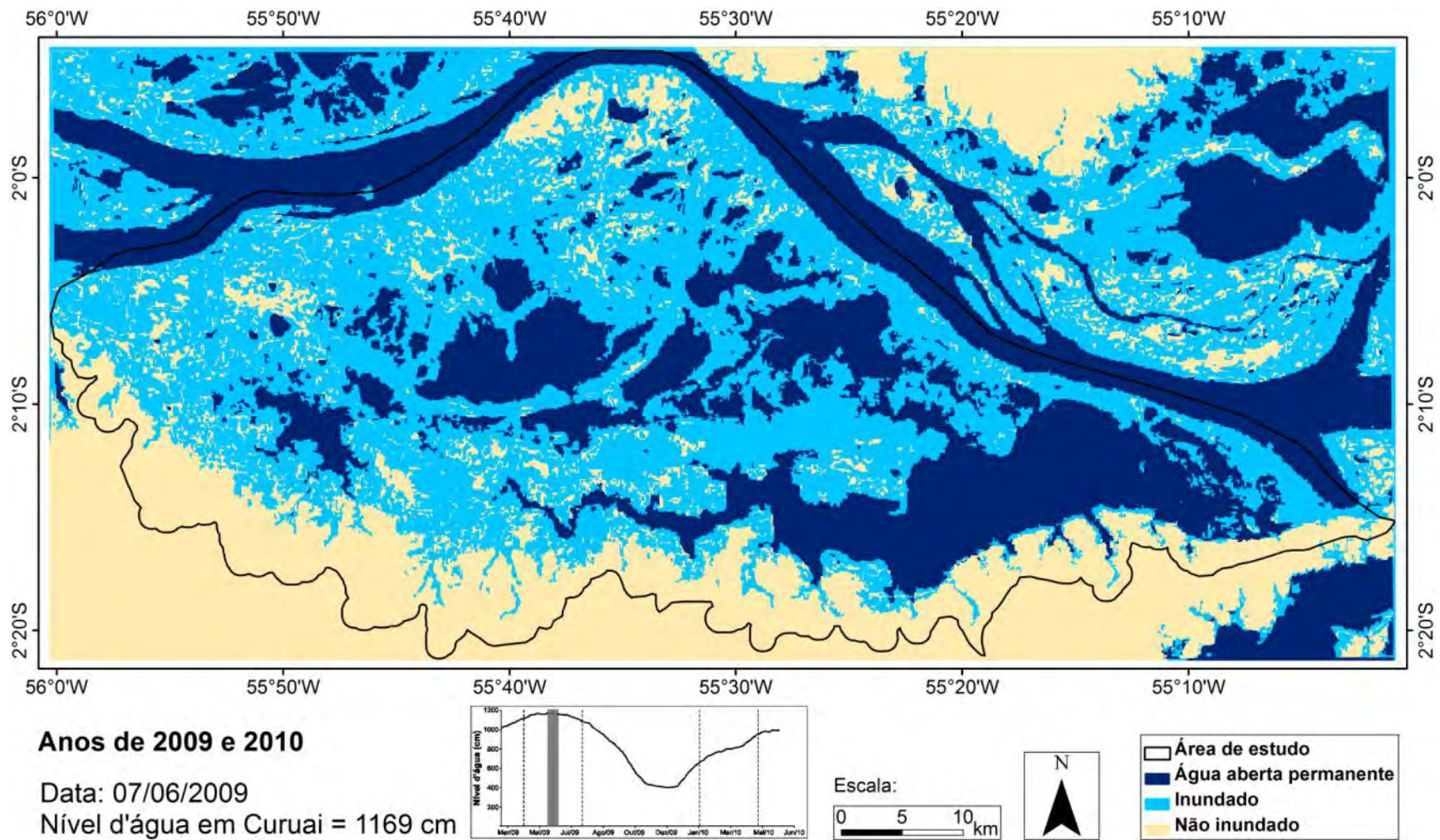
Escala:



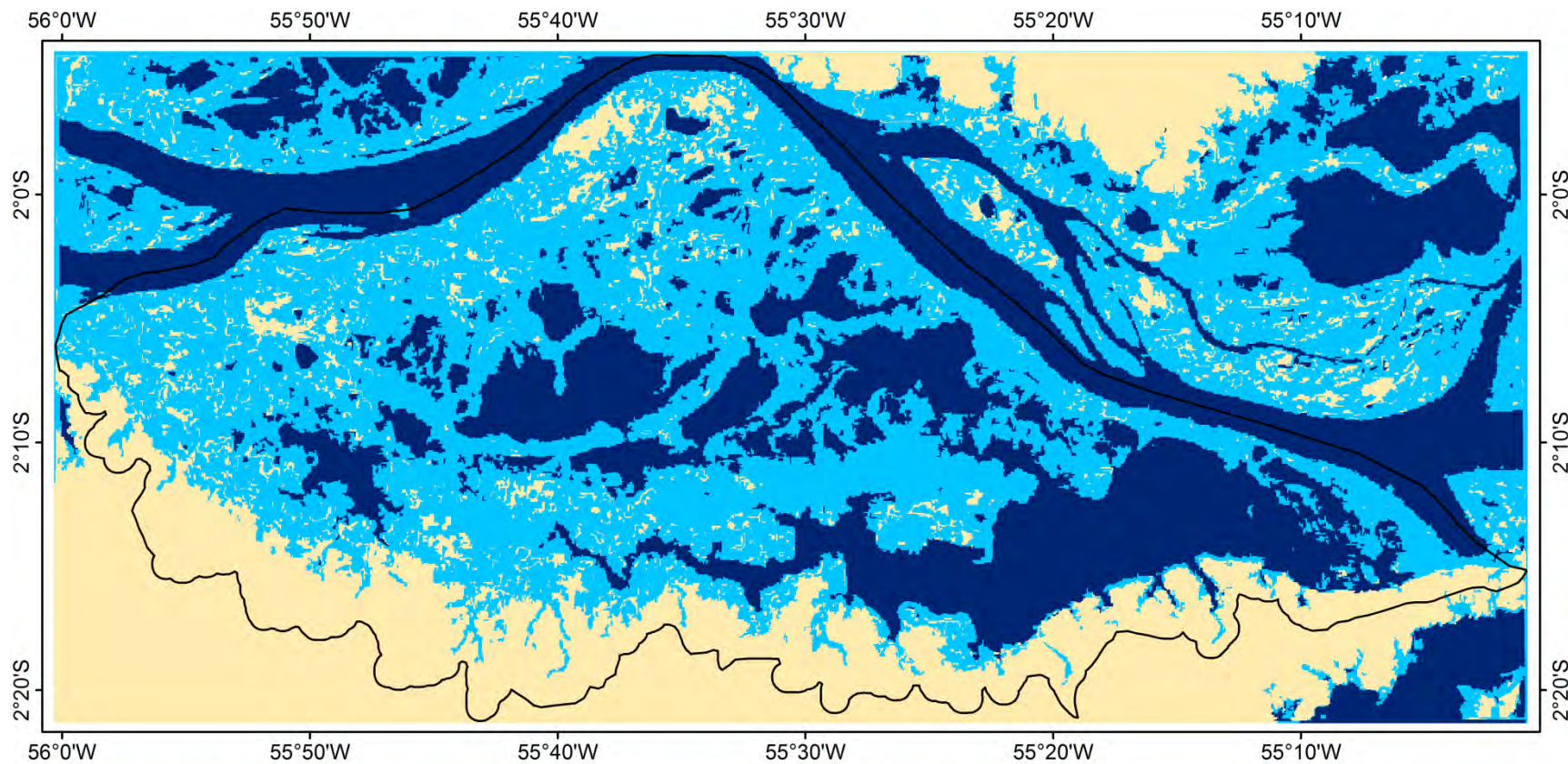
A.8 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 22/04/2009



A.9 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 07/06/2009



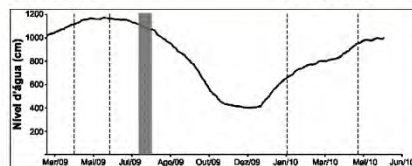
A.10 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 23/07/2009



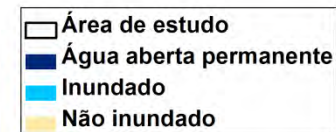
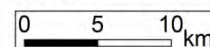
Anos de 2009 e 2010

Data: 23/07/2009

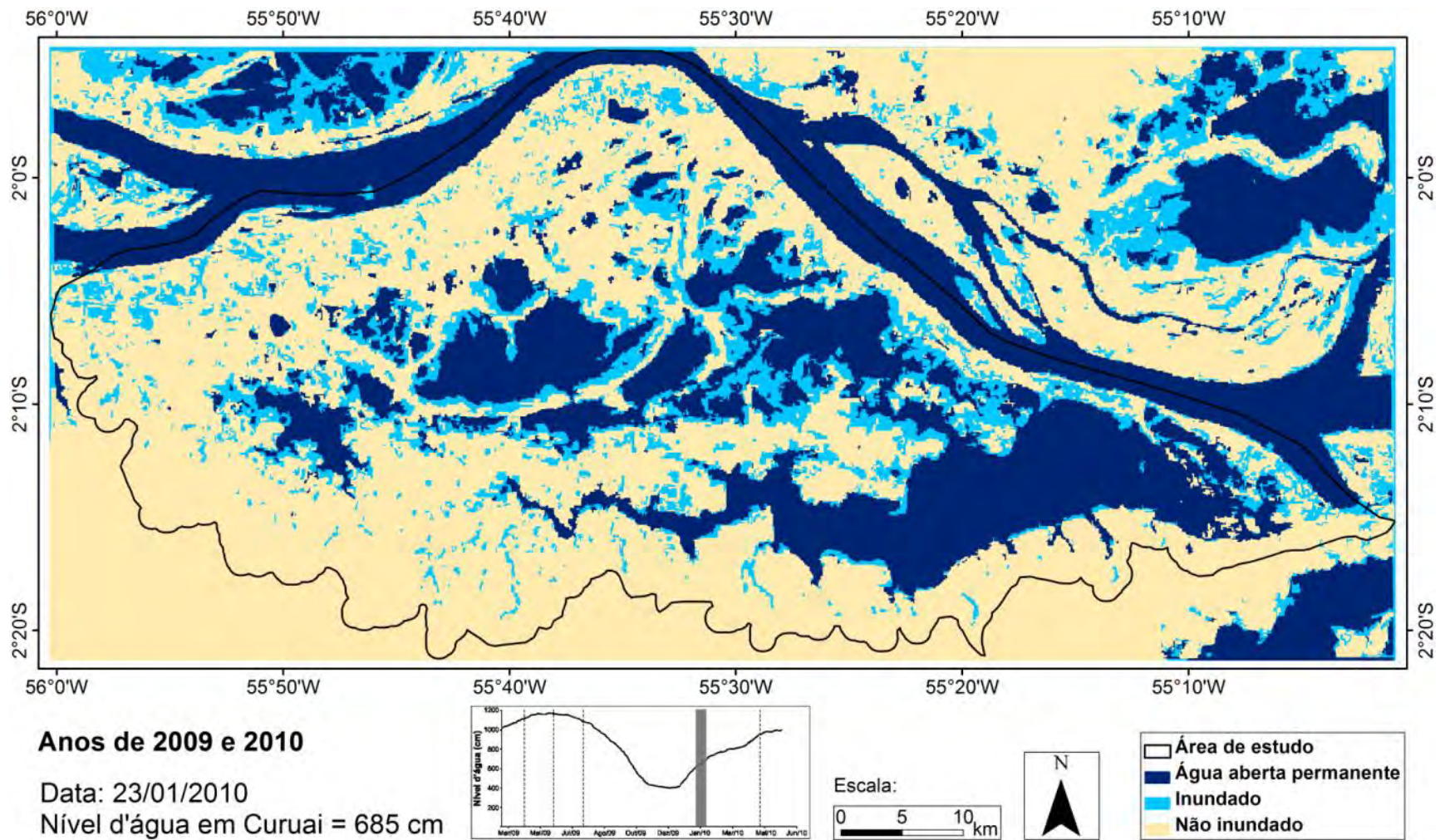
Nível d'água em Curuai = 1085 cm



Escala:



A.11 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 23/01/2010



A.12 – MAPA DE INUNDAÇÃO DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO LGC EM 25/04/2010

