

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL  
(MLME) PARA O MAPEAMENTO DE DIFERENTES TIPOS DE ÁGUA NO RIO  
SOLIMÕES E NO LAGO DE COARI UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT-5 TM

Wildes Cley Sousa da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

---

Prof. Fernando Pellon de Miranda, Ph.D.

---

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

---

Prof. Naziano Pantoja Filizola Júnior, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
JULHO DE 2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SILVA, WILDES CLEY SOUSA DA

Aplicação da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para o mapeamento de diferentes tipos de água no Rio Solimões e no Lago de Coari utilizando Imagens Landsat-5 TM. [Rio de Janeiro] 2008.

XV, 109 p.29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,Engenharia Civil, 2008).

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.Engenharia Civil, 2008.

1. Sensoriamento remoto.
2. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).
3. Landsat-5 TM.
4. Rio Solimões.
5. Lago de Coari.

I. COPPE/UFRJ II. Título (Série)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus.

A meus pais, Raimundo Vieira e Assunção Silva e a meus irmãos, que, mesmo longe, deram total apoio às decisões por mim tomadas.

A meu esposo, Everton Cezar Diniz, pela compreensão e por estar presente em todos os momentos, dando-me total apoio.

Ao Projeto Piatam e seus membros, pelo incentivo dado para o ingresso no curso de mestrado da COPPE, além do apoio financeiro fornecido para a realização do mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação e Pesquisa da COPPE-UFRJ, pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

Ao professor Dr. Fernando Pellon de Miranda, pela orientação, paciência e atenção.

Ao professor Luiz Landau, pelo total apoio fornecido para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, pela orientação e pela grande ajuda na disponibilização da equipe de sensoriamento remoto do INPE. Em especial, ao André Lima, pela paciência e boa receptividade.

Aos amigos do LABSAR, em particular a Sylvia Lima, Edson Faria, Luiz Paulo, Carlos Beisl, Fábio Roque e Adriano Vasconcelos, por discussões construtivas e pela ajuda na reta final para a conclusão deste trabalho. Não esquecendo de agradecer, também, à Marcília Mascarenhas e ao Humberto Buffoni.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL (MLME)  
PARA O MAPEAMENTO DE DIFERENTES TIPOS DE ÁGUA NO RIO SOLIMÕES E  
NO LAGO DE COARI UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT-5 TM

Wildes Cley Sousa da Silva

Julho/2008

Orientadores: Luiz Landau

Fernando Pellon de Miranda

Programa: Engenharia Civil

A assinatura espectral de um pixel em uma imagem de sensoriamento remoto adquirida em ambientes aquáticos da Amazônia é, na maioria dos casos, resultado da contribuição dos diversos tipos de água e da cobertura de nuvens dentro do pixel. Esta dissertação apresenta um exemplo do uso da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para o mapeamento de diferentes tipos de águas no rio Solimões e no Lago de Coari. Os dados Landsat-5 TM (Thematic Mapper) disponíveis na área de estudo foram selecionados para abranger as diferentes fases do ciclo hidrológico no complexo Solimões/Amazonas (seca, enchente, cheia e vazante). Os resultados obtidos incluem a confecção de imagens-fração para cada tipo de componente puro da imagem (água branca, água preta e nuvens) na escala do pixel, assim como a classificação não-supervisionada das imagens-fração. Foram discutidos com maior ênfase os resultados correspondentes à confluência do Lago de Coari com o Rio Solimões. Além disso, alguns aspectos envolvendo futuras aplicações em estudos hidrológicas na citada área são brevemente mencionados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF THE SPECTRAL LINEAR MIXING MODEL TECHNIQUE FOR  
MAPPING DIFFERENT WATER TYPES IN THE SOLIMÕES RIVER AND COARI  
LAKE USING LANDSAT-5 TM IMAGES.

Wildes Cley Sousa da Silva

July/2008

Advisors: Luiz Landau

Fernando Pellon de Miranda

Department: Civil Engineering

The spectral signature of a pixel in a remotely sensed image acquired in Amazonian aquatic environments is, in most cases, the result of the contribution of mixed water types and clouds occurring within that pixel. This dissertation presents the use of the spectral linear mixing model technique for mapping different types of water in the Solimões River and Coari Lake. Landsat-5 TM (Thematic Mapper) data available in the study area were selected to cover the four phases on the hydrological cycle in the Solimões/Amazonas complex (dry season, flooding waters, wet season, receding waters). Results include the production of fraction images of chosen endmembers (white water, black water, and clouds) constituting the area of a pixel, as well as unsupervised classification of each fraction image. Special emphasis was given to the Coari Lake-Solimões River confluence. Moreover, some research aspects of future applications in hydrological studies of such a region are briefly discussed.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii-xiv
LISTA DE TABELAS .....	xv
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	1
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Objetivo.....	3
1.2. Desafios e motivações.....	4
1.3. Descrição dos capítulos.....	4
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	5
<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	7
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	7
3.1. Sistemas ópticos.....	7
3.2. Sistema Landsat .....	8
3.2.1. Características do sensor <i>Thematic Mapper</i> (TM) .....	9
3.3. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e sua aplicação para a determinação da qualidade da água na Amazônia .....	11
3.4. Análise de textura .....	12
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	13
<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	13
4.1. Imagens Landsat-5 TM utilizadas no estudo .....	13
4.2. Processamento digital das imagens .....	18

4.3. Identificação das assinaturas espectrais .....	22
4.4. Aplicação de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) .....	23
4.5. Geração das Imagens - Fração .....	25
4.6. Segmentação.....	26
4.7. Classificação.....	26
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>29</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>29</b>
5.1. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da vazante .....	34
5.2. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da seca.....	42
5.3. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da enchente .....	55
5.4. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da cheia.....	68
5.5. Classificação não-supervisionada USTC à Banda 1 da imagem Landsat-5 TM referente ao período hidrológico da cheia .....	81
5.6. Implicação dos resultados para a modelagem atmosférica e de dispersão de poluentes .....	82
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>86</b>
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>88-94</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo. Imagem Landsat-5 TM (órbita 233/ponto 63 .....	5
Figura 2.2: Variação no tempo do nível das águas (cotograma) na régua de Coari, no período de 01 de janeiro de 2005 a 17 de agosto de 2008.....	6
Figura 4.1 - Imagem Landsat - 5 TM (órbita 233/ponto 63), adquirida em 03/09/2007 (vazante).....	14
Figura 4.2 - Imagem Landsat - 5 TM (órbita 233/ponto 63), adquirida em 05/10/2007 (seca).....	15
Figura 4.3 - Imagem Landsat - 5 TM (órbita 233/ ponto 63), adquirida em 30/04/2008 (enchente).....	16
Figura 4.4 - Imagem Landsat - 5 TM (órbita 233/ ponto 63), adquirida em 09/06/2005 (cheia).....	17
Figura 4.5 -Fluxograma de procedimentos para o processamento de imagens realçando os atributos espectrais dos dados.....	18
Figura 4.6 - Diagrama ilustrando o conceito de ângulo zenital.....	22
Figura 4.7. Fluxograma de procedimentos para a classificação textural da Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, no período de cheia.....	28
Figura 5.1 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, utilizando a imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	30
Figura 5.2 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	31
Figura 5.3 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	32

Figura 5.4 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	33
Figura 5.5 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	34
Figura 5.6 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	35
Figura 5.7 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	36
Figura 5.8 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; a imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	37
Figura 5.9 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	38
Figura 5.10 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	39
Figura 5.11 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	40
Figura 5.12 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).....	41

Figura 5.13 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	43
Figura 5.14 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca) .....	44
Figura 5.15 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	45
Figura 5.16- Imagem-fração do componente puro nuvens; utilizando a imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	46
Figura 5.17 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	47
Figura 5.18 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	48
Figura 5.19 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	49
Figura 5.20 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	50
Figura 5.21 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	51

Figura 5.22 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	52
Figura 5.23 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	53
Figura 5.24 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).....	54
Figura 5.25 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	56
Figura 5.26 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	57
Figura 5.27 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	58
Figura 5.28 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	59
Figura 5.29 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	60
Figura 5.30 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	61
Figura 5.31 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	62

Figura 5.32 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	63
Figura 5.33 -Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	64
Figura 5.34 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	65
Figura 5.35 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	66
Figura 5.36 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).....	67
Figura 5.37: Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, utilizando a imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	69
Figura 5.38 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	70
Figura 5.39 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	71
Figura 5.40 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	72
Figura 5.41 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	73

Figura 5.42 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia) .....	74
Figura 5.43 -. Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	75
Figura 5.44 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	76
Figura 5.45 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	77
Figura 5.46 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	78
Figura 5.47 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	79
Figura 5.48 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).....	80
Figura 5.49 – Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada USTC aplicada à Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, obtida em 09/06/2005 (cheia).....	81
Figura 5.50 - Imagem Landsat do simulado realizado pela Petrobras no trecho do Rio Solimões entre o Terminal de Coari – Solimões e a cidade de Coari, em 29 de outubro de 2003.....	84

Figura 5.51-Experimento numérico computacional simulando a dispersão do poluente, desconsiderando a ação do vento.....	85
Figura 5.52-Experimento numérico computacional simulando a dispersão do poluente, considerando a ação do vento .....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características do satélite Landsat - 5.....	9
Tabela 3.2 - Bandas e faixas espectrais do sensor <i>Thematic Mapper</i> (TM).....	10
Tabela 3.3 - Principais aplicações das bandas do sensor <i>Thematic Mapper</i> (TM).....	11
Tabela 4.1 - Imagens Landsat - 5 TM utilizadas no presente estudo.....	14
Tabela 4.2 - Intervalos dinâmicos pós-calibração para dados processados.....	21



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

A região Amazônica abarca a maior bacia hidrográfica do planeta. Está situada na zona intertropical, recebendo precipitações médias anuais de 2460 mm. (Filizola, 1999, citado por Alcântara, 2006). Dentre os diversos ecossistemas lá existentes, as áreas alagáveis vêm atraindo um crescente interesse da comunidade científica, em reconhecimento às suas características peculiares. Estas áreas constituem importante fonte, escoadouro e meio de transformação de diversos materiais orgânicos e inorgânicos, além de receber e processar a maior parte do influxo de nutrientes oriundos dos sistemas fluviais e atividades humanas relacionadas. Além disso, influenciam ativamente os ciclos hidrológicos (Mitsch and Gosselink, 2000, citado por Silva, 2004).

Associadas aos grandes rios da Amazônia, essas áreas alagáveis ocupam um total de 300.000 km<sup>2</sup>, sendo que o complexo Solimões/Amazonas inunda periodicamente cerca de 200.000 km<sup>2</sup> (Junk, 1993). O alagamento sazonal do Rio Solimões causa uma elevação no nível da água de 10 a 12 metros, atingindo, na Amazônia Central, sua máxima inundação aproximadamente nos meses de junho-julho (Ayres, 1995).

A dinâmica dos ecossistemas alagáveis da planície Amazônica é controlada principalmente pelo padrão sazonal de variação do nível da água, o que Junk (1997) convencionou chamar de “pulso de inundação”. Tal fenômeno é verificado nos grandes rios da Amazônia, como resultado do somatório das chuvas de toda a bacia de drenagem, trazendo complexidade sazonal aos ecossistemas aquáticos da região. Esta dinâmica hidrológica determina a distribuição dos ecossistemas, de acordo com a intensidade e duração da inundação em cada local (Junk, 1989).

O termo várzea corresponde às planícies de inundação situadas ao longo de rios de águas brancas, que são ricos em nutrientes e material em suspensão (Sioli, 1984). Estas feições são periodicamente recobertas pela água dos rios barrentos da região, que ali depositam uma grande quantidade de sais minerais e nutrientes. Usando como critério essa similaridade hidrológica, a equipe do Projeto RADAMBRASIL (1976) subdividiu essas unidades em “planície fluvial alagada” e “planície inundável ou de inundação”. A primeira foi considerada como várzea baixa, que começa a ser inundada nos primeiros meses de elevação das águas,

normalmente de janeiro a fevereiro. A segunda constitui a várzea alta, cuja inundação total só acontece nas grandes cheias. Pelo fato de se localizarem em regiões planas, marginais aos rios, as várzeas são compostas por vários lagos permanentemente conectados, ou não, entre si e ao rio, por canais. Estes lagos podem ter suas superfícies triplicadas durante o período de cheias.

Tomando como parâmetro a coloração das águas, Sioli (1990) classificou os lagos, assim como os rios da Bacia Amazônica, como de água preta, de água clara ou de água branca. Os de água preta possuem suas nascentes nos escudos cristalinos das Guianas e do Brasil Central ou nos sedimentos terciários que lhes são sobrejacentes, onde os processos erosivos são pouco intensos e reduzidos pela densa floresta pluvial (Junk, 1983). São rios de cor marrom-oliva até marrom-café, devido a substâncias húmicas e fúlvicas dissolvidas. O exemplo mais marcante é o Rio Negro, cuja origem geológica está relacionada a sedimentos terciários e do Pleistoceno (Klinge, 1967). Basicamente, a maioria dos igarapés que drenam a terra-firme da Amazônia é de águas-pretas. Os de água clara são caracterizados pela transparência e cor esverdeada das águas devida, em parte, às algas do tipo *Cyanophyta*, com origem também nos escudos das Guianas e do Brasil Central, em região recoberta pela vegetação aberta do cerrado. Como tais áreas estão submetidas a estações secas e chuvosas bem marcadas, esses rios só transportam quantidades maiores de material em suspensão no período das chuvas. Já na longa e profunda estiagem, especialmente no Brasil Central, tais rios apresentam clareza cristalina e coloração verde-clara. Esta categoria é representada pelos rios Tapajós, Trombetas, Xingu e o rio Curuá-Una. Além destes de maior porte, pequenos rios (igarapés) podem apresentar tal tipo de água, predominantemente nas florestas de terra firme e nos campos. Por sua vez, os de água branca apresentam-se com tonalidades amareladas, barrentas e turvas, cujos limites de visibilidade situam-se no intervalo de profundidades de 10 cm a 50 cm (Sioli, 1985). Ricos em material particulado em suspensão, possuem quantidade de eletrólitos relativamente alta, pH variando de 6,2 a 7,2, tendo sua origem principalmente nos Andes. Os exemplos mais notáveis desses rios são o Solimões-Amazonas, Purus, Juruá e o Madeira. No entanto, alguns igarapés (pequenos rios) durante a estação chuvosa, podem apresentar este tipo de água (Sioli, 1984).

Diante das dimensões e complexidades dos diferentes corpos de água da Amazônia, o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto, associado a dados de campo, apresenta-se como uma boa solução para um entendimento regional de sua planície de inundação (Barbosa *et al.*, 2003). Diversas pesquisas têm demonstrado

que imagens da porção óptica do espectro eletromagnético são as fontes mais eficientes de informação para traçar o percurso hidrodinâmico e determinar a região de influência de águas fluviais em ecossistemas alagáveis (Mertes *et al.*, 1993). Os componentes opticamente ativos presentes em rios e lagos passam a ser determinantes na reflectância dos corpos d'água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e matéria orgânica dissolvida são os principais responsáveis pelo comportamento espectral da água. As regiões de absorção e espalhamento destes constituintes é que vão definir a forma final da curva de reflectância da água, enquanto sua concentração é responsável pela configuração das feições e pela magnitude da energia refletida em subsuperfície (Kirk, 1993; Mobley, 1994, citados por Barbosa *et al.*, 2003).

Dados de sensoriamento remoto foram aplicados nas planícies de inundação da Bacia Amazônica. Barbosa (2005) os utilizou para estudar a dinâmica de circulação da água na planície de Curuai, localizada próximo à cidade de Óbidos, no Pará, a aproximadamente 850 km a montante da desembocadura do Rio Amazonas. Este mesmo autor também estudou a composição biogeoquímica das águas dos lagos da planície, constatando que o efeito da turbidez devido aos sedimentos e à clorofila-*a* são difíceis de serem discriminados. Este é um dos principais desafios do sensoriamento remoto no mapeamento de sólidos em suspensão (incluindo sólidos orgânicos).

### 1.1. Objetivo

O objetivo do presente trabalho é mapear a entrada de água preta originária do Lago de Coari no interior do Rio Solimões, utilizando imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5, submetidas à classificação não supervisionada de imagens-fração. Esses produtos são derivados da aplicação do MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral) aos dados Landsat-5 TM (resolução de 30 m). A imagem-fração nuvem servirá para avaliar a influência da nebulosidade na discriminação dos demais componentes puros (água branca e água preta).

## 1.2. Desafios e motivações

Os resultados da presente pesquisa podem fornecer insumos importantes para as atividades de modelagem hidrodinâmica no Rio Solimões e no Lago de Coari, como suporte à contingência no caso de derramamento de óleo no Terminal de Coari, principalmente nos seguintes aspectos: (1) verificar o influxo de água preta do Lago de Coari no Rio Solimões, de modo a traçar seu percurso hidrodinâmico; (2) mapear o contato entre a água preta do Lago de Coari e a água branca do Rio Solimões, com a finalidade de separar domínios de diferentes densidades; (3) determinar a distribuição espacial de diferentes tipos de água, como condição de contorno em modelos atmosféricos para estudos associados a brisas de rio.

## 1.3. Descrição dos capítulos

Além deste texto introdutório, a dissertação em tela possui mais cinco (5) capítulos, a saber:

- o capítulo 2 descreve a área de estudo, com informações sobre sua localização e caracterização hidrológica;
- o capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica sobre Sensoriamento Remoto, incluindo aspectos dos sistemas ópticos, sobre o sensor Landsat - 5 TM, em particular, e sobre os dados por ele obtidos. Há também uma breve discussão sobre o Modelo Linear de Mistura Espectral e sua aplicação na Amazônia;
- o capítulo 4 descreve a metodologia utilizada nessa pesquisa, assim como o conjunto de imagens Landsat-5 TM analisadas, de modo a abranger as diferentes fases do ciclo hidrológico do complexo Solimões/Amazonas;
- o capítulo 5 contém os resultados obtidos na pesquisa, que incluem as imagens-fração para cada tipo de componente puro da imagem Landsat-5 TM (água branca, água preta e nuvens), assim como a classificação não-supervisionada das imagens-fração utilizando as abordagens ISOSEG e Isodata. Para fins de comparação, a classificação textural através do algoritmo USTC foi aplicada à banda 1 da imagem Landsat-5 TM obtida na época da cheia.;
- o capítulo 6 mostra as principais conclusões e recomendações para o aprofundamento das questões que ficaram em aberto ao término deste trabalho, no que se refere à modelagem atmosférica e dispersão de poluentes da confluência do Lago Coari com o Rio Solimões.

## CAPÍTULO 2

### ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada para o desenvolvimento da presente pesquisa está inserida na planície aluvial do Rio Solimões, Estado do Amazonas, na confluência com o Lago de Coari (Figura 2.1.).

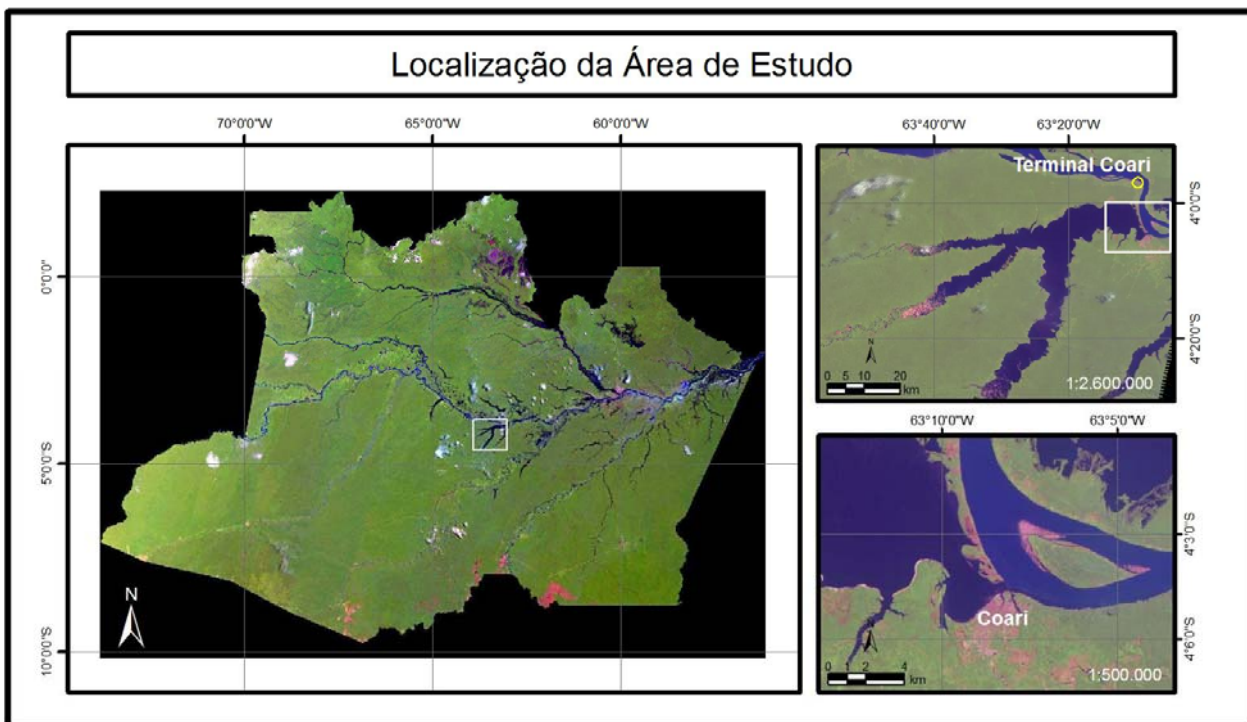


Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo. Imagem Landsat-5 TM (órbita 233/ponto 63), adquirida em 03/09/2007 (vazante). Composição colorida 5 (R), 4 (G) e 3 (B).

Na margem direita do Rio Solimões, está situado o Terminal de Coari, por onde a Petrobras escoar, através de transporte fluvial até outro terminal em Manaus, a produção de óleo da Província de Urucu, hoje estimada em 50.000 barris por dia. Este terminal está conectado à região de produção petrolífera por um duto com cerca de 280 km de extensão. Na confluência do Lago de Coari com o Rio Solimões, encontra-se a cidade de mesmo nome, que representa um dos mais importantes núcleos urbanos do Estado do Amazonas. Corroborando tal afirmativa, vale mencionar que o município de Coari é aquele que recebe no Estado os recursos mais significativos de *royalties* do petróleo.

No entanto, a cidade convive com o risco potencial de um derramamento de óleo no Terminal de Coari, no Rio Solimões, que pode se estender ao interior do Lago

de Coari, dependendo das condições hidrodinâmicas e hidrológicas, assim como do regime meteorológico prevalecente no momento do acidente ambiental. A compreensão da variação sazonal deste cenário é fundamental para a confecção de planos de contingência eficazes.

O Lago de Coari é conspicuamente afetado pelo ciclo sazonal de variação da altura das águas que caracteriza a Amazônia. Conforme pode ser constatado na Figura 2.2, tal variação entre as épocas seca e cheia pode chegar a 13 metros. A magnitude desse fenômeno certamente controla alguns elementos dos ecossistemas locais, como o estágio de inundação das florestas a seu redor.

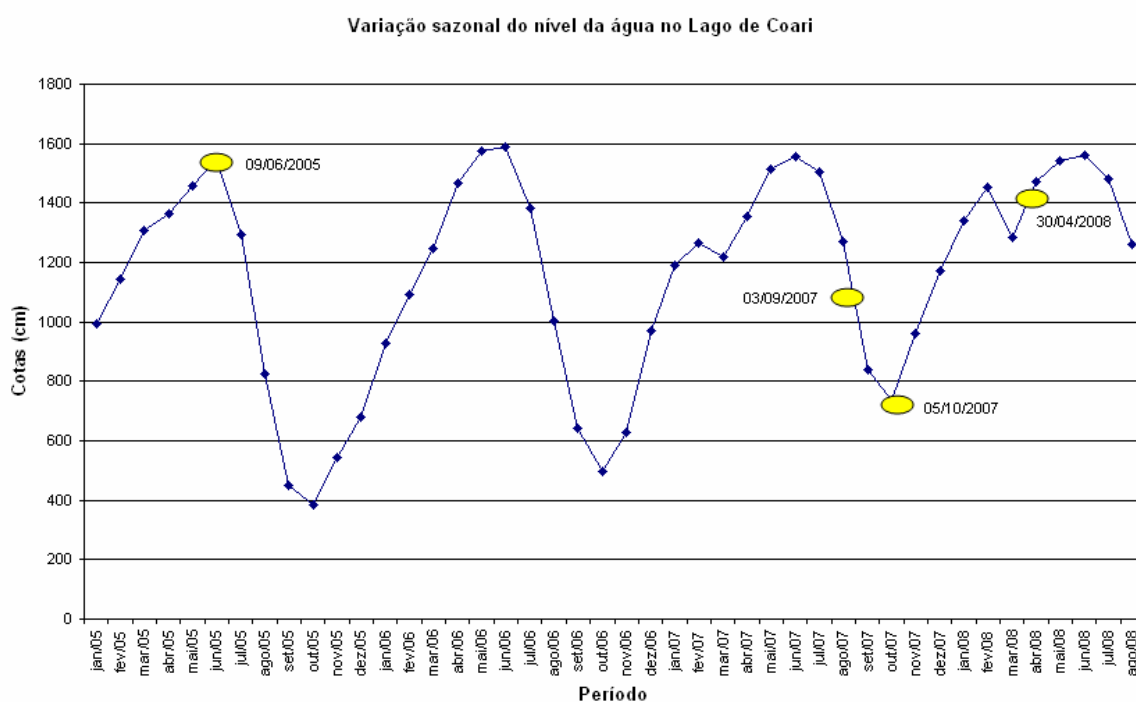


Figura 2.2: Variação no tempo do nível das águas (cotagrama) na régua de Coari, no período de 01 de janeiro de 2005 a 17 de agosto de 2008. As datas de aquisição das imagens Landsat-5 TM estão representadas como elipses amarelas.

Fonte: ANA (Agência Nacional de Águas) <http://www.ana.gov.br> .

Na região do Lago de Coari, caracterizado pela presença de água preta, não existem áreas com ocorrência expressiva de clorofila-a, o que favorece a discriminação por Sensoriamento Remoto das águas brancas do Rio Solimões. A literatura mostra que é difícil a discriminação, com essa tecnologia, do efeito de turbidez devido aos sedimentos e aquele referente à clorofila-a.

## **CAPÍTULO 3**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM SENSORIAMENTO REMOTO**

Segundo Novo (1995), o Sensoriamento Remoto pode ser definido como o conjunto de técnicas que abrange a aquisição de informação sobre um objeto, na superfície terrestre, a partir de medidas feitas por um sensor sem contato físico direto com ele. As informações sobre o objeto, neste caso, são derivadas da detecção e mensuração das modificações que ele impõe sobre o campo eletromagnético que o cerca. Tais técnicas consistem na utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves e espaçonaves, com o objetivo de estudar o meio ambiente através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da superfície do planeta, em suas mais diversas manifestações.

Diante da dimensão e da complexidade dos diferentes corpos de água da Amazônia, o uso de técnicas do sensoriamento remoto, associadas a dados de campo, apresenta-se como uma boa solução para um entendimento regional das planícies de inundação (Barbosa *et al.*, 2003). No que diz respeito às populações humanas, Brondizio *et al.* (1993) demonstraram que o sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat é adequado para o mapeamento detalhado do uso da terra na Amazônia. Além disso, Costa e Souza Jr. (2005) compararam o desempenho das imagens Landsat ETM+ e MODIS/TERRA para detectar evidências de desmatamento no Acre.

#### 3.1. Sistemas ópticos

O sensoriamento remoto orbital através de sistemas ópticos, ou seja, que operam na faixa do visível e infravermelho do espectro eletromagnético, representa, atualmente, uma ferramenta importante para estudos de bacias hidrográficas. Existem várias plataformas em operação, oferecendo diferentes opções de resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica, de acordo com as necessidades de cada aplicação (Jensen, 2000). Em especial, pode-se destacar o sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5, o qual foi utilizado no presente estudo.

### 3.2. Sistema Landsat

O programa Landsat dos Estados Unidos é considerado como pioneiro nos sistemas de sensoriamento remoto voltados para o estudo de processos terrestres, constando de uma série de satélites lançados em intervalos médios de 3 a 4 anos. Esse sistema foi desenvolvido pela *National Space and Atmospheric Administration* (NASA), com o objetivo de adquirir dados espaciais, espectrais e temporais sobre a superfície terrestre de forma repetitiva, constituindo um dos maiores êxitos na história do sensoriamento remoto. A série completa consiste de 7 plataformas, lançadas entre 1972 e 1999. Durante este período, vários tipos de sensores foram empregados, iniciando-se com o *Return Beam Vidicon* (RBV) e o *Multispectral Scanner* (MSS), culminando com o *Thematic Mapper* (TM) e o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) (Jensen, 2000). Uma falha mecânica no sistema ETM+ resultou em problemas na coleta de dados a partir de 31 de maio de 2003 (USGS, 2004). Assim, a maior parte das aplicações de estudos terrestres reverteu, atualmente, para o uso de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM), a bordo do satélite Landsat-5.

O Landsat-5 foi lançado em uma órbita polar de 705 km de altitude, buscando suprir as deficiências do Landsat-4, que apresentou defeitos na transmissão dos dados do sensor TM. O Landsat-5 representou um grande avanço tecnológico, pois é mais complexo do que os lançados anteriormente, considerando-se as mudanças ocorridas na configuração externa do satélite, incluindo as formas de retransmissão de dados, comunicação e controle de órbita (Campbell, 1987). Tal como seus antecessores, o satélite Landsat-5 apresenta como característica a repetitividade, isto é, a capacidade de observação da mesma área da superfície terrestre a cada 16 dias. Uma cena inteira abrange no terreno uma área de 185x185 km. Sua órbita heliosíncrona garante que todos os alvos, numa época específica do ano, serão iluminados de maneira similar. As características do Landsat-5 estão descritas na Tabela 3.1.



Tabela 3.1: Características do satélite Landsat-5

Fonte: Sabins, (1997).

Característica	Descrição
Órbita	Heliossíncrona
Altitude	705 km
Horário de passagem (hora solar local)	10:30
Órbitas por dia	14,5
Número de órbitas necessárias para recobrir a Terra	233
Ciclo de repetição (em dias)	16
Largura da faixa imageada	185 km

### 3.2.1. Características do sensor *Thematic Mapper* (TM)

O sensor TM coleta dados em faixas distintas do espectro eletromagnético, ou seja, em sete bandas espectrais, compreendendo três bandas na região do visível, uma banda no infravermelho próximo, duas bandas no infravermelho de pequeno comprimento de onda e uma banda no infravermelho termal. A resolução nominal destas bandas é de 30 metros, com exceção da banda termal, com um valor de 120m. Informações sobre as faixas espectrais deste sensor estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Bandas e faixas espectrais do sensor *Thematic Mapper* (TM)

Fonte: Sabins, (1997).

Banda	Faixa espectral
1	0,45 a 0,52 $\mu\text{m}$ - azul
2	0,52 a 0,60 $\mu\text{m}$ - verde
3	0,63 a 0,69 $\mu\text{m}$ - vermelho
4	0,76 a 0,90 $\mu\text{m}$ - infravermelho próximo
5	1,55 a 1,75 $\mu\text{m}$ - infravermelho de pequeno comprimento de onda
6	10,4 a 12,5 $\mu\text{m}$ - infravermelho termal
7	2,08 a 2,35 $\mu\text{m}$ - infravermelho de pequeno comprimento de onda

A região do espectro eletromagnético mais adequada ao estudo de corpos d'água está compreendida entre 400 e 800 nm (Tabela 3.3). Dado que as bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor *Thematic Mapper* (TM) recobrem quase totalmente esta faixa do

espectro (Tabela 3.2.), tais dados são úteis para o estudo e o monitoramento de ecossistemas aquáticos.

Tabela 3. 3: Principais aplicações das bandas do sensor *Thematic Mapper* (TM)

Fonte : INPE-DPI.

Bandas	Aplicações
1	Apresenta grande penetração em corpos de água com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre áreas antropizadas e com vegetação (e.g., solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (e.g., campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e do entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e o delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. É útil para a análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais, para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> , bem como para mapear áreas ocupadas com vegetação que foi queimada. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (e.g., aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, possibilitando a observação de estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações caso ocorra excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos a contrastes térmicos, sendo útil para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

### 3.3. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e sua aplicação para a determinação da qualidade da água na Amazônia

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) fundamenta-se no pressuposto de que a resposta de um pixel é uma combinação linear da resposta de cada alvo que ocorre em seu interior (Shimabukuro e Smith, 1991). É desejável, portanto, que se possa conhecer a proporção dos diferentes materiais presentes em um pixel. Com essa finalidade, podem ser utilizados modelos que permitam a decomposição do pixel em seus componentes puros ou *endmembers*.

Alguns autores, como Mertes *et al.* (1993), aplicaram o MLME para estimar a concentração dos sedimentos em suspensão das planícies de inundação da Amazônia, utilizando imagens Landsat MSS e TM. Tais autores obtiveram o comportamento espectral dos *endmembers* (componentes puros) em laboratório, com diferentes concentrações de sólidos em suspensão.

Novo e Shimabukuro (1994) consideraram como *endmembers* o total de sólidos em suspensão, a matéria orgânica dissolvida e a clorofila-a. Foram utilizadas as frações resultantes do modelo de mistura para correlação com a concentração de clorofila-a medida no campo. Seus resultados mostraram que a fração clorofila-a do espectro de reflectância teve uma correlação com os valores de concentração de clorofila-a na natureza.

Mertes (1994) propôs a aplicação de um modelo de mistura para decompor a reflectância da água em proporções de seus componentes opticamente ativos. Utilizou como componentes puros (*endmembers*) espectros de campo com diferentes concentrações de sólidos em suspensão. A abordagem adotada, no entanto, considerou componentes puros medidos num sistema aquático distinto daquele em que foi aplicada a metodologia.

Rudorff *et al.* (2006) utilizaram o MLME para definir três componentes puros (*endmembers*) com o objetivo de diferenciar massas de água na Amazônia. Tais *endmembers* foram selecionados utilizando uma imagem hiperespectral EO-1 Hyperion. Os resultados obtidos mostraram que há a necessidade de concepção de modelos de mistura não-lineares.

Novo *et al.* (2006) estudaram as mudanças sazonais na distribuição da clorofila-a na região amazônica, entre as cidades de Parintins, no Amazonas, e Almeirim, no Pará. O trabalho constou da aplicação do MLME em imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), visando decompor a reflectância da água em três componentes puros (*endmembers*): clorofila-a, carbono orgânico dissolvido e partículas inorgânicas em suspensão. Os resultados obtidos

mostraram que o MLME acompanhou as mudanças sazonais na distribuição de clorofila-*a* durante o ciclo hidrológico.

### 3.4. Análise de textura

A textura é definida como uma combinação entre magnitude e frequência da variação tonal em dados de sensoriamento remoto, sendo produzida pelo efeito conjunto de todas as pequenas feições que compõem uma área particular na imagem. Embora sejam consideradas como propriedades independentes, tonalidade e textura, na realidade, possuem relações íntimas. Sem variações em tonalidade, nenhuma mudança em textura pode ser percebida (Crosta, 1992). A textura está, pois, intrinsecamente ligada à tonalidade e, em determinadas circunstâncias, uma pode dominar a outra. Tal fato realça a importância de algoritmos que levem em conta aspectos texturais e tonais (isto é, radiométricos) na classificação automática de imagens digitais de sensoriamento remoto. Na presente dissertação, o classificador textural por semivariogramas foi utilizado, por sua capacidade de manipular, de modo determinístico, informações texturais e radiométricas (Miranda, *et al.*, 1997). Os resultados da classificação textural serão comparados com aqueles obtidos com a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

## CAPÍTULO 4

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1. Imagens Landsat-5 TM utilizadas no estudo

Dentre os dados Landsat-5 TM disponíveis na área de estudo, foram selecionadas quatro imagens para abranger as diferentes fases do ciclo hidrológico no complexo Solimões/Amazonas (seca, enchente, cheia e vazante), conforme a Tabela 4.1 e a Figura 2.2. As seis bandas espectrais correspondendo ao visível, infravermelho próximo e infravermelho de pequeno comprimento de onda, foram georreferenciadas com o mosaico GEOCOVER Landsat (<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsdi/>), adotando-se a projeção UTM e o datum WGS 84 (Figuras 4.1 a 4.4). Vale registrar a dificuldade de aquisição, na área de estudo, de dados de sensoriamento remoto na porção óptica do espectro eletromagnético, devido à intensa cobertura de nuvens durante todo o ano (notadamente na enchente e na cheia), assim como à presença de fumaça, na época seca, relacionada às queimadas.

Tabela 4.1: Imagens Landsat-5 TM utilizadas no presente estudo (órbita 233/ponto 63). Tais dados foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Data de aquisição	Fase do ciclo hidrológico
09/06/2005	Cheia
03/09/2007	Vazante
05/10/2007	Seca
30/04/2008	Enchente

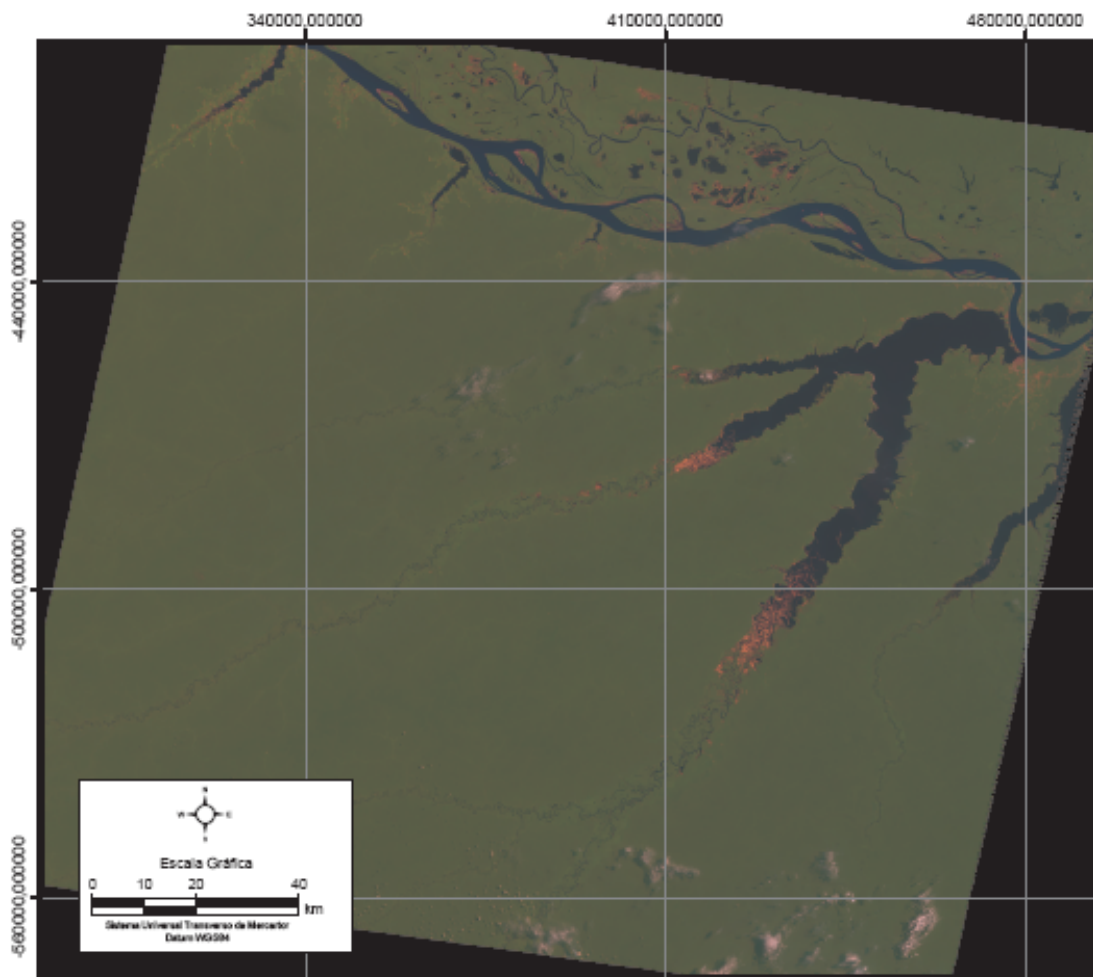


Figura 4.1- Imagem Landsat-5 TM (órbita 233/ponto 63), adquirida em 03/09/2007 (vazante). Composição colorida 5 (R), 4 (G), 3 (B). As áreas brancas indicam a presença de nuvens; as áreas em verde estão associadas à vegetação sadia; as áreas mais escuras nos cursos dos rios referem-se à água (branca ou preta); as áreas em vermelho em terrenos emersos relacionam-se a solos expostos; as áreas em vermelho no curso dos rios representam vegetação seca ou solos expostos.

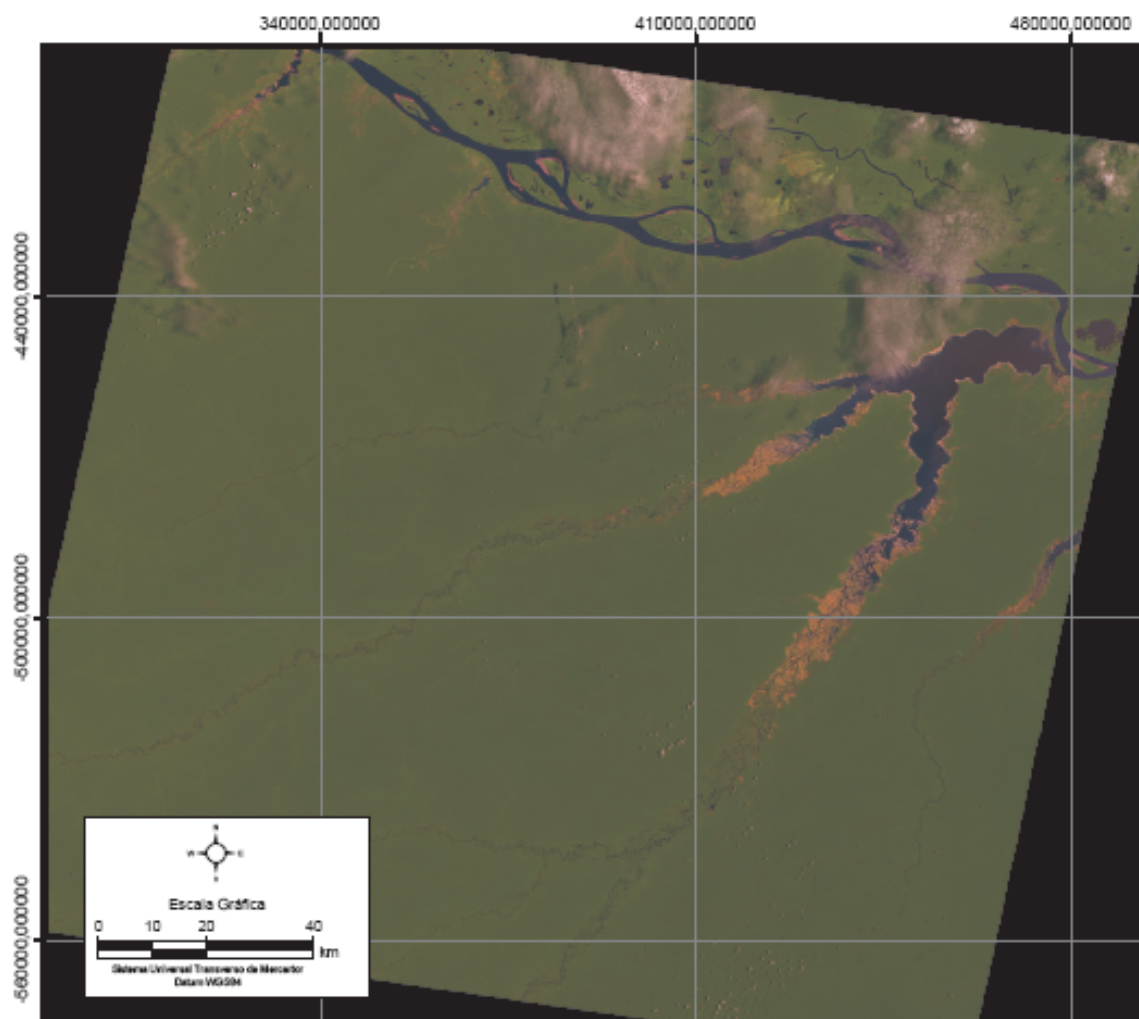


Figura 4.2- Imagem Landsat - 5 TM (órbita 233/ponto 63), adquirida em 05/10/2007 (seca). Composição colorida 5 (R), 4 (G), 3 (B). As áreas brancas indicam a presença de nuvens; as áreas em verde estão associadas à vegetação sadia; as áreas mais escuras nos cursos dos rios referem-se à água (branca ou preta); as áreas em vermelho em terrenos emersos relacionam-se a solos expostos; as áreas em vermelho no curso dos rios representam vegetação seca ou solos expostos; as áreas brancas nas margens do Lago de Coari indicam a existência de praias arenosas.

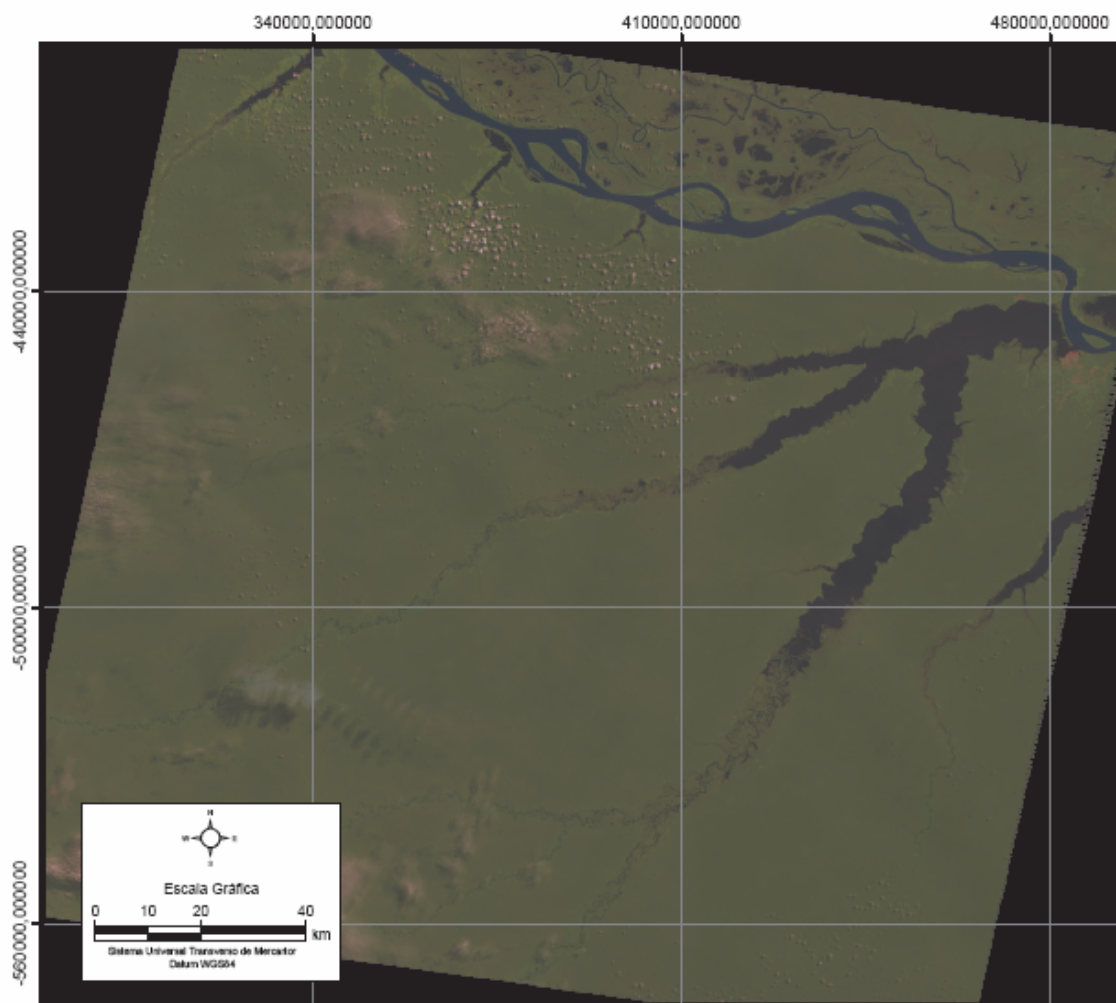


Figura 4.3- Imagem Landsat-5 TM (órbita 233/ ponto 63), adquirida em 30/04/2008 (enchente). Composição colorida 5 (R), 4 (G) e 3 (B). As áreas brancas indicam a presença de nuvens; as áreas em verde estão associadas à vegetação sadia; as áreas mais escuras nos cursos dos rios referem- se à água (branca ou preta).



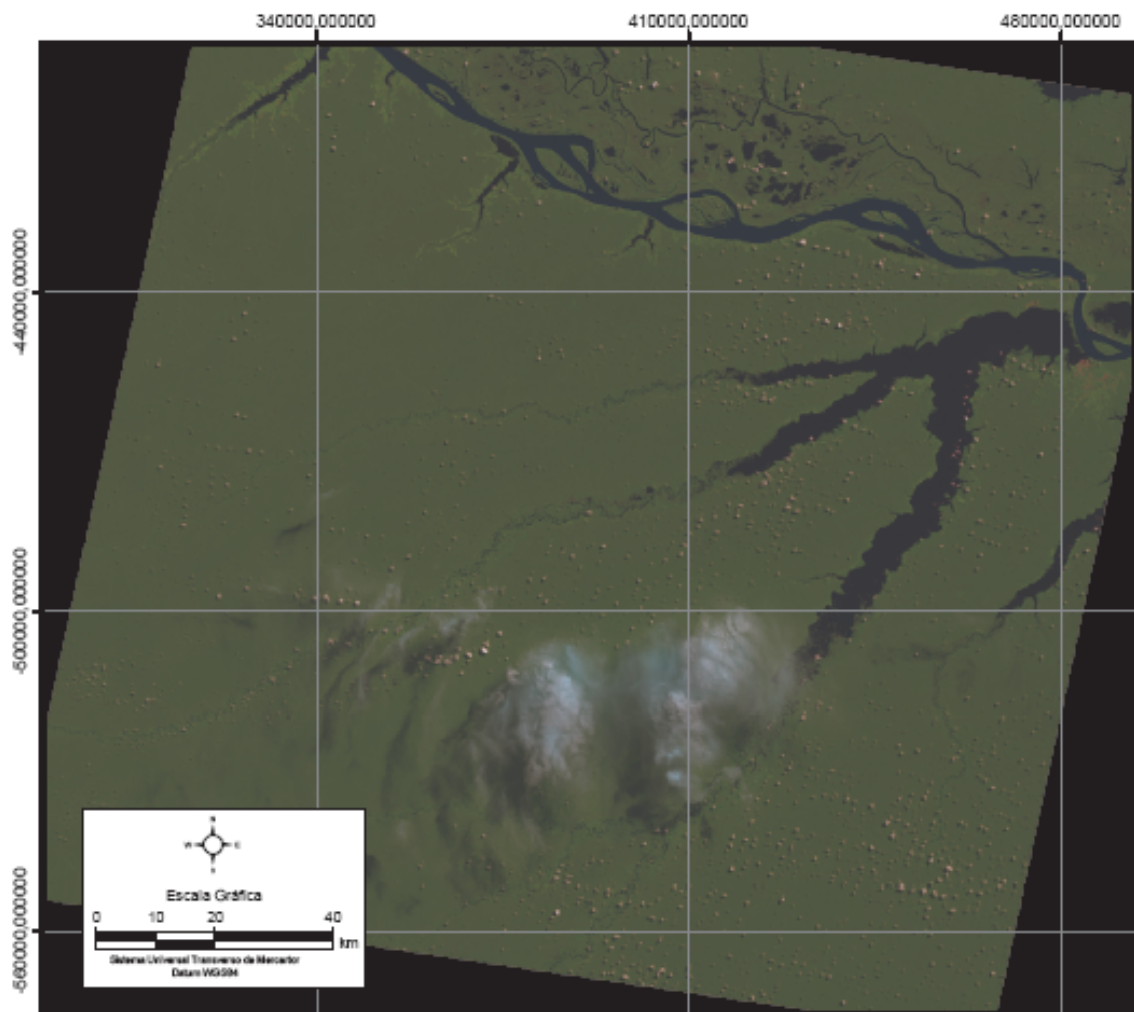


Figura 4.4- Imagem Landsat-5 TM (órbita 233/ ponto 63), adquirida em 09/06/2005 (cheia). Composição colorida 5 (R), 4 (G) e 3 (B). As áreas brancas indicam a presença de nuvens; as áreas em verde estão associadas à vegetação sadia; as áreas mais escuras nos cursos dos rios referem- se à água (branca ou preta).

#### 4.2. Processamento digital das imagens

O fluxograma da Figura 4.5 mostra a metodologia de processamento digital de imagens aplicada neste estudo.

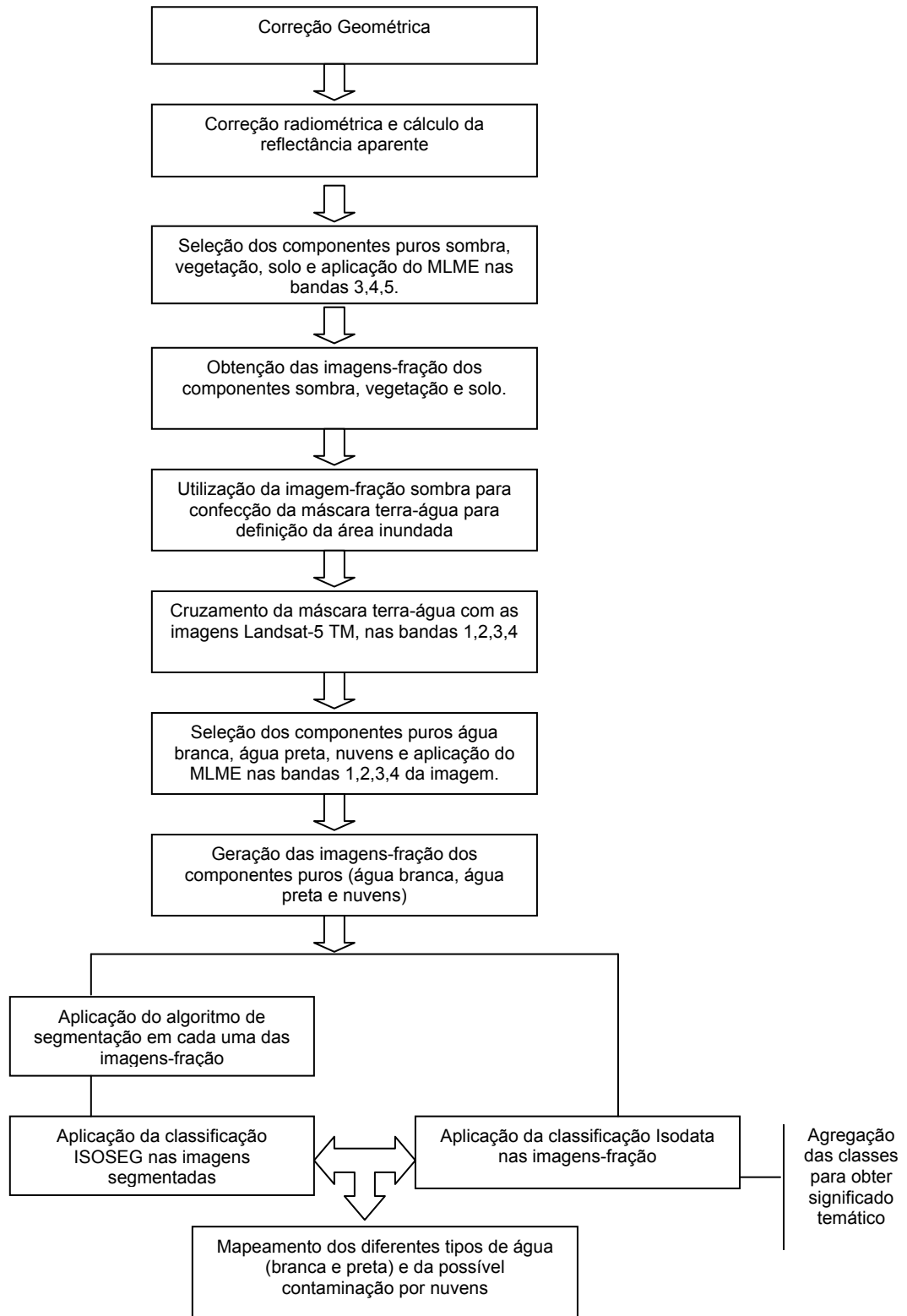


Figura 4.5. Fluxograma de procedimentos para o processamento de imagens realçando os atributos espectrais dos dados.

As imagens orbitais geradas pelos sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções espaciais e radiométricas, que acarretam imprecisões cartográficas, dentre outros efeitos deletérios. Autores como Richards (1986), Mather (1987) e Crosta (1992) atribuem essas distorções à curvatura da Terra, às variações de altitude e de velocidade das plataformas dos sensores e a erros de instrumentação e calibração.

As imagens digitais brutas devem, portanto, ser submetidas aos seguintes processamentos: correção radiométrica, que elimina os ruídos coerentes e os aleatórios, restaurando as falhas e realçando as feições da imagens original; correção geométrica, que atenua as distorções sistemáticas introduzidas nas imagens durante a sua aquisição (Figura 4.5).

As imagens Landsat-5 TM aqui empregadas foram cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através da DGI (Divisão de Geração de Imagens). A correção geométrica dos dados foi realizada no programa ENVI 4.3, através da função registro intitulada *Select GCPs: Image to Image*. Nessa operação, foi utilizada uma imagem GEOCOVER Landsat obtida em 20/08/2000. A projeção considerada foi a UTM (*Universal Transverse Mercator*), com fuso 20° S (Hemisfério Sul) e datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Diversos algoritmos podem ser usados para realizar esta operação. Optou-se, na presente pesquisa, pelo método do vizinho mais próximo. O polinômio utilizado foi de 1ª ordem.

As informações contidas nas imagens dos satélites da série Landsat são convenientemente representadas por números digitais, que compreendem um intervalo dinâmico com 256 valores, ou seja, uma quantização de 8 bits. Embora tais números digitais não expressem quantitativamente grandezas físicas (i.e., radiância, reflectância ou temperatura) referentes aos alvos da superfície terrestre, eles podem ser utilizados diretamente em aplicações que se baseiam nas diferenças consistentemente presentes em uma cena, como interpretação visual ou classificação automática. Entretanto, é indispensável a conversão desses números para valores físicos no caso de caracterizações espectrais ou da associação de informações de satélites com as propriedades biofísicas de alvos (e.g., biomassa, concentração de clorofila-a, etc.), conforme comentado por Robinove (1982), Barker *et al.*, (1984), Prince (1987) e Chavez (1989). Com efeito, na quantificação destes dados, as diferenças de condições atmosféricas, de iluminação e/ou de desempenho dos sensores precisam ser levadas em consideração. Assim, Epiphanyo e Formaggio (1988) ressaltaram a importância da utilização dos valores de reflectância no estudo

do comportamento espectral dos alvos. Para minimizar os efeitos decorrentes de diferentes sensores, ou do desgaste dos detectores ao longo do tempo, Robinove (1982) recomendou a transformação radiométrica dos níveis digitais de uma imagem nas seguintes situações:

- utilização de cenas de diferentes datas;
- mosaico de duas ou mais cenas;
- mudança na calibração de um sensor orbital;
- utilização de cenas de diferentes sensores.

No caso das imagens Landsat-5 TM, um procedimento bastante comum é a conversão dos números digitais em valores de radiância e/ou reflectância (aparente ou de superfície). Essa conversão pode ser efetuada com a utilização de valores de radiância  $L_{min\lambda}$  e  $L_{max\lambda}$  para cada banda espectral, conforme apresentado em Chander e Markham (2003). Em se tratando de dados TM com aquisição compreendida entre 01/03/1984 e 04/05/2003, devem ser empregados os valores de  $L_{min\lambda}$  e  $L_{max\lambda}$  apresentados na Tabela 4.2. Para imagens obtidas após 04/05/2003, devem ser utilizados os valores de  $L_{min\lambda}$  e  $L_{max\lambda}$  apresentados nessa mesma tabela. Tais valores de radiância são expressos em  $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ .

Tabela 4.2: Intervalos dinâmicos pós-calibração para dados processados nos Estados Unidos pelo NLAP (*National Landsat Archive Production System*).

Fonte: Chander e Markham (2003).

Dados de Processamento	De 01/03/1984 a 04/05/2003				Depois de 04/05/2003			
	Bandas	$L_{min\lambda}$	$L_{max\lambda}$	Grescale	Brescale	$L_{min\lambda}$	$L_{max\lambda}$	Grescale
1	-1,52	152,10	0,602431	-1,52	-1,52	193,0	0,762824	-1,52
2	-2,84	296,81	1,175100	-2,84	-2,84	365,0	1,442510	-2,84
3	-1,17	204,30	0,805765	-1,17	-1,17	264,0	1,039880	-1,17
4	-1,51	206,20	0,814549	-1,51	-1,51	221,0	0,872588	-1,51
5	-0,37	27,19	0,108078	-0,37	-0,37	30,2	0,119882	-0,37
6	1,238	15,303	0,055158	1,238	1,238	15,303	0,055158	1,238
7	-0,15	14,38	0,056980	-0,15	-0,15	16,5	0,065294	-0,15

Shimabukuro e Smith (1991) e Shimabukuro *et al.* (1998) recomendaram a transformação do número digital para valores de reflectância aparente antes da aplicação da técnica do modelo de mistura. Utilizam para isso as relações propostas por Markham e Barker (1986), nas quais os números digitais são transformados em valores de radiância por meio de parâmetros de calibração de pré-lançamento do sensor, utilizando a seguinte fórmula:

$$L_{\lambda} = L_{\min \lambda} + ((L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}) * QCAL / QCAL_{\max}) \quad \text{Equação 4.1}$$

onde

$L_{\lambda}$  = radiância espectral;

$L_{\min \lambda}$  = radiância espectral mínima;

$L_{\max \lambda}$  = radiância espectral máxima;

$QCAL_{\max}$  = número digital máximo (dependente da resolução radiométrica do sensor);

$QCAL$  = número digital a ser convertido;

Posteriormente, os valores de radiância espectral ( $L_{\lambda}$ ) são utilizados para o cálculo da reflectância aparente, através da seguinte fórmula:

$$\rho_p = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{sun \lambda} * \cos \theta} \quad \text{Equação 4.2}$$

onde

$\rho_p$  = reflectância aparente;

$L_{\lambda}$  = radiância bidirecional aparente ( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );

$E_{sun \lambda}$  = irradiância espectral média do sol no topo da atmosfera ( $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );

$d$  = distância sol-terra em unidades astronômicas,

$\theta$  = ângulo solar zenital, formado entre a iluminação solar e o zênite local. É obtido a partir do ângulo de elevação solar ( $\beta$ ), conforme ilustrado na Figura 4.6.

$$\begin{aligned} \theta + \beta &= 90 \\ \theta &= 90 - \beta \\ \cos \theta &= \cos (\pi/2 - \beta) \end{aligned} \quad \text{Equação 4.3}$$

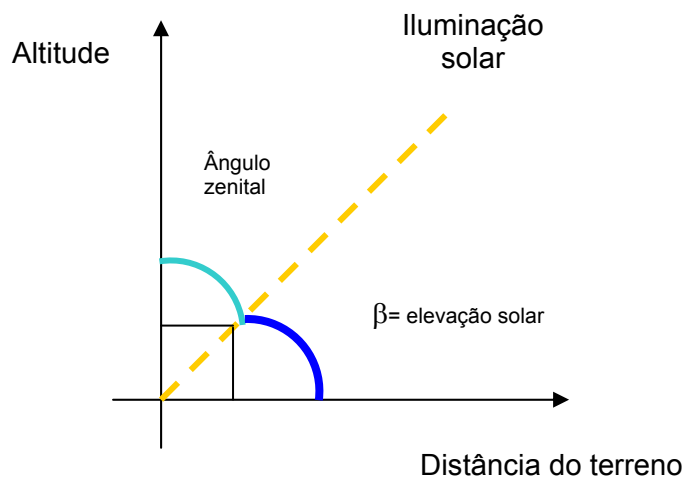


Figura 4.6- Diagrama ilustrando o conceito de ângulo zenital.

Fonte: Fiorio ([www.esalq.usp.br/departamentos/ler/disciplinas/Topo/LER450/Fiorio](http://www.esalq.usp.br/departamentos/ler/disciplinas/Topo/LER450/Fiorio))

#### 4.3. Identificação das assinaturas espectrais

As amostras para a identificação das assinaturas espectrais dos componentes puros (*endmembers*) foram coletadas diretamente das imagens convertidas em reflectância aparente, correspondendo a trechos no Rio Solimões, de água branca, e no Lago de Coari, de água preta. Foi também obtida uma amostra referente à cobertura de nuvens.

Portanto, foram adquiridas assinaturas espectrais para os componentes puros (*endmembers*) água branca, água preta e nuvens, abrangendo as diferentes fases do ciclo hidrológico do complexo Solimões/Amazonas (seca, enchente, cheia e vazante).

O processo teve início com a seleção dos componentes puros sombra, vegetação e solo nas banda 3, 4 e 5, visando à confecção de curvas de comportamento espectral e posteriormente aplicado o MLME e a obtenção das imagens-fração de cada componente. (Figura 4.5). A seguir, utilizando a imagem-fração sombra, foi confeccionada a máscara terra-água, visto que o comportamento

espectral da sombra é similar ao da água. Tal máscara permitiu isolar para análise apenas as porções da imagem Landsat-5 TM correspondentes aos ambientes

aquáticos. Com isso, foi cruzada a máscara com as bandas 1,2,3 e 4 das imagens Landsat-5 TM.

Em seguida, foram selecionados os componentes puros água branca, água preta e nuvens e, com isso, aplicado o MLME nas bandas 1, 2, 3 e 4 das imagens Landsat-5 TM.

Foram ainda geradas as imagens-fração dos componentes puros acima citados, aplicado o algoritmo de segmentação a tais produtos e classificação ISOSEG em cada uma das imagens-fração (Figura 4.5). Como abordagem alternativa, as imagens-fração originais foram também classificadas utilizando o método Isodata.

#### 4.4. Aplicação de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) tem como função separar a contribuição espectral de cada objeto dentro do pixel das imagens de sensores remotos, quantificando as proporções dos componentes puros que constituem o pixel misturado. Para isto, é feita a estimativa, em cada pixel, da proporção de componentes puros, a partir das respostas espectrais captadas pelos sensores, gerando imagens-fração ou imagens-proporção de cada componente estimado (Shimabukuro e Smith, 1991). Através da aplicação do algoritmo de mistura, são geradas tantas imagens quantos forem os componentes puros identificados pelo modelo.

A baixa resolução espacial dos sensores resulta no fato de que um pixel contenha mais do que um tipo de cobertura de terreno. A radiância detectada pelo sensor é, portanto, a soma das contribuições de todos os alvos presentes em cada elemento de resolução. Como consequência, cada pixel da imagem possui um valor de nível de cinza que corresponde à resposta espectral integrada de cada elemento de resolução na superfície terrestre (Shimabukuro e Smith, 1991; Shimabukuro *et al.*, 1998).

Portanto, se as proporções dos componentes puros puderem ser conhecidas, então é viável obter as respostas espectrais dos *endmembers*. Estas respostas são expressas pelas seguintes equações (Shimabukuro e Smith, 1991):

$$\begin{array}{l}
 r_i = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n + e_i \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 r_m = a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{m2n}X_n + e_m
 \end{array}$$

Equação 4.4

ou então

$$r_i = \sum ( a_{ij} \cdot X_j ) + e_i$$

Equação 4.5

onde

$r_i$  = reflectância espectral média na banda  $i$  de um pixel com um ou mais componentes;

$a_{ij}$  = reflectância espectral conhecida do componente puro  $j$  na banda  $i$ ;

$x_j$  = proporção do componente puro  $j$  dentro do pixel;

$e_i$  = erro de estimação para a banda  $i$ ;

$j = 1, 2, \dots, n$  (número de componentes puros considerados no problema);

$i = 1, 2, \dots, m$  (número de bandas do sensor).

As estimativas de  $x_j$  estão sujeitas às seguintes restrições:

$$\sum ( x_j ) = 1$$

Equação 4. 6

$$0 \leq x_j \leq 1$$

Equação 4. 7



Dentre os vários métodos para a estimativa das proporções de cada componente puro, os principais são Mínimos Quadrados Restrito e Mínimos Quadrados Ponderado. Ambos procuram estimar cada proporção minimizando a soma do quadrado dos erros. A diferença entre eles é que o método dos Mínimos Quadrados Restrito não aceita a aplicação para o modelo quando ocorrem valores de proporções negativas e maiores que 1. O método de Mínimos Quadrados Ponderado contorna essa restrição através da associação de uma matriz diagonal de pesos ao modelo (Shimabukuro e Smith, 1991).

No presente trabalho, foi aplicado o MLME aos componentes puros usados para gerar as curvas de comportamento espectral no Rio Solimões e no Lago de Coari, quais sejam: água preta, água branca e nuvens. O método utilizado foi o de Mínimos Quadrados Restrito, por ser o mais simples e rápido, aplicável quando o número de componentes puros é igual a três. Os dados foram processados no *software* SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), descrito em [www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html), assim como em Câmara *et al.*(1996).

#### 4.5. Geração das Imagens-Fração

A aplicação do Modelo Linear de Mistura (MLME) consiste no cálculo da relação linear entre todas as bandas utilizadas para representar a mistura espectral dos componentes encontrados em áreas de formações naturais, dentro do elemento de resolução (*pixel*) do sensor. Assim, a resposta espectral de cada *pixel*, em qualquer banda, pode ser definida como uma combinação linear das respostas de cada componente, localizado no elemento de resolução no terreno do sensor. Ou seja, para cada *pixel* da imagem é calculada a informação sobre a proporção de cada componente (Shimabukuro e Smith, 1991).

As imagens-fração são produtos gerados pelos algoritmos implementados em *softwares* de processamento de imagens. É muito freqüente o uso de imagens - fração de vegetação, solo e sombra/água, que são alvos presentes na maioria das cenas terrestres. As imagens-fração podem ser consideradas como uma forma de redução da dimensionalidade dos dados ou de realce das informações (Shimabukuro e Ponzoni, 2007). Além disso, o MLME transforma a informação espectral em informação física (valores de proporção dos componentes no *pixel*), ao gerar as imagens-fração.

As imagens-fração obtidas na presente pesquisa dizem respeito aos componentes puros água branca, água preta e nuvens. A imagem-fração água realça, por exemplo, as áreas ocupadas com corpos d' água (rios, lagos). Ao representar no espaço as proporções desses diferentes *endmembers*, elas possibilitam a extração de informação temática através de algoritmo de segmentação e classificação por regiões.

#### 4.6. Segmentação

É o processo que permite a subdivisão de uma imagem em regiões, as quais representam um conjunto de *pixels* contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade, por exemplo, em nível de cinza ou textura (Hussain, 1991).

A segmentação das imagens-fração, foi efetuada utilizando o segmentador de crescimento por regiões, implementado no aplicativo SPRING, que tem como objetivo gerar polígonos espectralmente homogêneos. O emprego desse segmentador requer a definição de dois limiares: a) de similaridade, abaixo do qual duas regiões, são consideradas similares e agrupadas em uma única região, de modo que, se a diferença entre o valor do *pixel* e a média da região vizinha for maior que o valor da similaridade definido pelo usuário, o *pixel* não pertencerá àquela região; b) de área, valor mínimo, expresso em números de *pixels*, para que uma região seja individualizada.

No presente trabalho, utilizou-se um limiar de similaridade igual a 8 e um limiar de área igual a 40 *pixels*.

#### 4.7. Classificação

A classificação é o processo de extração de informação em imagens de sensoriamento remoto que objetiva reconhecer padrões e objetos homogêneos, de modo a mapear áreas da superfície terrestre que correspondem a temas de interesse (Swain e Davis, 1978, citados por Santos, R. C., 2002).

A classificação não-supervisionada é um processo onde operações numéricas são conduzidas para procurar agrupamentos naturais de propriedades espectrais dos *pixels* (classes). Parte do princípio de que o código computacional empregado é capaz de identificar, através de uma função de classificação, as classes dentro de um conjunto de dados. O primeiro passo desse procedimento é a realização de uma análise de agrupamento, na qual nuvens de dados são identificadas no espaço de atributos. A partir desse resultado, é possível estabelecer, através de uma função de classificação, quais concentrações (nuvens) devem ser tratadas como grupos separados, ou seja, como classes temáticas (Santos, 2002).

Foi aqui utilizado o classificador ISOSEG, que é um dos algoritmos disponíveis no SPRING para classificar regiões de uma imagem segmentada. É um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado, aplicado sobre o conjunto de regiões, que, por sua vez, são caracterizadas por seus atributos estatísticos de média e matriz de covariância, como também pela área. É necessário que o usuário defina um limiar de aceitação expresso em porcentagem. No presente trabalho, o limiar de aceitação considerado foi de 75%. Este valor, por sua vez, define uma distância de Mahalanobis, de forma que todas as regiões pertencentes a uma dada classe estão delas separadas por uma distância estatística inferior a esta. Quanto maior o limiar, maior esta distância e, conseqüentemente, menor será o número de classes detectadas pelo algoritmo. ([www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentação.html](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentação.html)).

Utilizamos também a classificação não-supervisionada pelo método Isodata como funcionalidade do PCI Geomatics 10.1. Após a aplicação do Isodata, às imagens-fração originais dos componentes puros água branca e água preta, os produtos resultantes passaram por uma etapa de pós-classificação, onde foi realizada uma agregação interativa das classes, com o objetivo de se obter significado temático.

Finalmente, a Figura 4.7 mostra o fluxograma de procedimentos de um outro tipo de classificação aplicada à Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, no período de cheia, utilizando o USTC (*Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*). Tal algoritmo emprega a função semivariograma como um descritor de textura, considerando o valor do *pixel* no contexto de seus vizinhos. O pacote é eficiente no tratamento digital de imagens, visando discriminar áreas com rugosidade distinta na superfície. Este classificador é determinístico e manipula informações texturais e radiométricas (Miranda *et al.*, 1997). A informação textural é descrita não só pela forma e pelo valor da função semivariograma circular, mas também pelo valor da

variância dos DNs (*digital numbers*) numa vizinhança circular definida por uma grande separação ou *lag distance* (H). A informação radiométrica é apresentada pelos DNs das imagens após a eliminação do efeito *speckle* (DNdsp), usando-se com essa finalidade o Filtro FFROST, implementado no software PCI Geomatics 10.1.

Os procedimentos de classificação descritos acima permitiram o mapeamento dos diversos tipos de água (branca e preta) na área de estudo. Além disso, foi possível estabelecer qualitativamente o risco de contaminação por nebulosidade, tomando por base a imagem-fração do componente puro referente às nuvens.

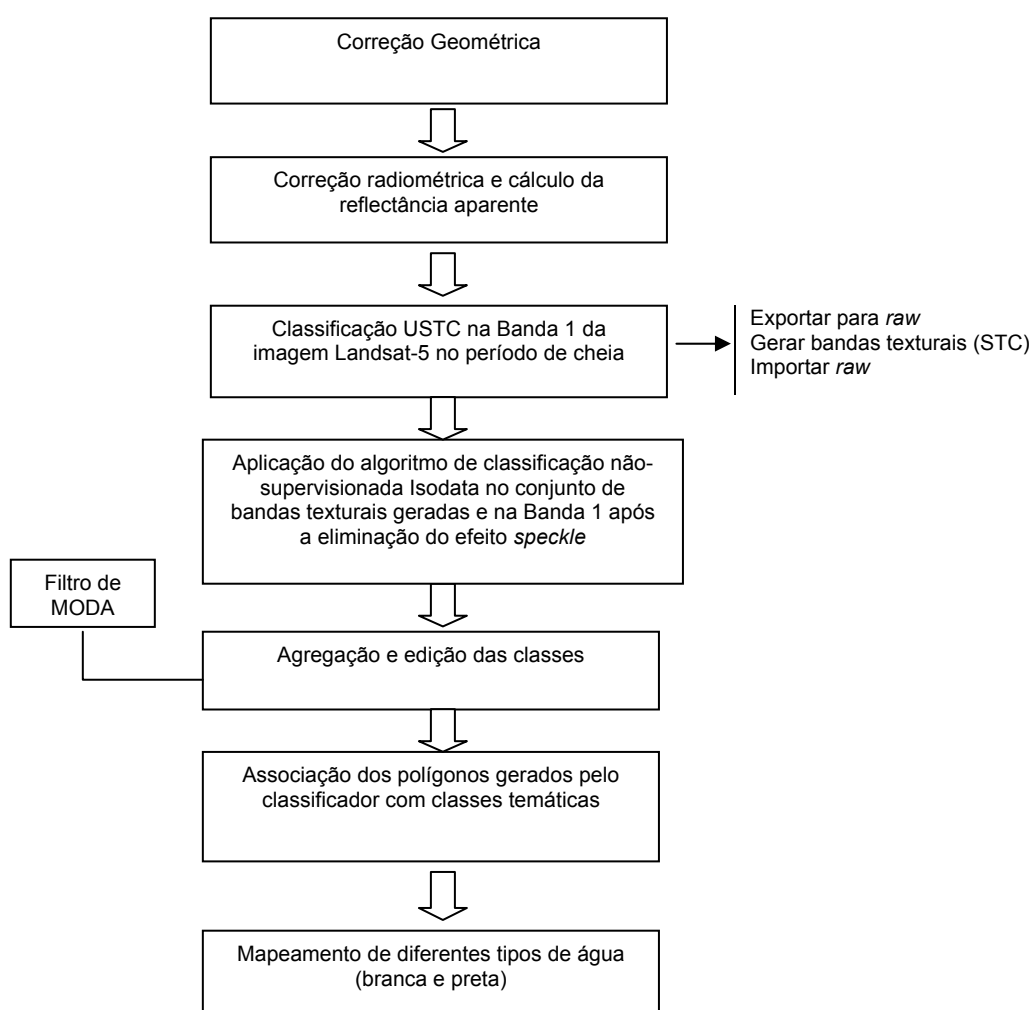


Figura 4.7- Fluxograma de procedimentos para a classificação textural da Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, no período de cheia.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos com a metodologia de processamento digital de imagens ilustradas nas Figuras 4.5 e 4.7 encontram-se abaixo discriminados:

- para cada uma das imagens Landsat-5 TM estudadas (Tabela 4.1), as assinaturas espectrais referentes aos componentes puros (água branca, água preta e nuvens) estão apresentadas nas figuras 5.1, 5.13, 5.25 e 5.37;
- as imagens-fração dos componentes puros correspondem às figuras: 5.2, 5.14, 5.26 e 5.38 (água branca); 5.3, 5.15, 5.27 e 5.39 (água preta); 5. 4, 5.16, 5.28 e 5.40 (nuvens);
- detalhes na região de Coari são realçadas nas imagens-fração dos componentes puros, conforme apresentado nas figuras: 5.5, 5.17, 5.29 e 5.41 (água branca); 5.8, 5.20, 5.32 e 5.44 (água preta); 5.11, 5.23, 5.35 e 5.47 (nuvens);
- detalhes da classificação não-supervisionada ISOSEG na região de Coari são exibidos nas figuras: 5.6, 5.18, 5.30 e 5.42 (água branca); 5.9, 5.21, 5.33 e 5.45 (água preta); 5.12, 5.24, 5.36 e 5.48 (nuvens);
- detalhes da classificação não-supervisionada Isodata na região de Coari são exibidos nas figuras: 5.7, 5.19, 5.31 e 5.43 (água branca); 5.10, 5.22, 5.34 e 5.46 (água preta);
- detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada USTC (Figura 50) aplicada à Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, obtida em 09/06/2005 (cheia).

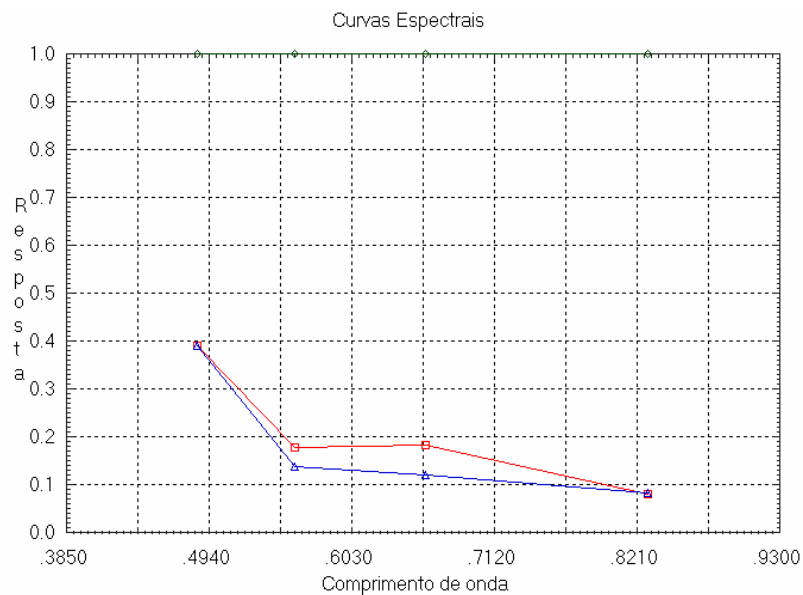


Figura 5.1- Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante). A resposta é expressa como reflectância, correspondendo às bandas 1, 2, 3 e 4 do Landsat-5 TM. O comprimento de onda é expresso em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).

— ÁGUA BRANCA    — ÁGUA PRETA    — NUVENS

No Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), o nível de cinza associado a cada *pixel* representa a contribuição de um componente puro específico no campo instantâneo de visada do sistema sensor. Por conseguinte, valores de cinza mais altos exprimem a predominância do componente puro considerado naquela imagem-fração em particular. Nesse contexto, a análise das imagens-fração referentes aos componentes puros no período da vazante (imagem Landsat - 5 TM de 03/09/2007) indica que: água branca predomina ao longo do curso do Rio Solimões (Figura 5.2); água preta é mais abundante no Lago de Coari, além de outros lagos e tributários na planície aluvial do Rio Solimões (Figura 5.3); não ocorrem nuvens de maneira expressiva no Rio Solimões e no Lago de Coari (Figura 5.4).

Curvas de comportamento espectral obtidas para água branca e água preta apresentam reflectâncias e absorção iguais (respectivamente) nas bandas 1 e 4. Sendo que nas bandas 2 e 3 há separação no comportamento dessas curvas.

Quanto às assinaturas espectrais, verifica-se que o componente puro correspondente às nuvens apresenta reflectância máxima nos intervalos espectrais

correspondentes às bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor TM do satélite Landsat-5 em todos os períodos hidrológicos abordados na presente pesquisa. Para rios de águas brancas, em decorrência dos materiais em suspensão, os valores de reflectância são sempre mais altos que aqueles da água preta (Figuras 5.1, 5.13, 5.25 e 5.37).

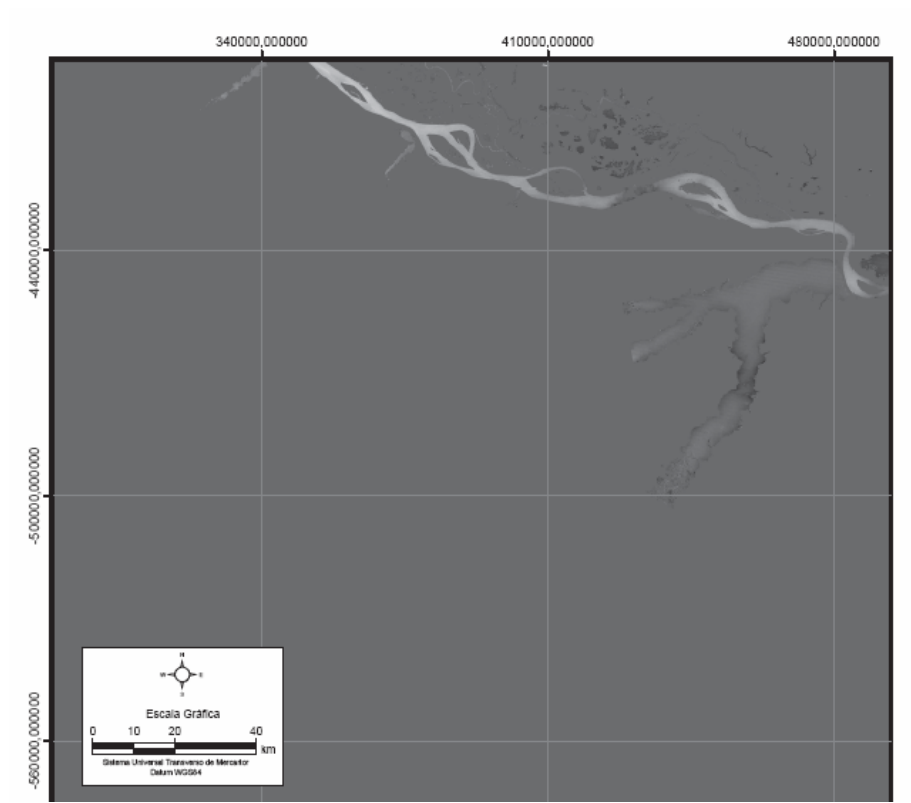


Figura 5.2- Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

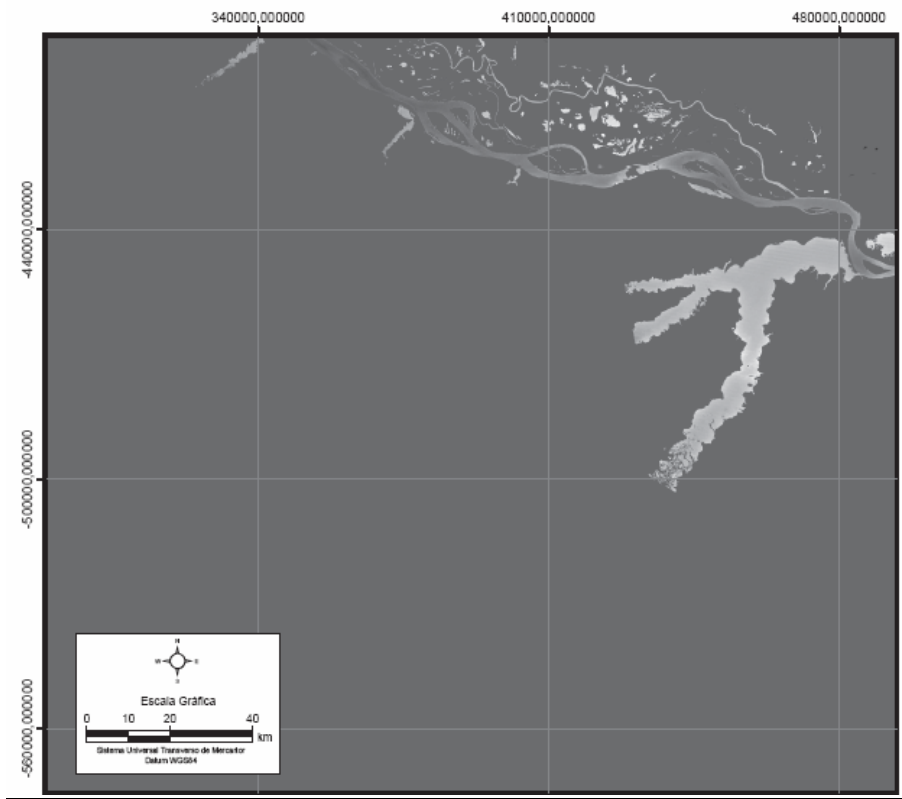


Figura 5.3- Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).



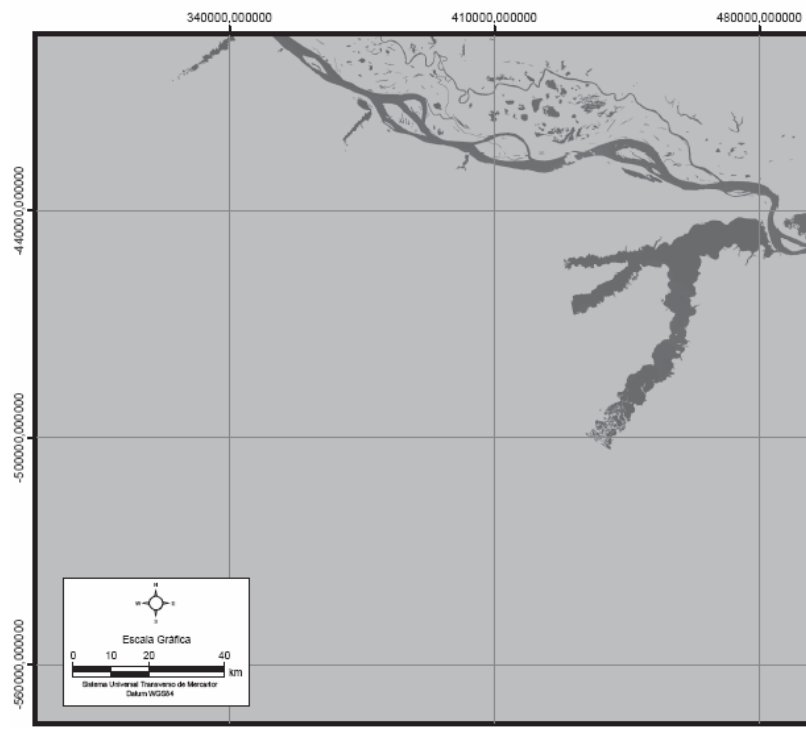


Figura 5.4 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

5.1. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da vazante:

O detalhe da imagem-fração água branca na área de Coari, correspondente ao período da vazante, é apresentado na Figura 5.5. O resultado da classificação ISOSEG referente a essa imagem é apresentado na Figura 5.6. O produto obtido com o algoritmo Isodata é apresentado na Figura 5.7.

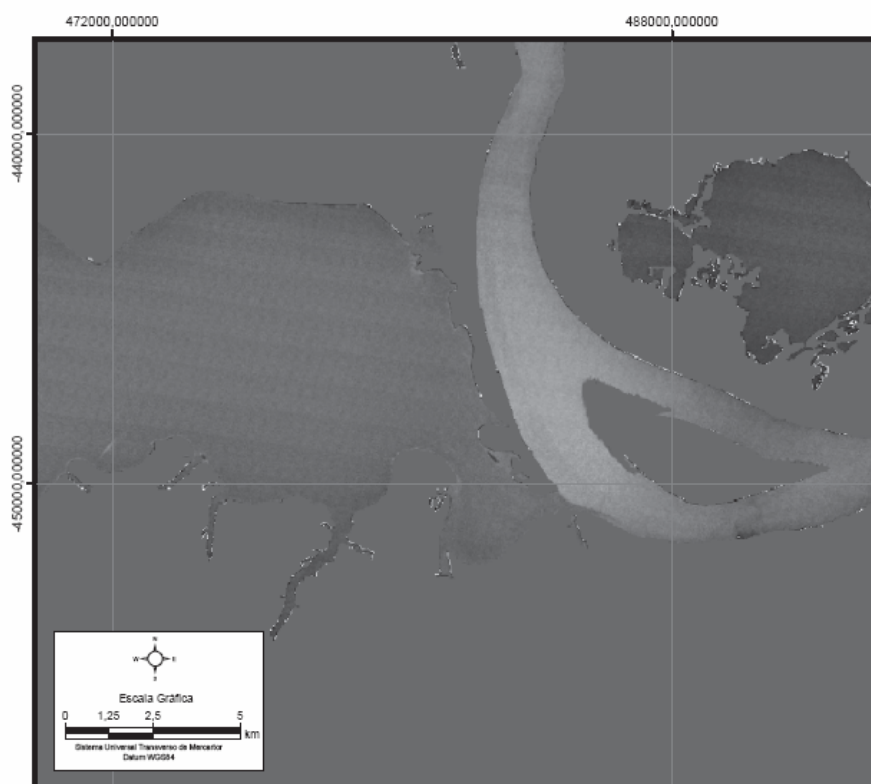


Figura 5.5 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante). Ver localização na Figura 2.1.

A observação da Figura 5.5 sugere que há uma predominância local desse componente puro no trecho do Rio Solimões situado entre o Terminal de Coari e a cidade de mesmo nome, onde a tonalidade da imagem é mais clara. Tal área fluvial corresponde às regiões colorizadas como amarelo e magenta na imagem classificada da Figura 5.6.

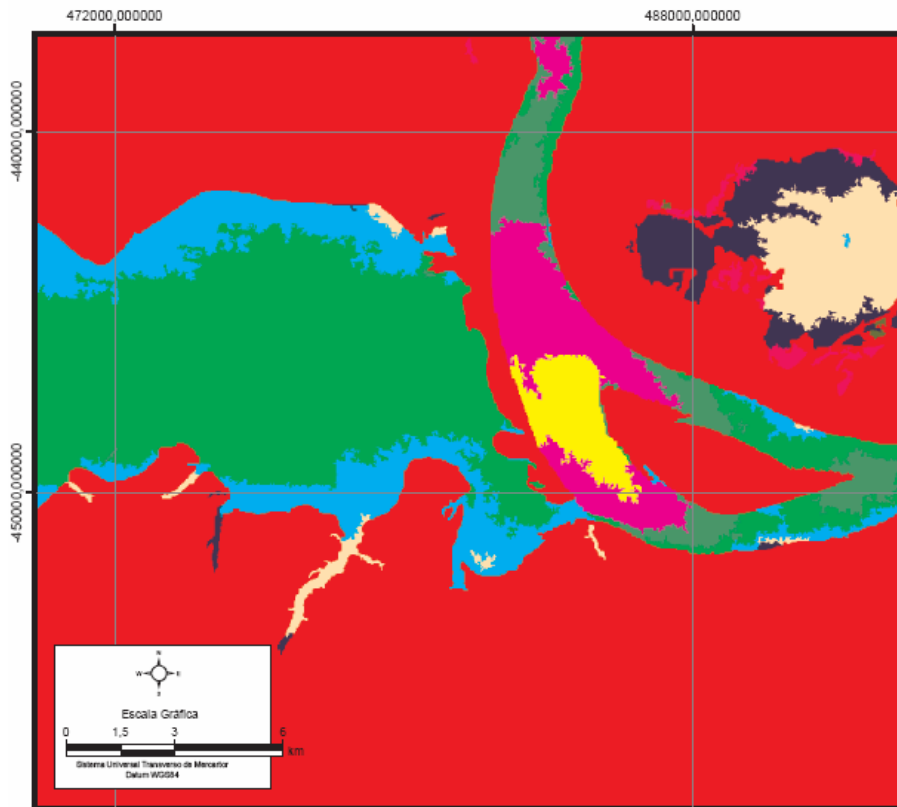


Figura 5.6 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

Considera-se o resultado Isodata exibido na Figura 5.7 como o mais apropriado para o mapeamento dos diferentes tipos de água na confluência do Lago de Coari com o Rio Solimões. A comparação das Figuras 5.5 e 5.7 indica que a classe “Água 03” apresenta a maior contribuição do componente puro água branca, enquanto que “Água 01” mostra a menor contribuição.

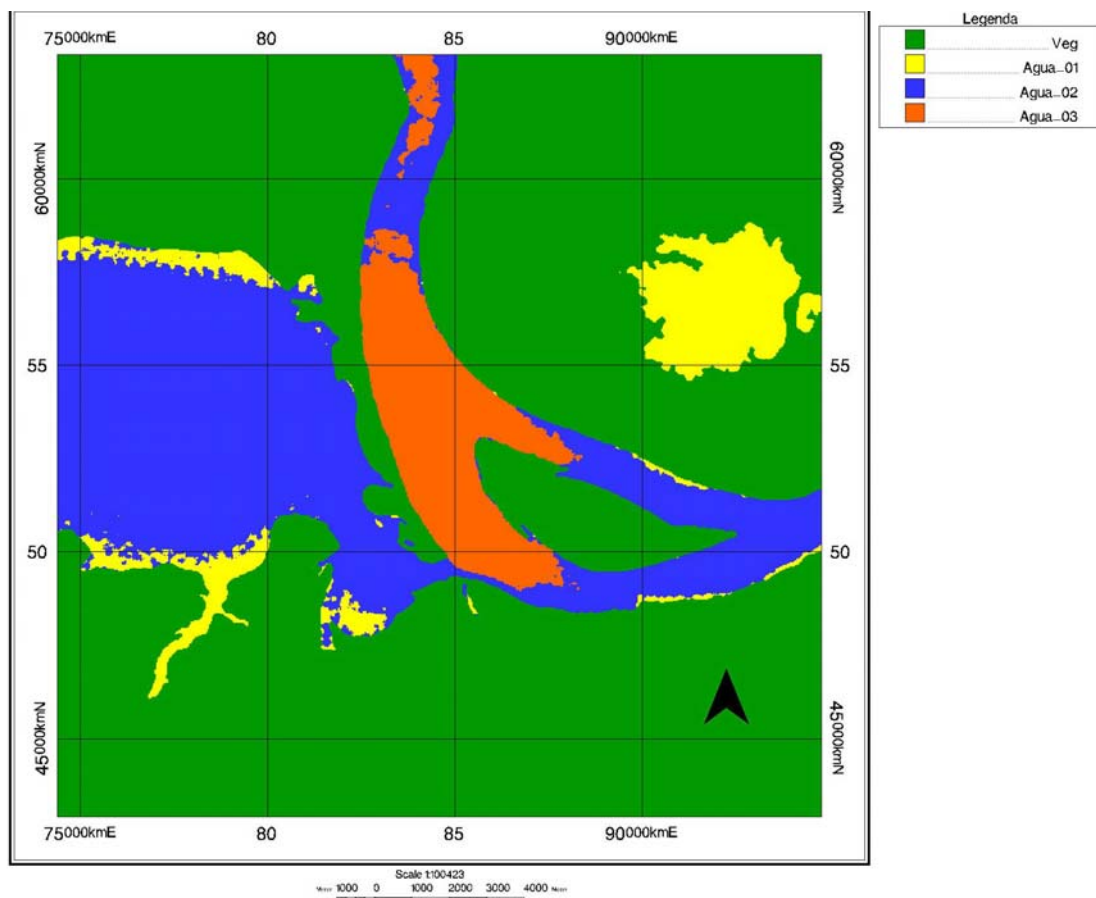


Figura 5.7 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água branca, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com Figura 5.5.

O detalhe da imagem-fração água preta na área de Coari, correspondente ao período da vazante, é apresentado na Figura 5.8. O resultado da classificação ISOSEG referente a essa imagem é apresentado na Figura 5.9. O produto obtido com o algoritmo Isodata é apresentado na Figura 5.10.

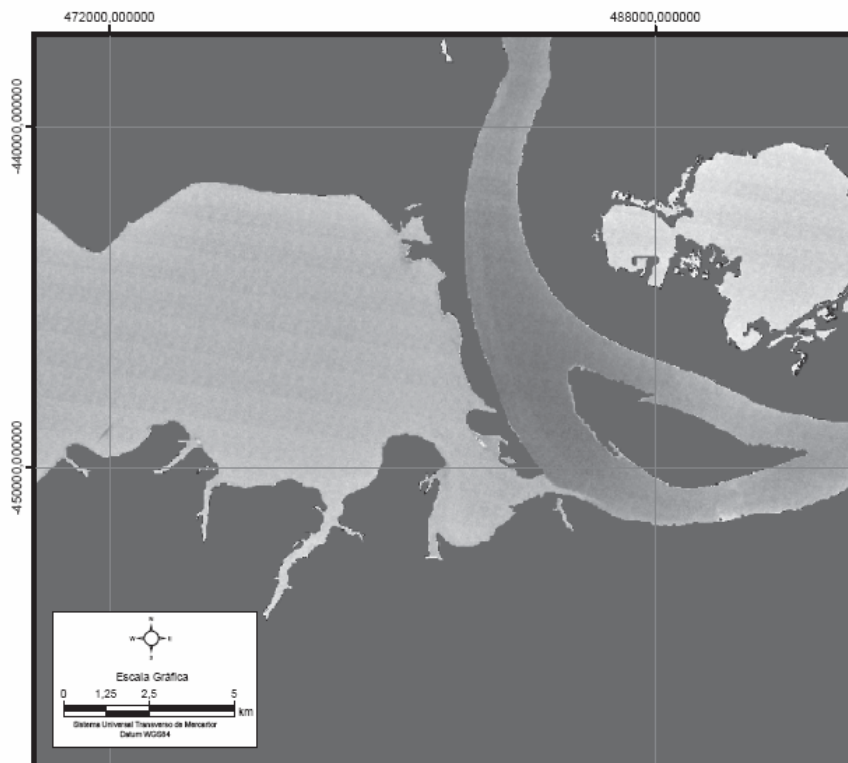


Figura 5.8 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

Na classificação ISOSEG da imagem-fração água preta (Figura 5.9), verifica-se a predominância desse componente puro no Lago de Coari. Os resultados do algoritmo Isodata sugerem ainda que as porções com maior contribuição desse componente puro situam-se nas margens do citado lago (classe “Água 03” na Figura 5.10). Pode-se constatar também a existência de um fluxo limitado de água preta escoando pela margem direita do Rio Solimões (comparar Figuras 5.8, 5.9 e 5.10).

Finalmente, a imagem-fração relativa ao componente puro nuvens indica que não há influência de nebulosidade na resposta espectral dos alvos no entorno de Coari (Figuras 5.4, 5.11 e 5.12).

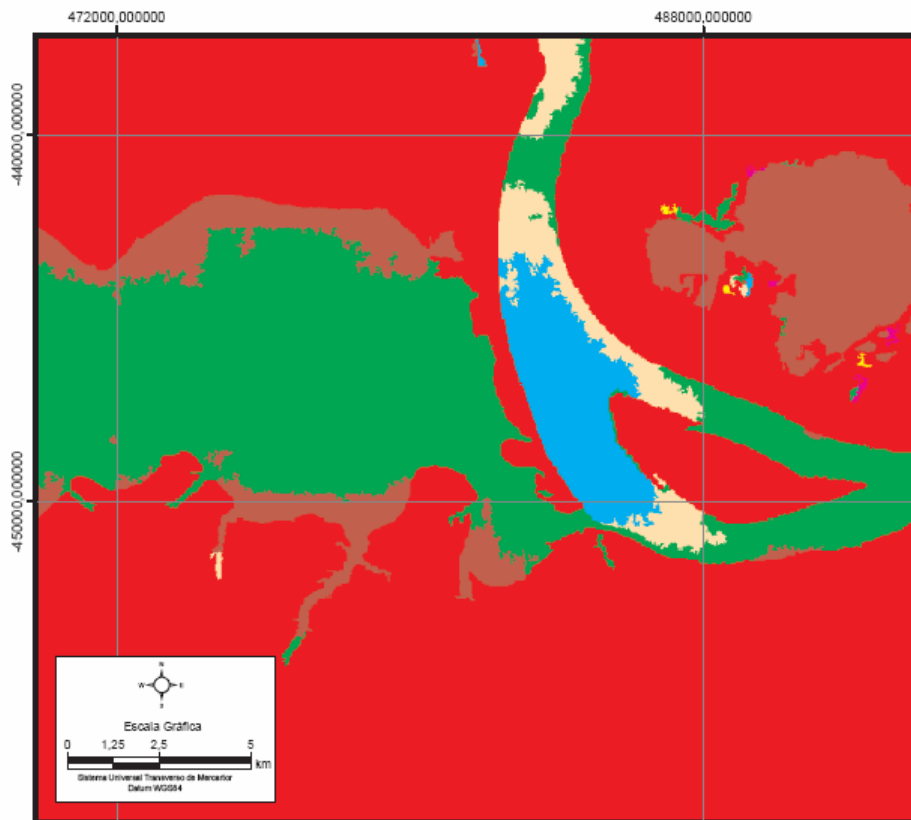


Figura 5.9 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

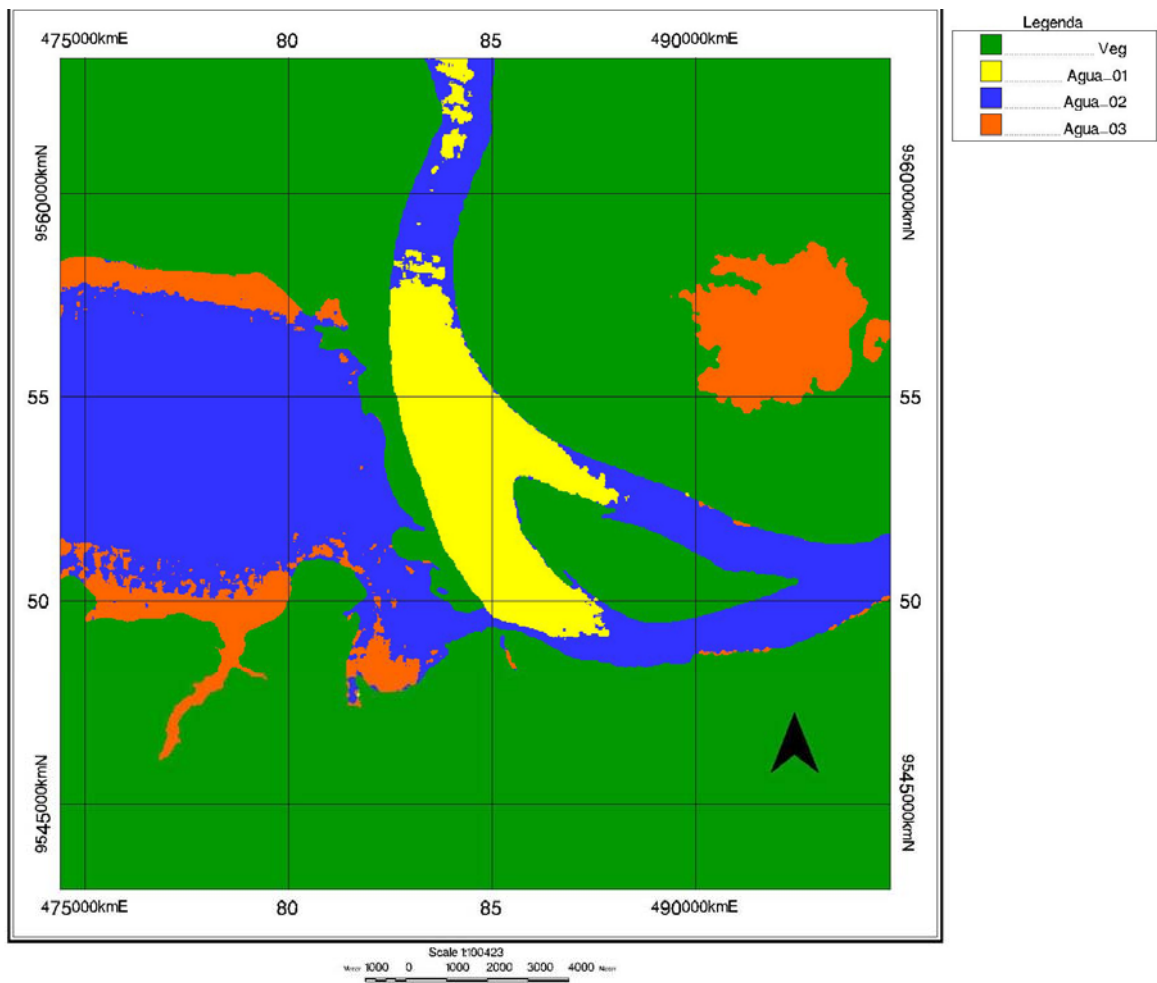


Figura 5.10 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água preta, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com a Figura 5.8.



Figura 5.11 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).



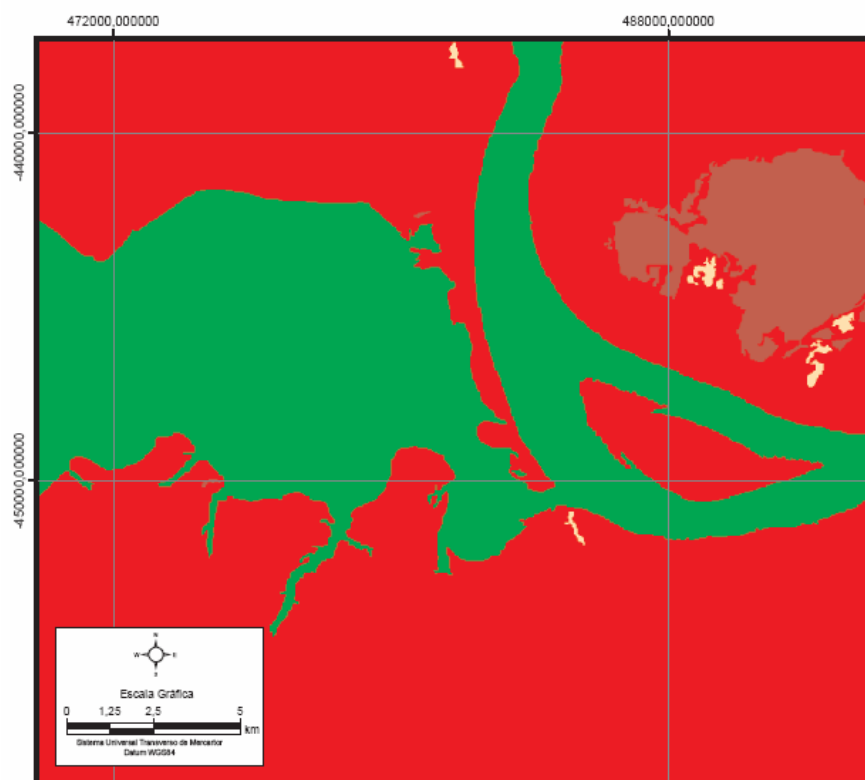


Figura 5.12 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 03/09/2007 (vazante).

## 5.2. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da seca

Nas curvas de comportamento espectral obtidas no período da seca, somente há diferença significativa entre água branca e água preta no intervalo espectral correspondente à banda 3 (Figura 5.13).

A análise das imagens-fração referentes aos componentes puros no período de seca (imagem Landsat-5 TM de 05/10/2007) indica que: a ocorrência de nuvens é expressiva em alguns trechos da cena, incluindo o Lago de Coari (Figura 5.16); tal influência se faz notar nas imagens-fração relativas à água branca e à água preta (Figuras 5.14 e 5.15, respectivamente).

O detalhe da imagem-fração nuvens (Figuras 5.23 e 5.24) nas vizinhanças de Coari evidencia a influência local de nebulosidade na resposta espectral dos corpos aquosos em superfície, o que também fica claro no produto classificado da Figura 5.24. Essa influência impõe sérias limitações à interpretação das imagens-fração dos demais componentes puros (água branca e água preta), como pode ser constatado nas Figuras 5.14 e 5.15, em escala regional, e nas Figuras 5.17 a 5.22, referentes ao detalhe de Coari.

Outra possibilidade é que a configuração apresentada na margem esquerda do Lago de Coari (Figuras 5.23 e 5.24) esteja relacionada à ocorrência de áreas emersas apenas nessa fase do ciclo hidrológico. Assim, recomenda-se a confecção de uma máscara terra-água específica para a época da seca.

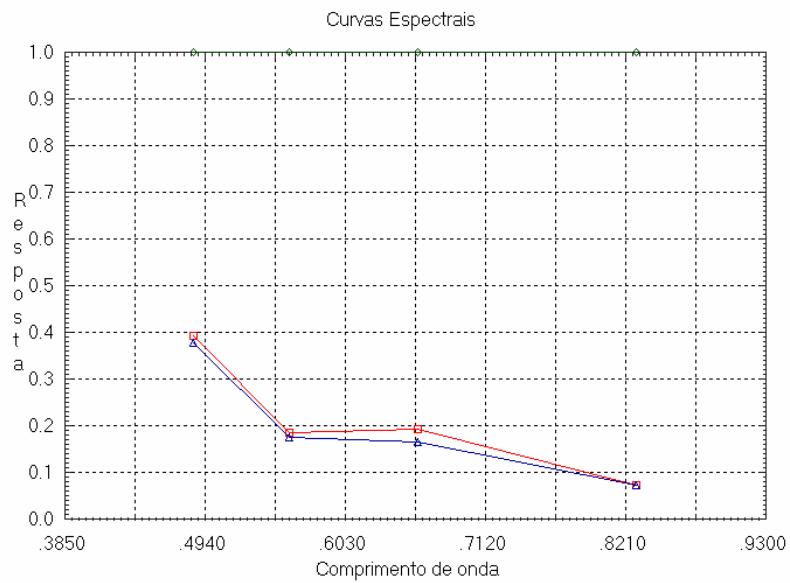


Figura 5.13 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca). A resposta é expressa como reflectância, correspondendo às bandas 1,2,3 e 4 do Landsat-5 TM. O comprimento de onda é expresso em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).

— **ÁGUA BRANCA**     
 — **ÁGUA PRETA**     
 — **NUVENS**

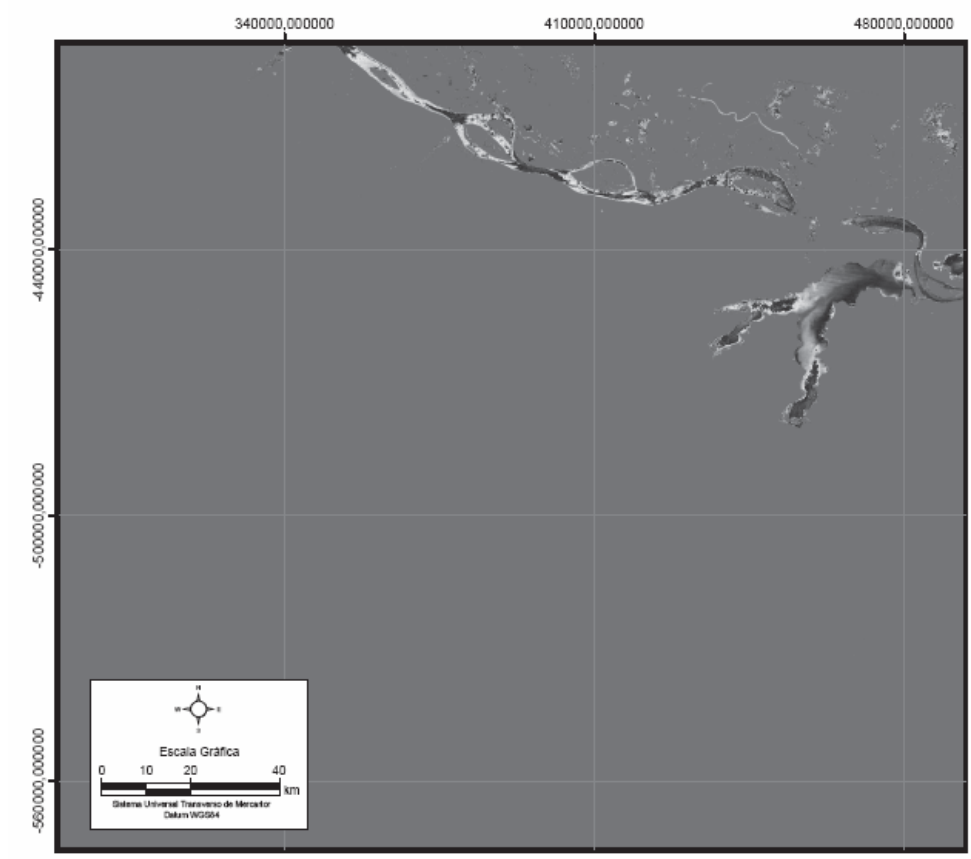


Figura 5.14 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

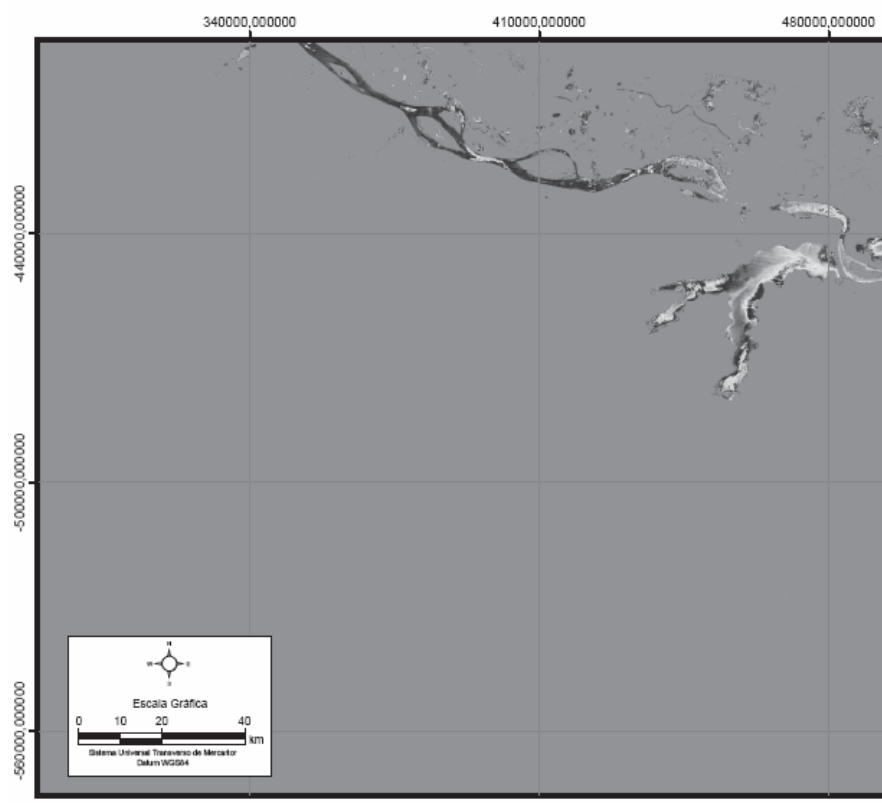


Figura 5.15 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

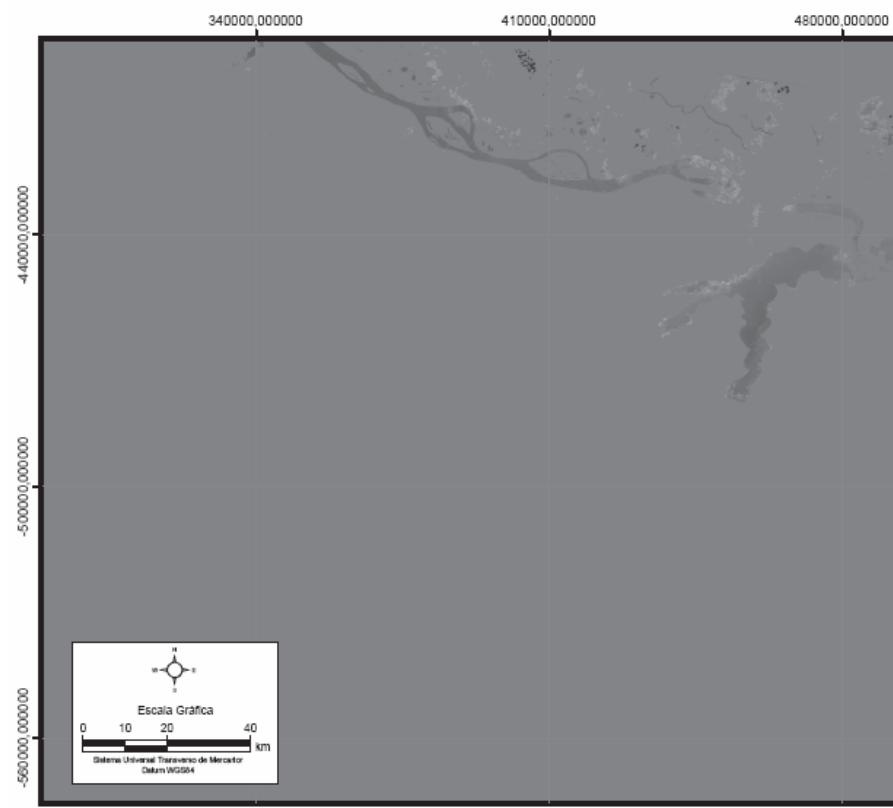


Figura 5.16 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

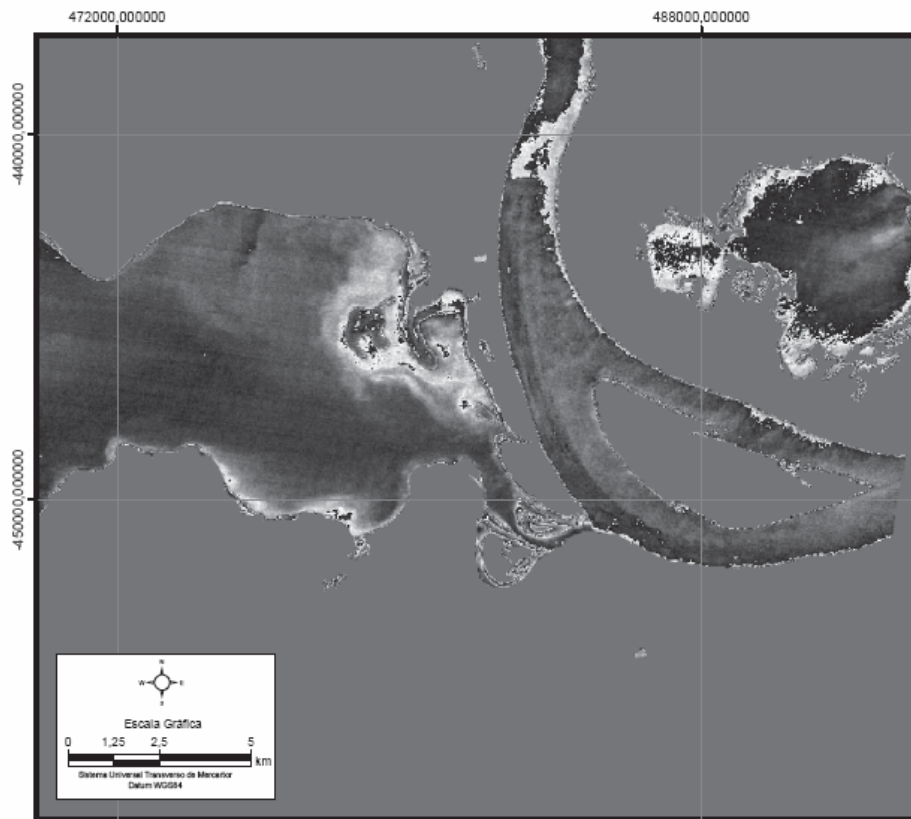


Figura 5.17 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

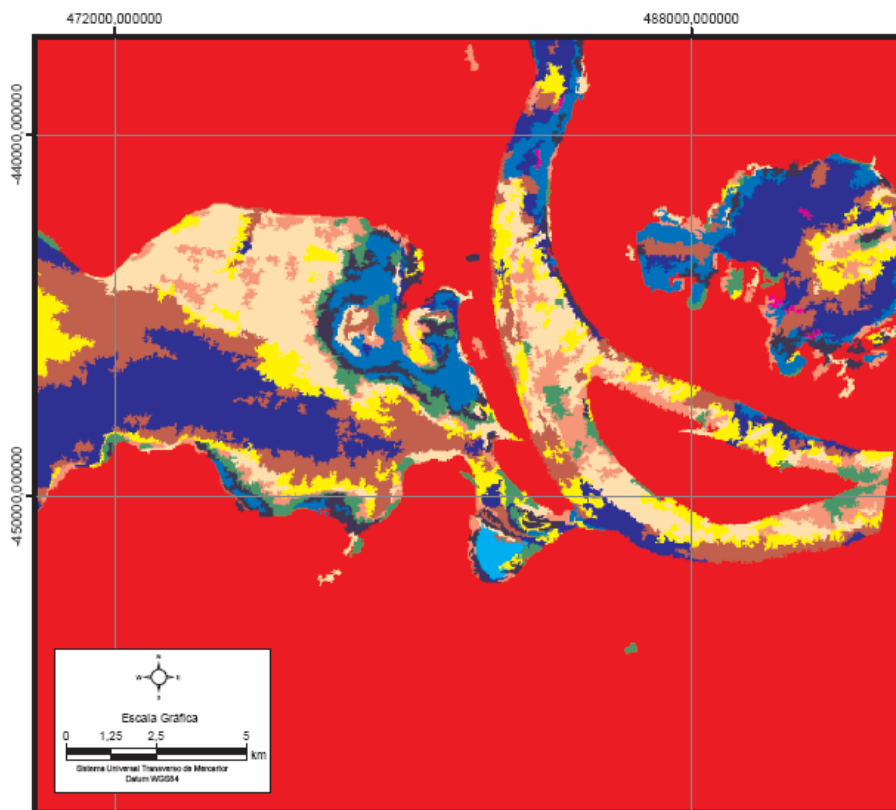


Figura 5.18 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).



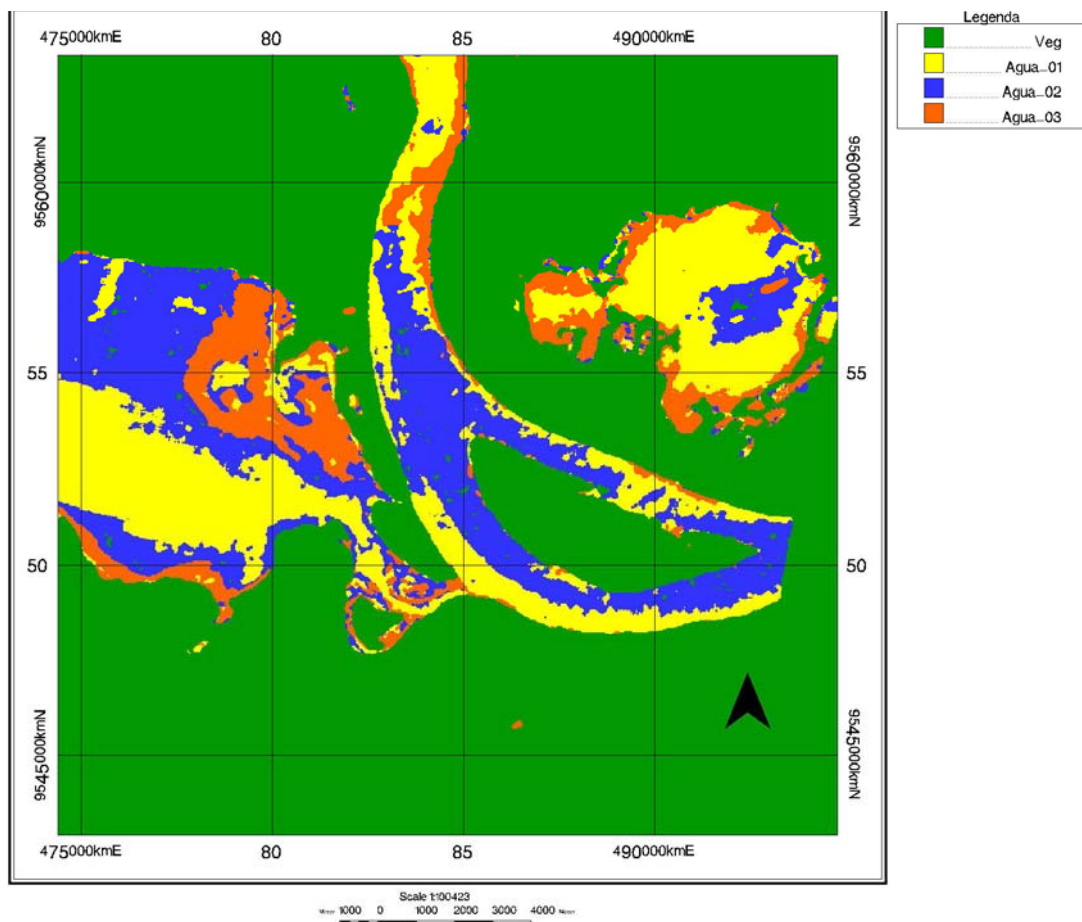


Figura 5.19 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água branca, enquanto “Água 01” apresenta menor contribuição. Comparar com a Figura 5.17.

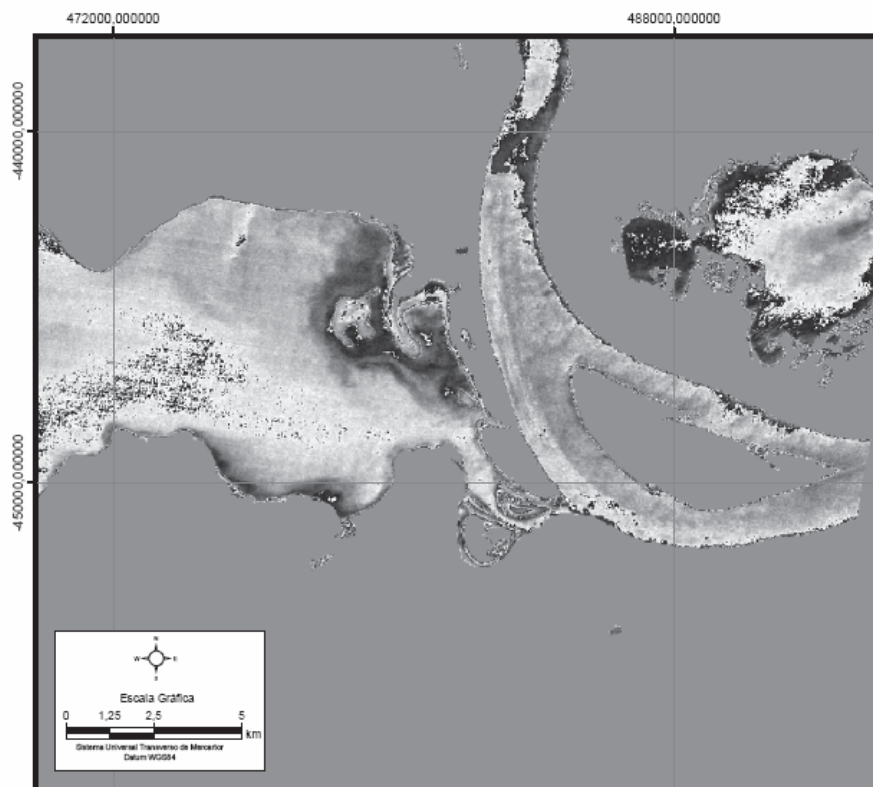


Figura 5.20 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

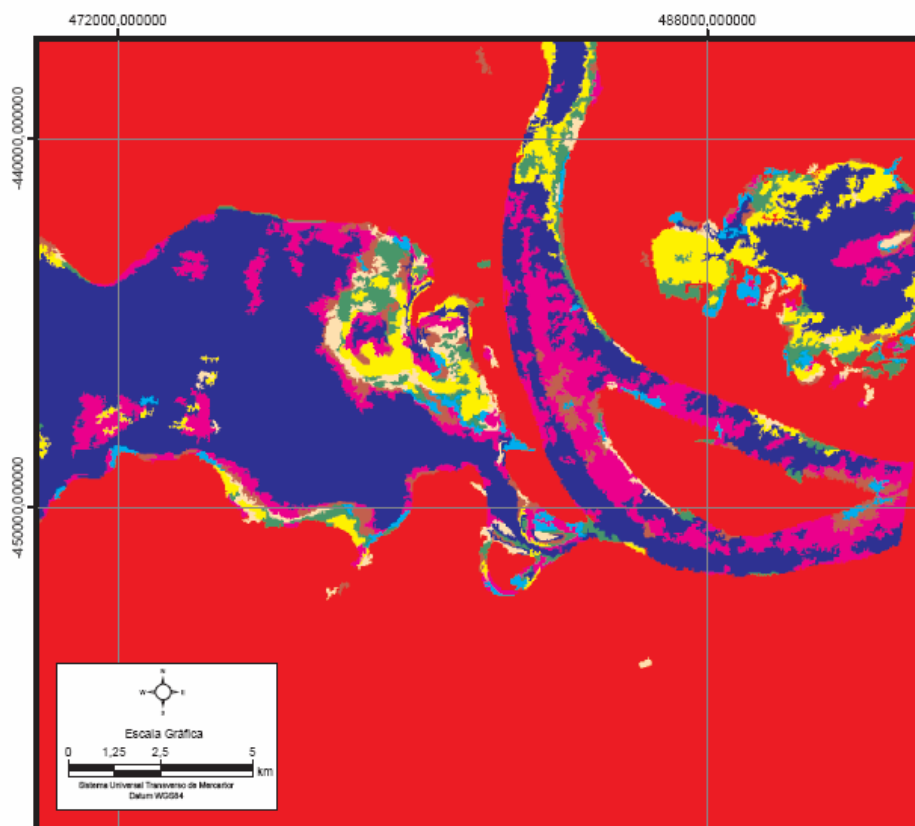


Figura 5.21 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

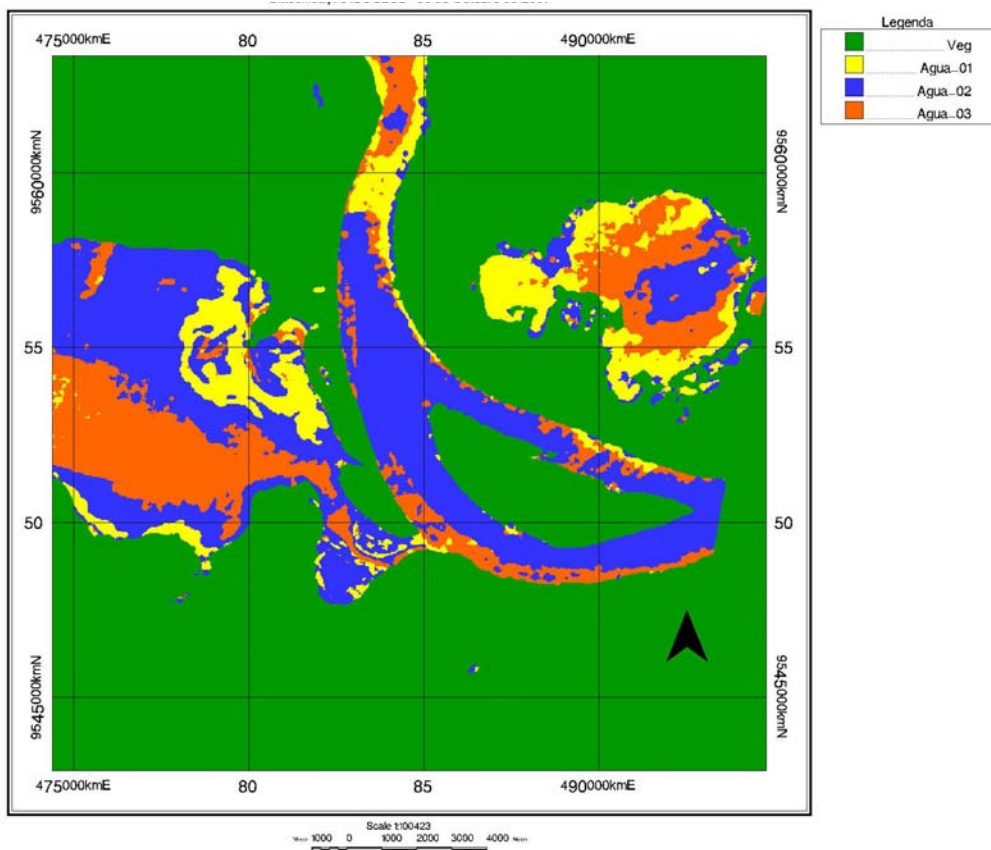


Figura 5.22 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água preta, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com a Figura 5.20.

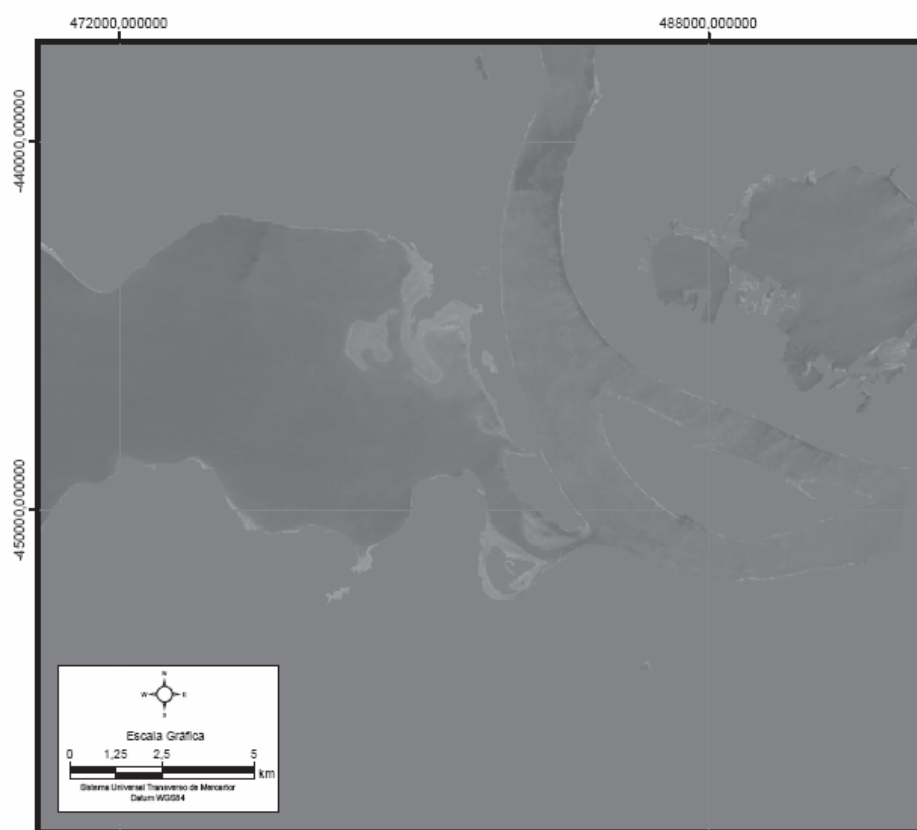


Figura 5.23 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

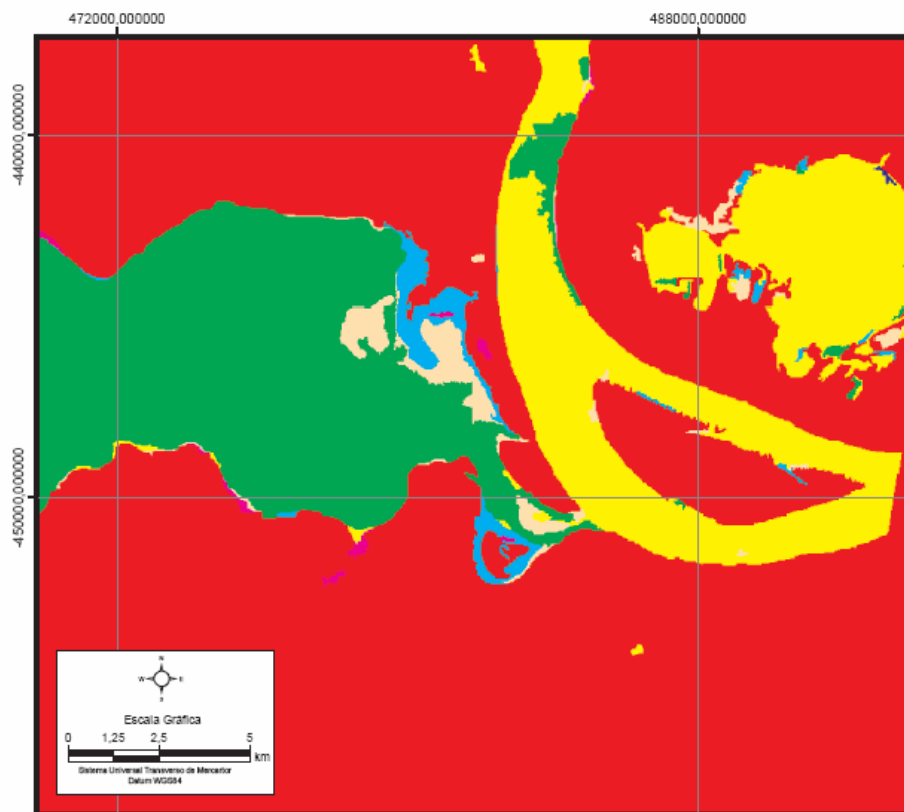


Figura 5.24 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 05/10/2007 (seca).

### 5.3. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da enchente

As curvas de comportamento espectral obtidas, na época da enchente, para os componentes puros estão apresentadas na Figura 5.25. A análise das imagens-fração referentes aos componentes puros nesse período (imagem Landsat-5 TM de 30/04/2008) indica que: água branca predomina ao longo do curso do Rio Solimões (Figura 5.26); água preta é mais abundante no Lago de Coari, além de outros lagos e tributários na planície aluvial do Rio Solimões (Figura 5.27); não ocorrem nuvens de maneira expressiva no Rio Solimões e no Lago de Coari (Figura 5.28).

O detalhe da imagem-fração água branca nas vizinhanças de Coari (Figura 5.29) indica uma distribuição relativamente homogênea desse componente puro no trecho do Rio Solimões situado entre o Terminal de Coari e a cidade do mesmo nome. Tal comportamento também pode ser observado nas imagens classificadas das Figuras 5.30 e 5.31.

Na imagem-fração água preta (Figura 5.27), verifica-se a predominância desse componente puro no Lago de Coari. O fluxo de água preta proveniente do citado lago no Rio Solimões é ainda mais limitado que na época da vazante (Figuras 5.32, 5.33 e 5.34). Por outro lado, a imagem-fração relativa ao componente puro nuvens indica que não há influência de nebulosidade na resposta espectral dos alvos no entorno de Coari (Figuras 5.28, 5.35 e 5.36).

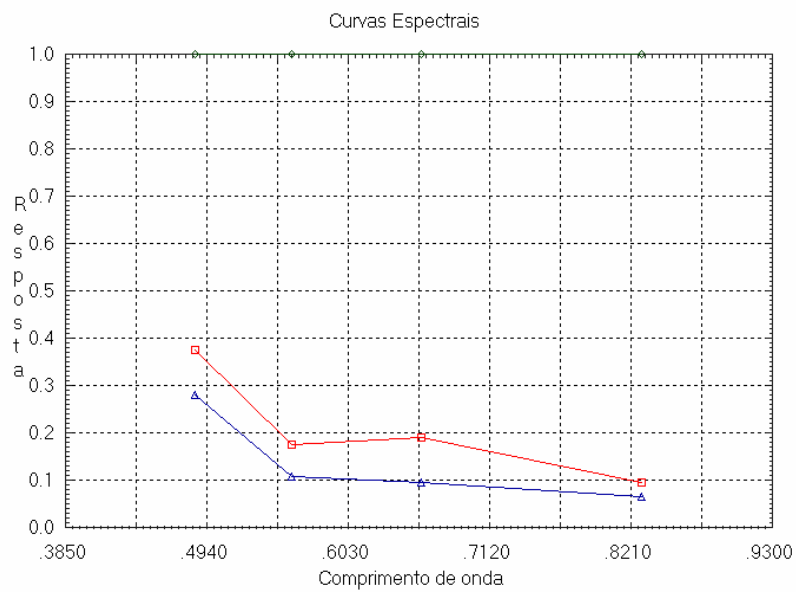


Figura 5.25 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente). A resposta é expressa como reflectância, correspondendo às bandas 1,2,3 e 4 do Landsat-5 TM. O comprimento de onda é expresso em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).

— **ÁGUA BRANCA**     
 — **ÁGUA PRETA**     
 — **NUVENS**



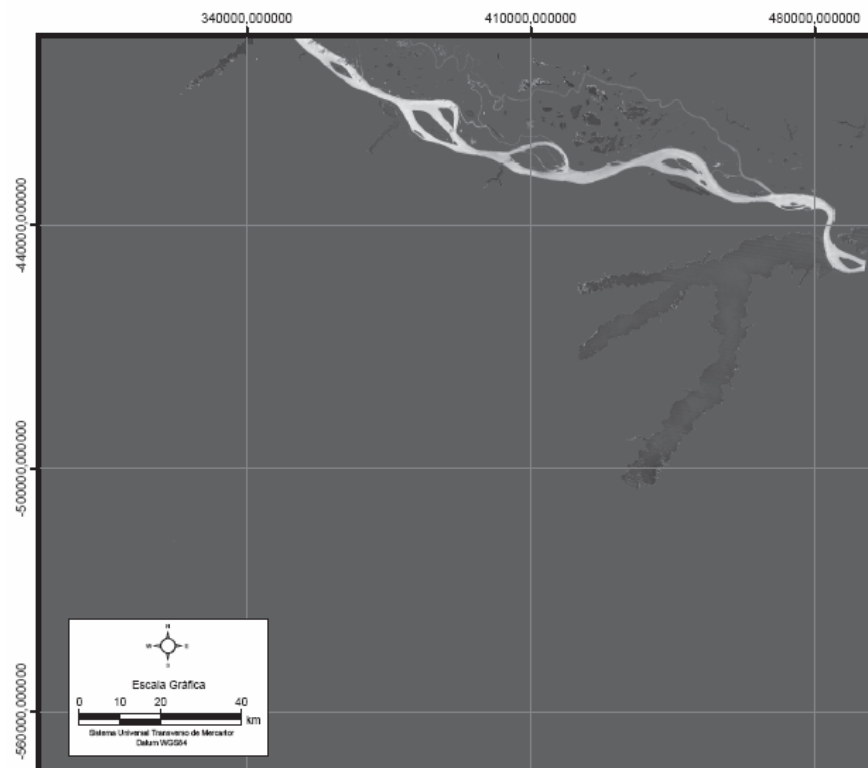


Figura 5.26 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

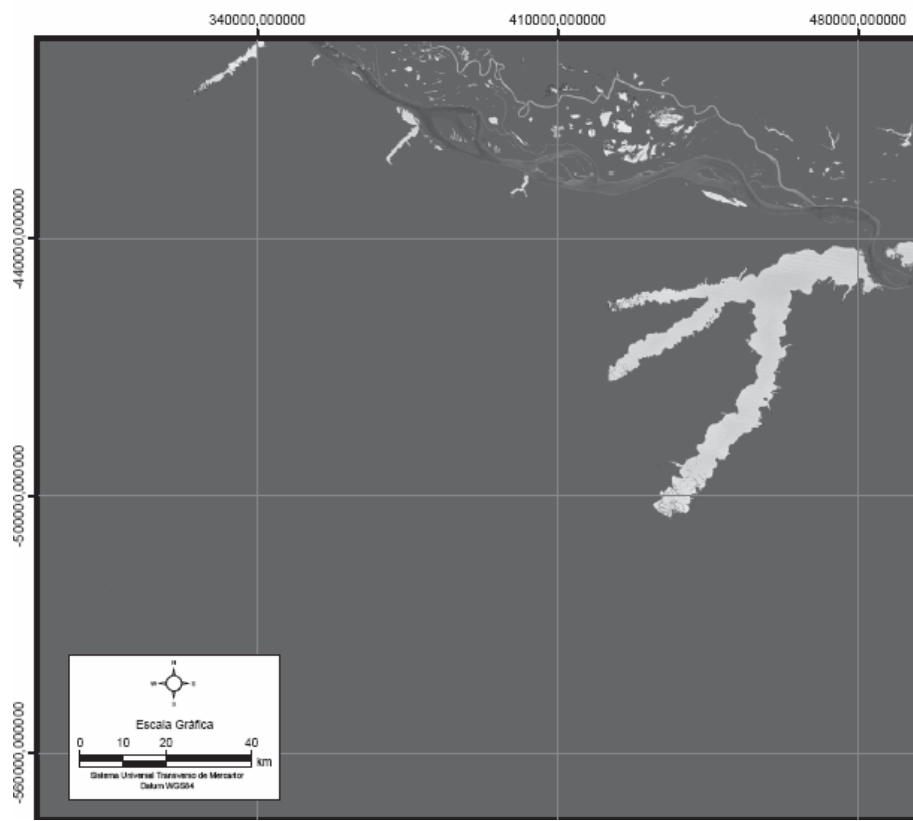


Figura 5.27 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

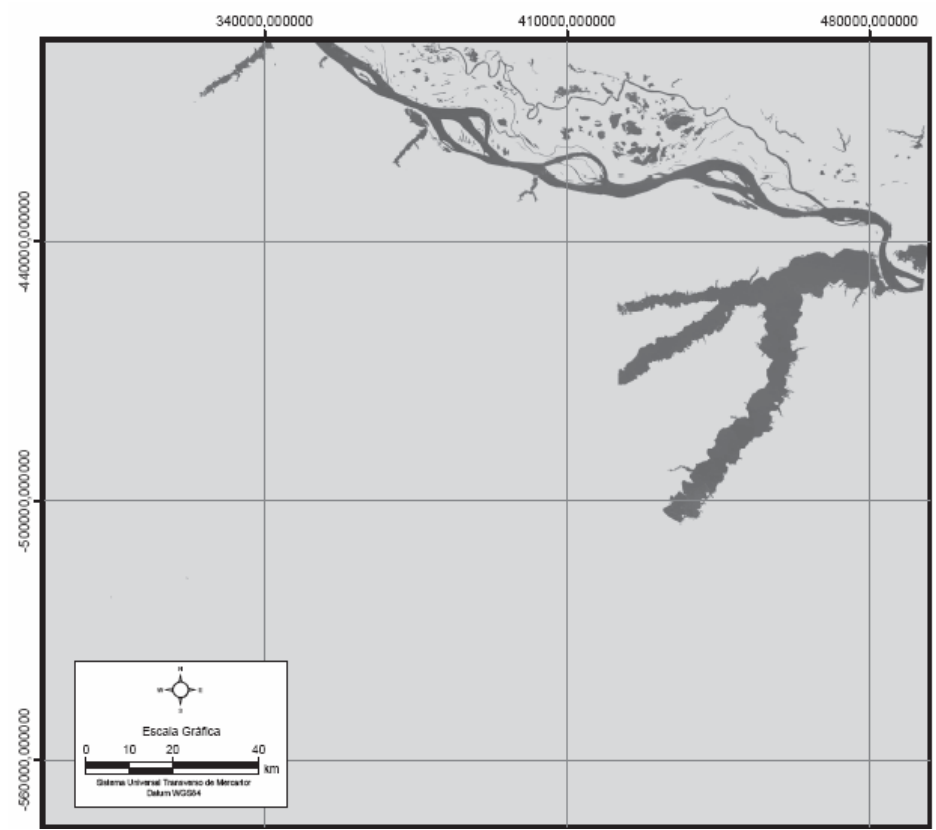


Figura 5.28 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

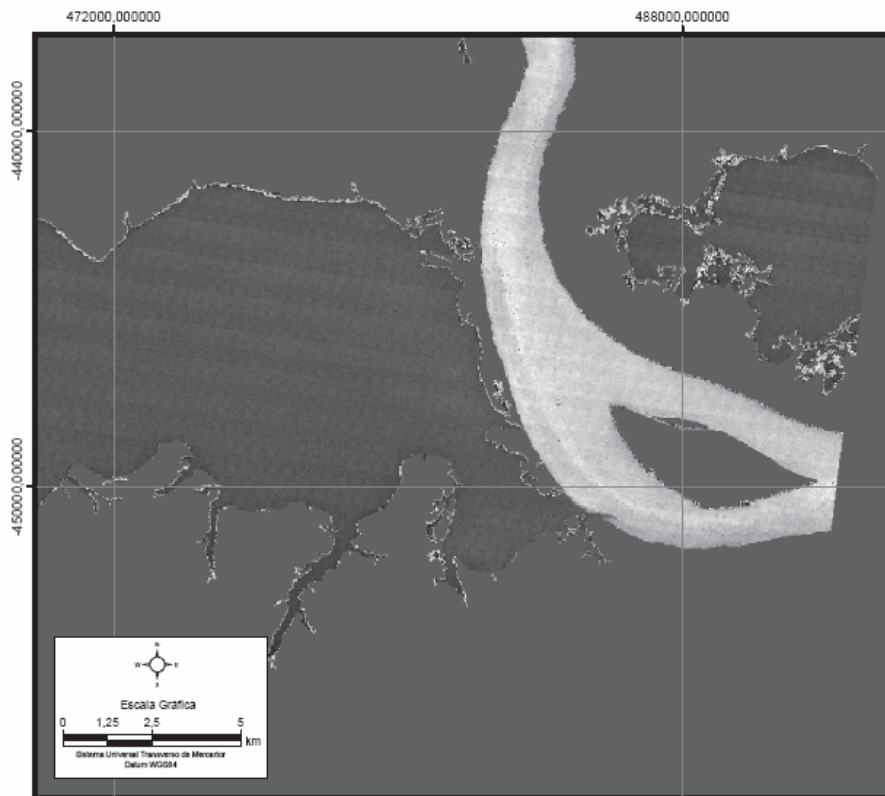


Figura 5.29 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

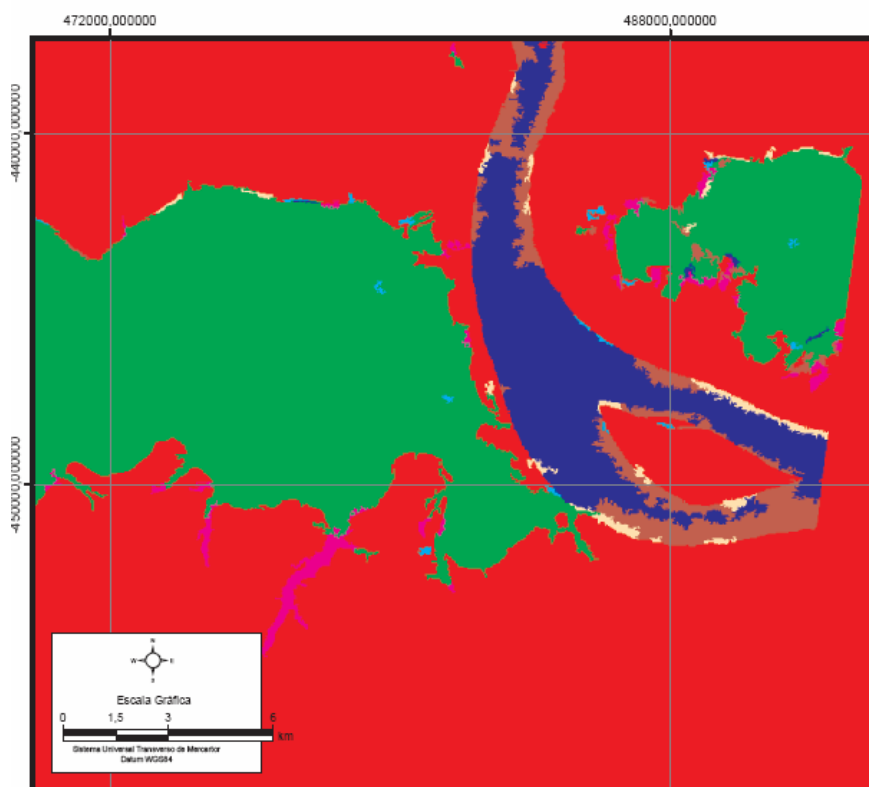


Figura 5.30 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

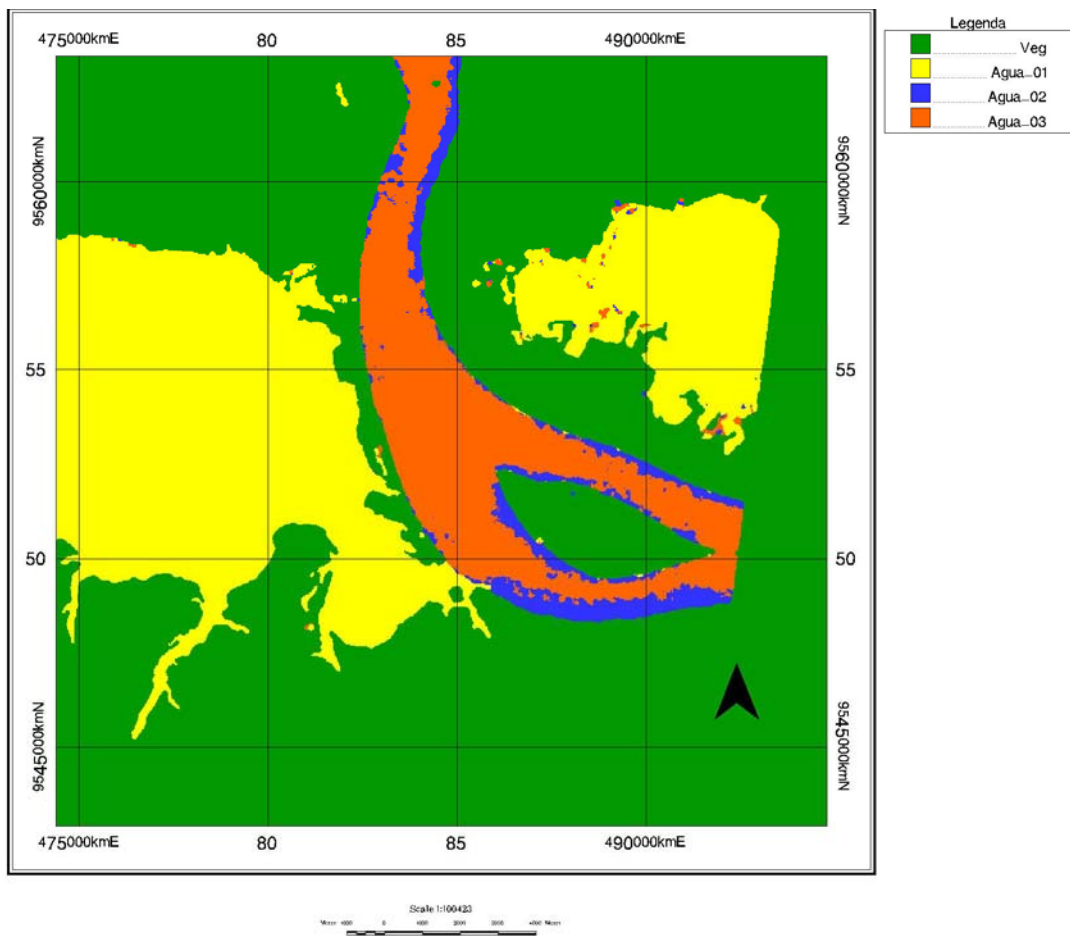


Figura 5.31 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água branca, enquanto “Água 01” apresenta menor contribuição. Comparar com a Figura 5.29.

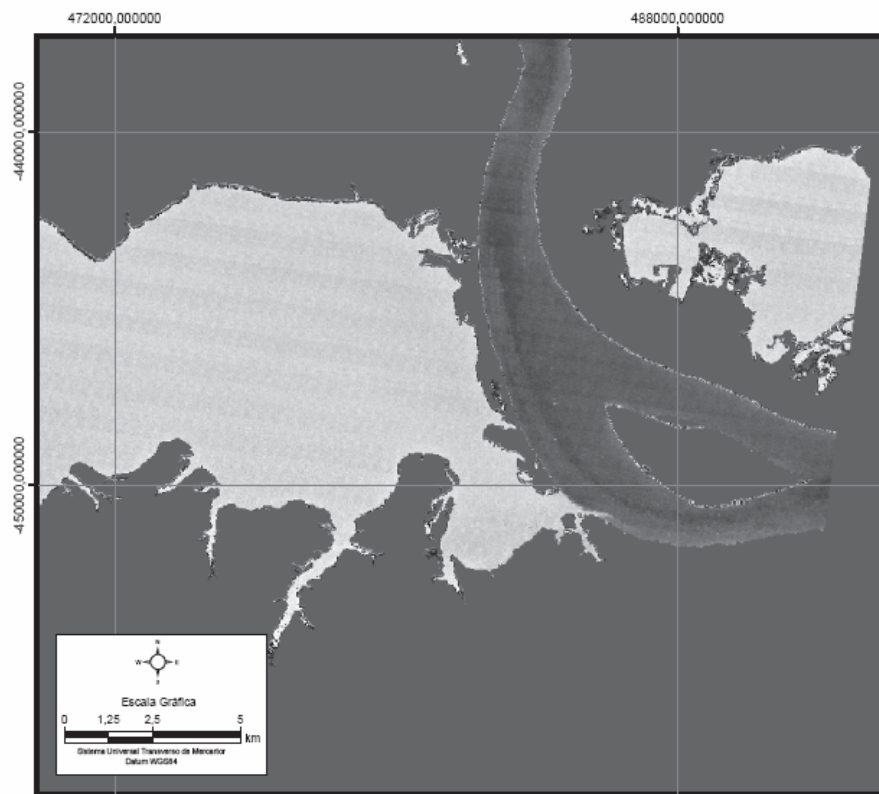


Figura 5.32 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

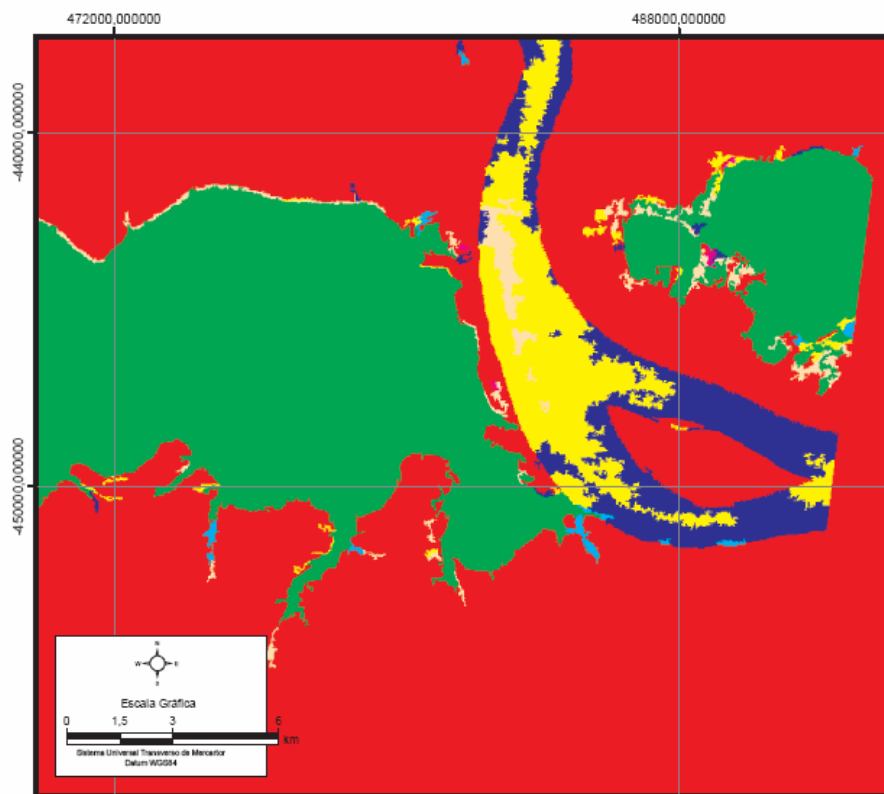


Figura 5.33 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).



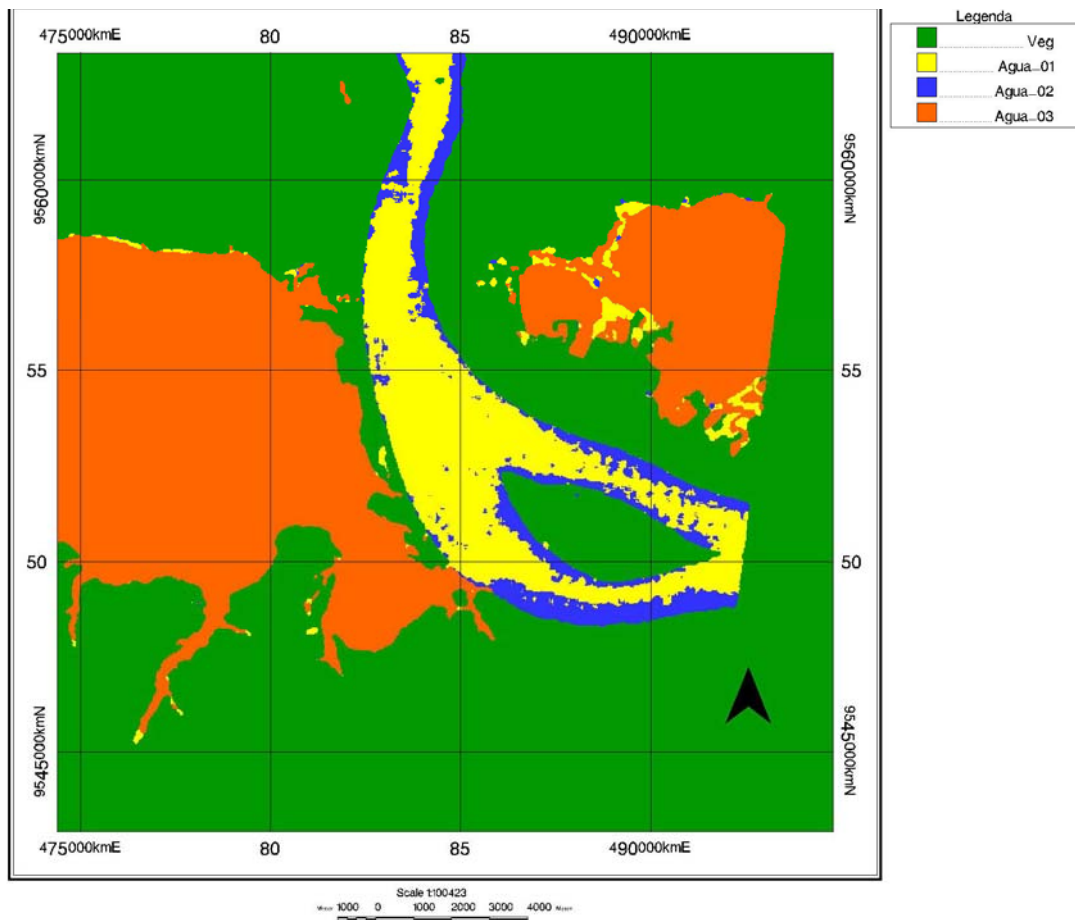


Figura 5.34 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água preta, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com a Figura 5.32.

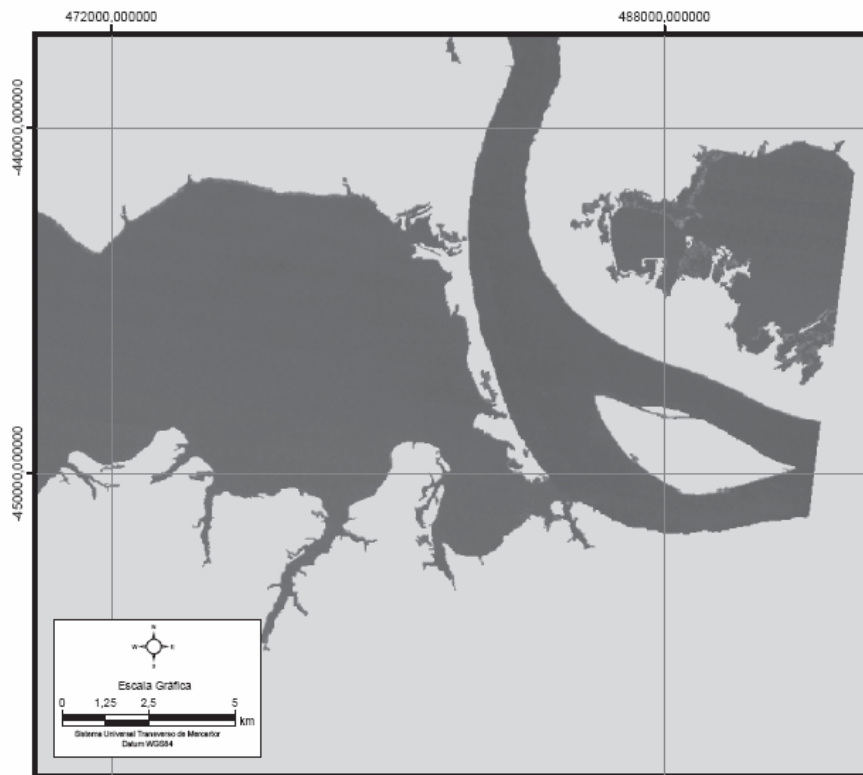


Figura 5.35 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

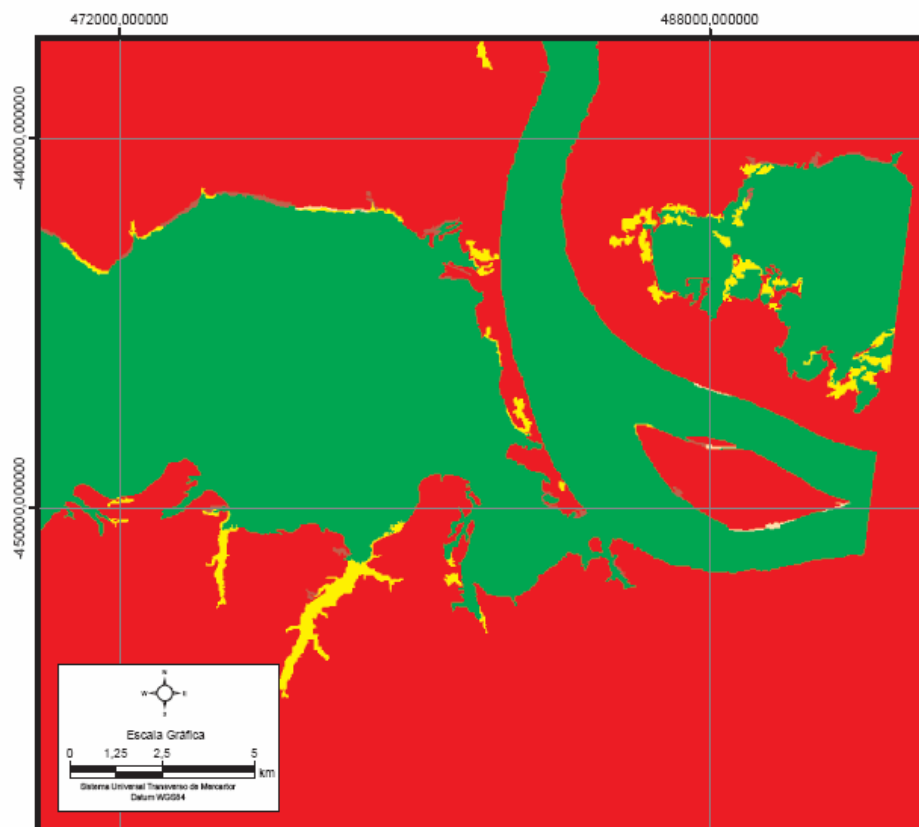


Figura 5.36 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 30/04/2008 (enchente).

#### 5.4. Classificação não-supervisionada ISOSEG e Isodata aplicada às imagens-fração água branca e água preta das imagens Landsat-5 TM referentes ao período da cheia

As curvas de comportamento espectral obtidas, na época da cheia, para os componentes puros estão apresentadas na Figura 5.37. A análise das imagens-fração referentes aos componentes puros no período de cheia (imagem Landsat-5 TM de 09/06/2005) indica que: água branca predomina ao longo do curso do Rio Solimões (Figura 5.38); água preta é mais abundante no Lago de Coari, além de outros lagos e tributários na planície aluvial do Rio Solimões (Figura 5.39); nuvens ocorrem de maneira restrita no Rio Solimões, nas proximidades de sua confluência com o Lago de Coari (Figura 5.40).

O detalhe da imagem-fração água branca nas vizinhanças de Coari (Figura 5.41) indica uma distribuição relativamente homogênea desse componente puro no trecho do Rio Solimões situado entre o Terminal de Coari e a cidade do mesmo nome. Tal resultado é exibido com clareza através da classificação ISOSEG e Isodata (Figuras 5.42 e 5.43, respectivamente). As regiões em tons escuros ao longo do Rio Solimões (Figura 5.41) correspondem a nuvens localizadas e suas respectivas sombras.

Na imagem-fração água preta (Figura 5.39), verifica-se a predominância desse componente puro no Lago de Coari, o que é corroborado pelo resultado das classificações ISOSEG (Figura 5.45) e Isodata (Figura 5.46). As regiões em tons claros ao longo do Rio Solimões (Figura 5.44) representam a sombra das nuvens, visto que seu comportamento espectral é similar ao da água preta. Pode-se constatar, nas Figuras 5.44, 5.45 e 5.46, a menor contribuição de fluxos de água preta, provenientes do Lago de Coari, no Rio Solimões, durante a época da cheia. Finalmente, a imagem-fração relativa ao componente puro nuvens indica a presença restrita de nebulosidade (áreas com tonalidade muito clara na Figura 5.40) ao longo do Rio Solimões (ver também Figuras 5.47 e 5.48).

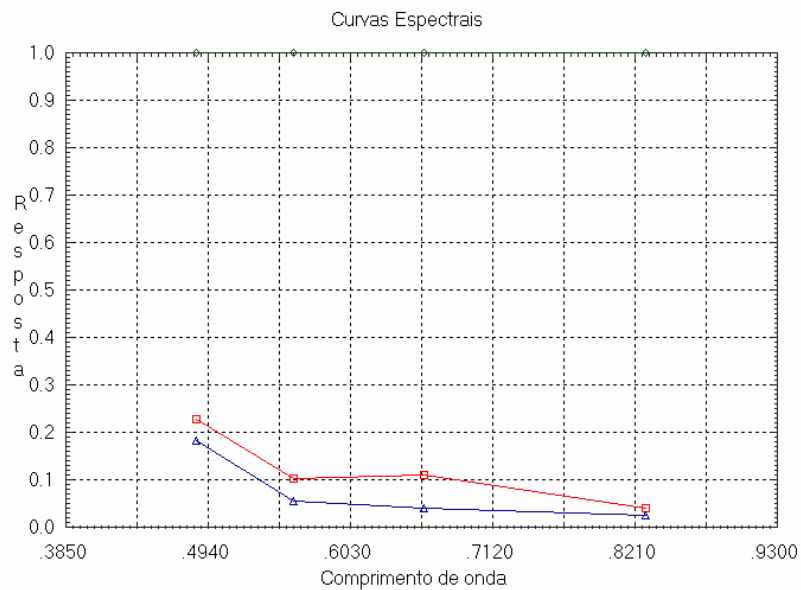


Figura 5.37 - Curvas de comportamento espectral obtidas para os componentes puros água branca, água preta e nuvens, imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia). A resposta é expressa como reflectância, correspondendo às bandas 1,2,3 e 4 do Landsat-5 TM. O comprimento de onda é expresso em micrometros ( $\mu\text{m}$ ).

**— ÁGUA BRANCA      — ÁGUA PRETA      — NUVENS**

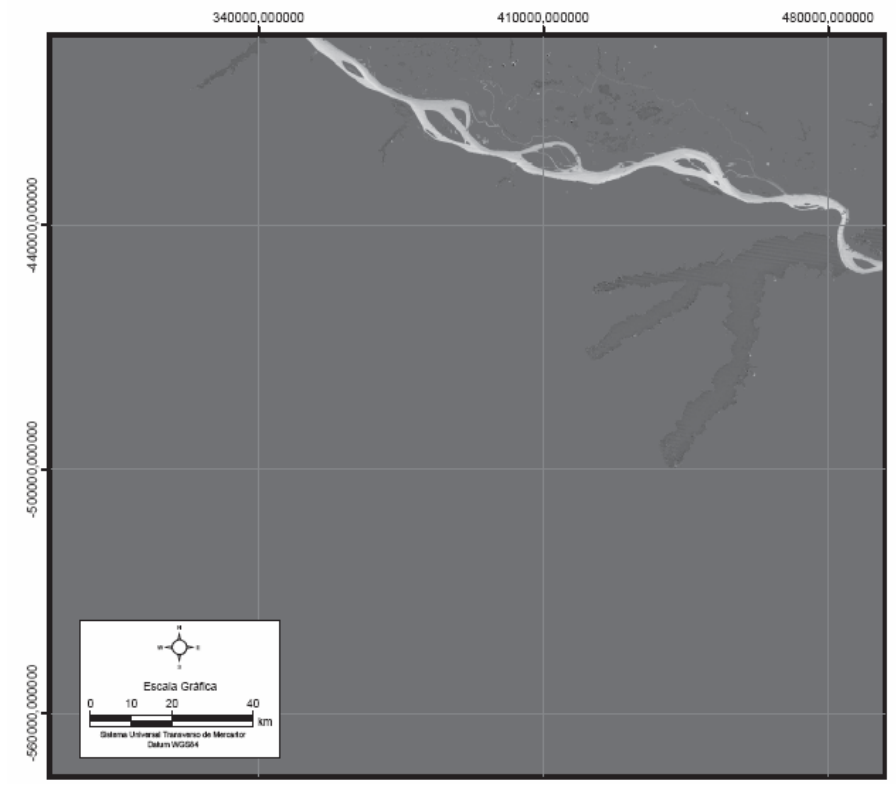


Figura 5.38 - Imagem-fração do componente puro água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

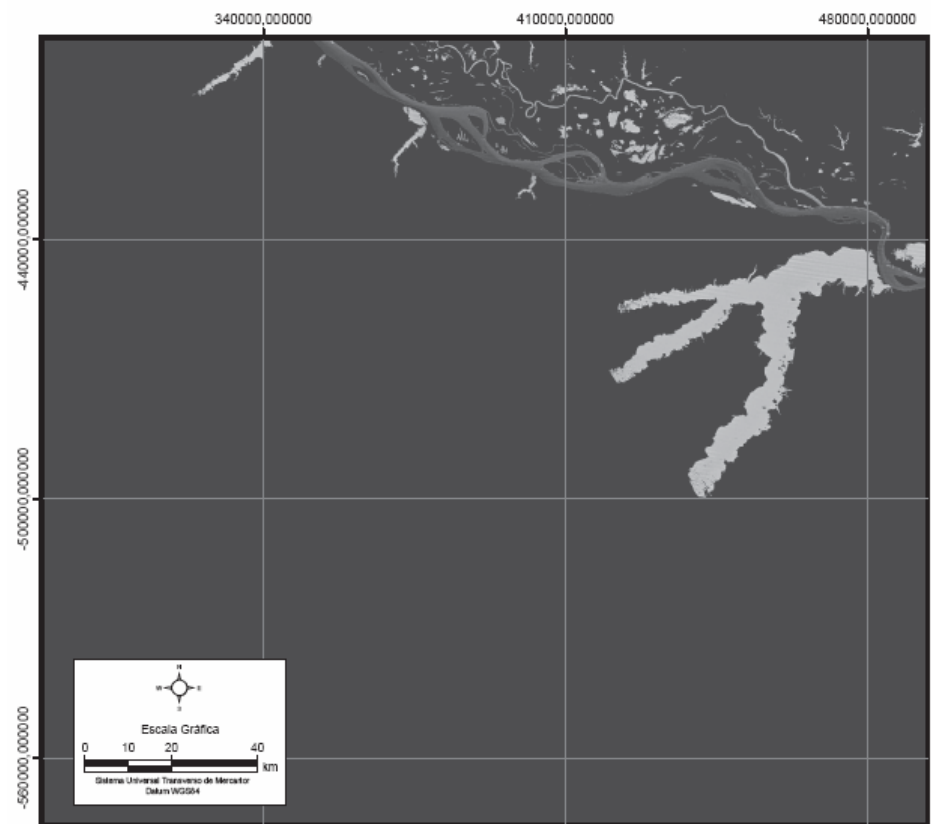


Figura 5.39 - Imagem-fração do componente puro água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

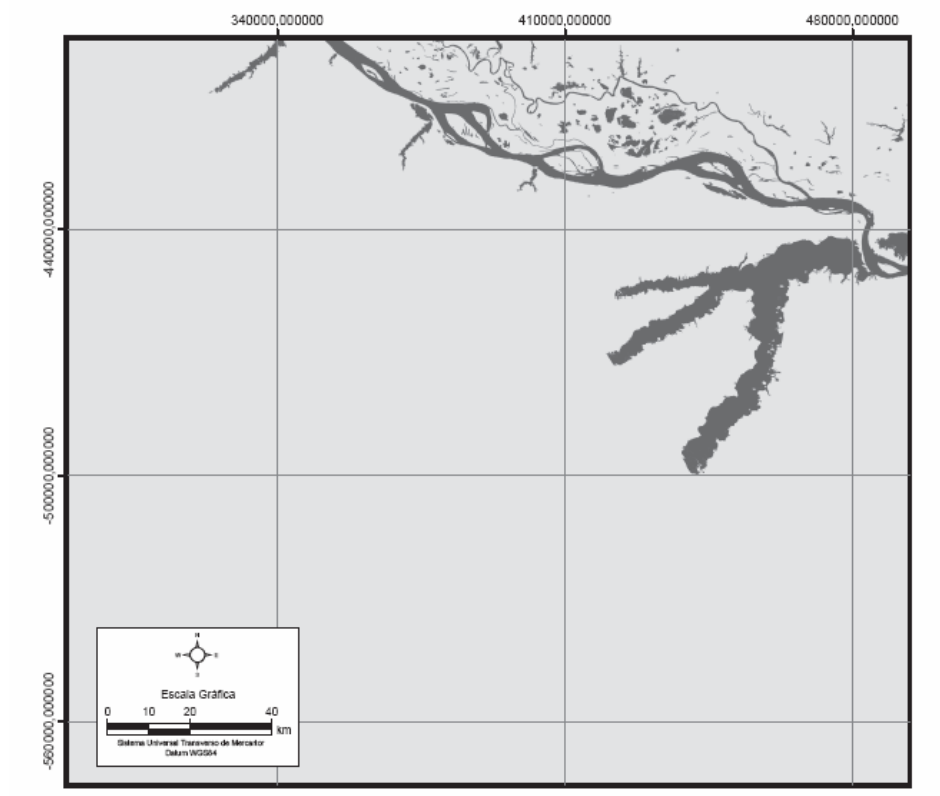


Figura 5.40 - Imagem-fração do componente puro nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

Os resultados até aqui descritos permitiram mapear, nas diferentes fases do ciclo hidrológico (Figura 2.2), fluxos de água preta originária do Lago de Coari no interior do Rio Solimões. Tal fluxo é mais expressivo no período da vazante (imagem Landsat-5 TM de 03/09/2007), diminuindo em intensidade na enchente (imagem Landsat-5 TM de 30/04/2008) e na cheia (imagem Landsat-5 TM de 09/06/2005). A presença de nuvens (ou então de áreas emersas no interior do Lago de Coari) impõe sérias limitações à interpretação das imagens-fração de água branca e água preta na época da seca (imagem Landsat-5 TM de 05/10/2007).



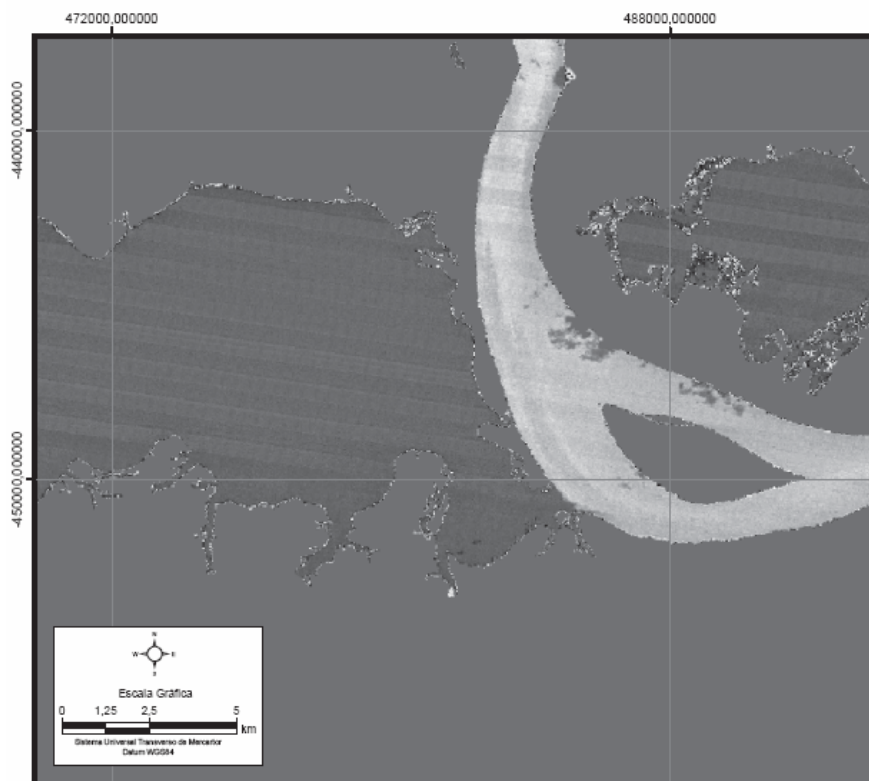


Figura 5.41 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

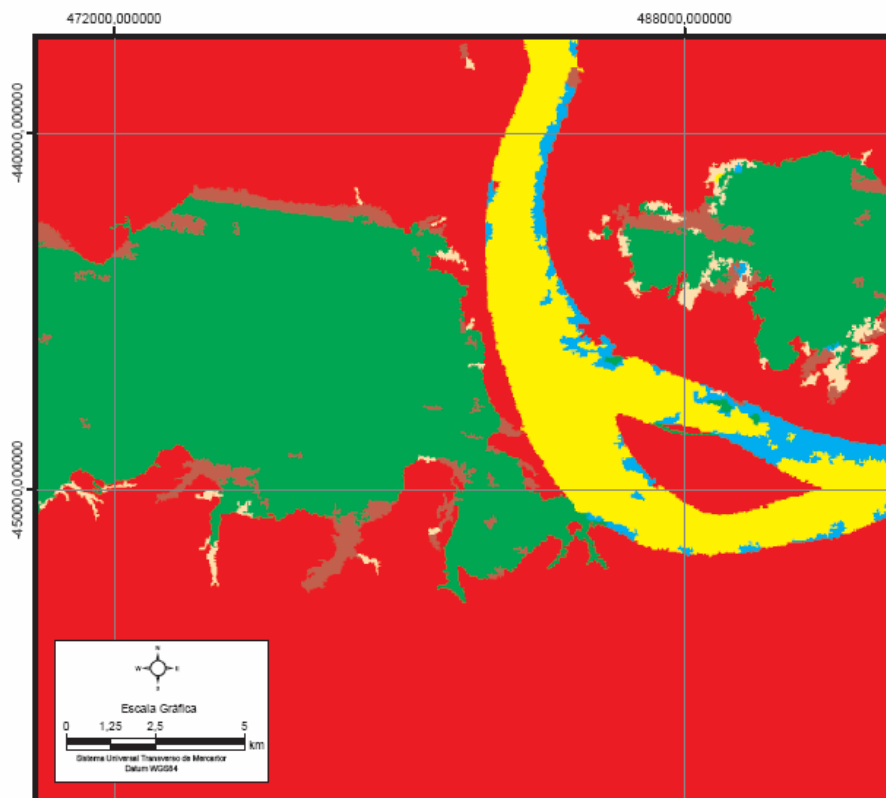


Figura 5.42 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

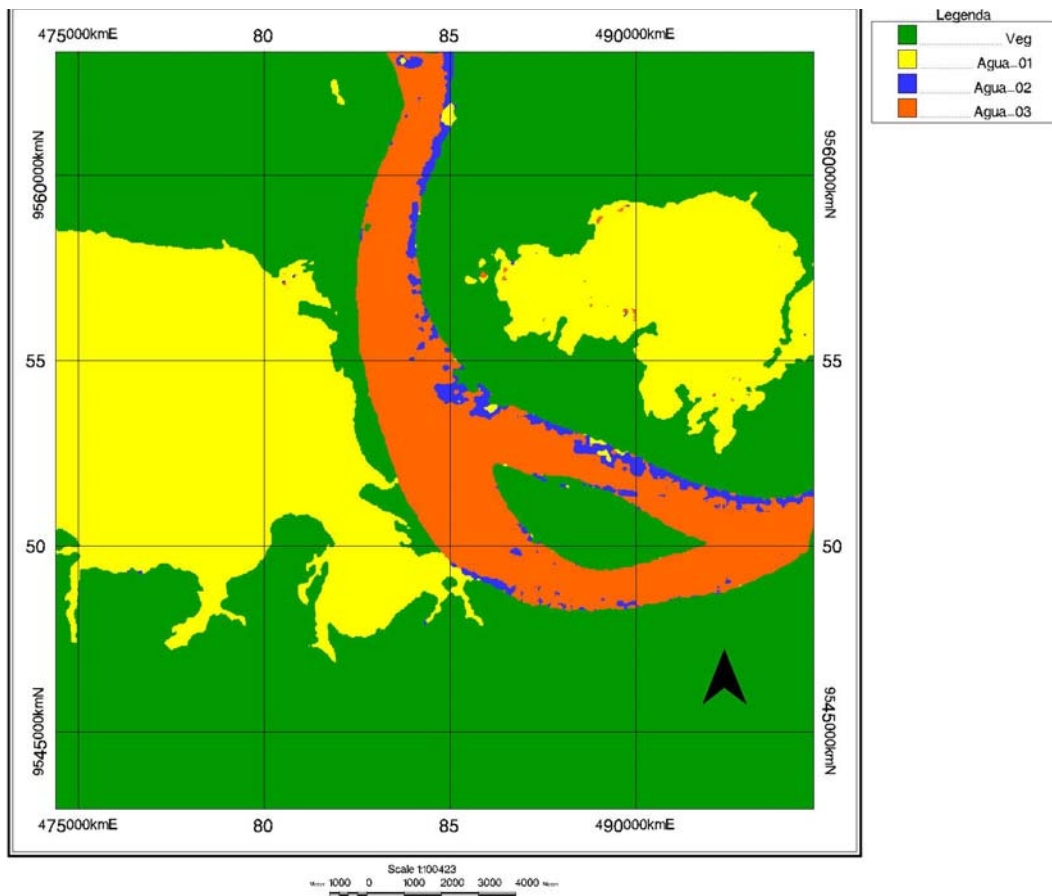


Figura 5.43 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água branca; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água branca, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com a Figura 5.41.

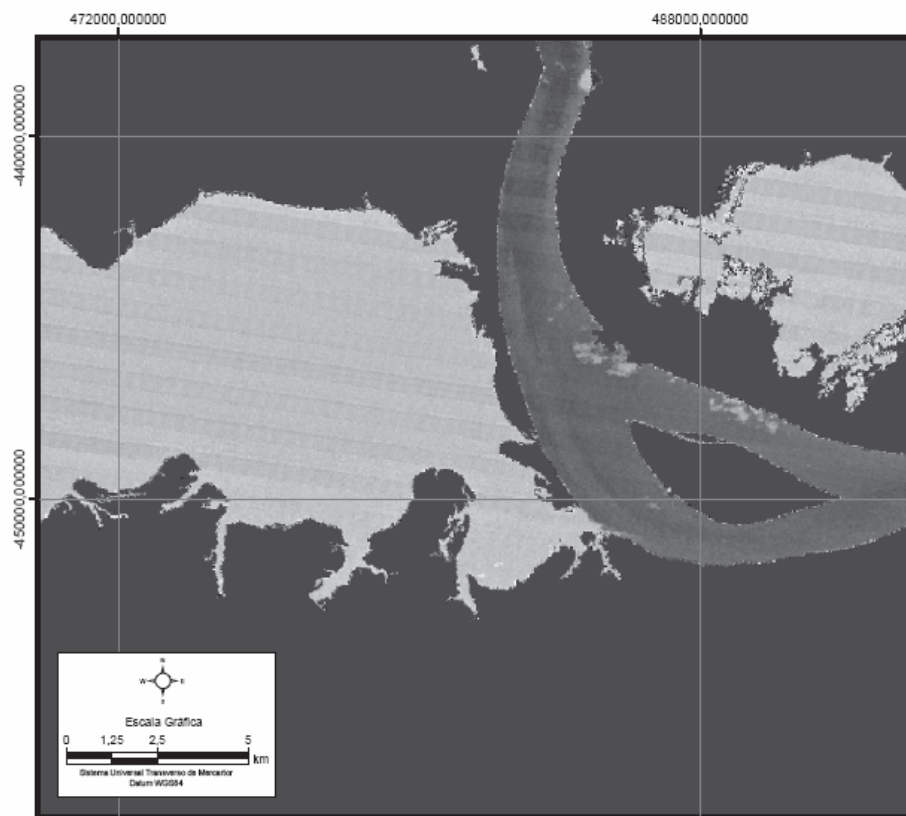


Figura 5.44 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia). Verifica-se claramente a influência de ruídos no produto final (na forma de faixas sub-paralelas).

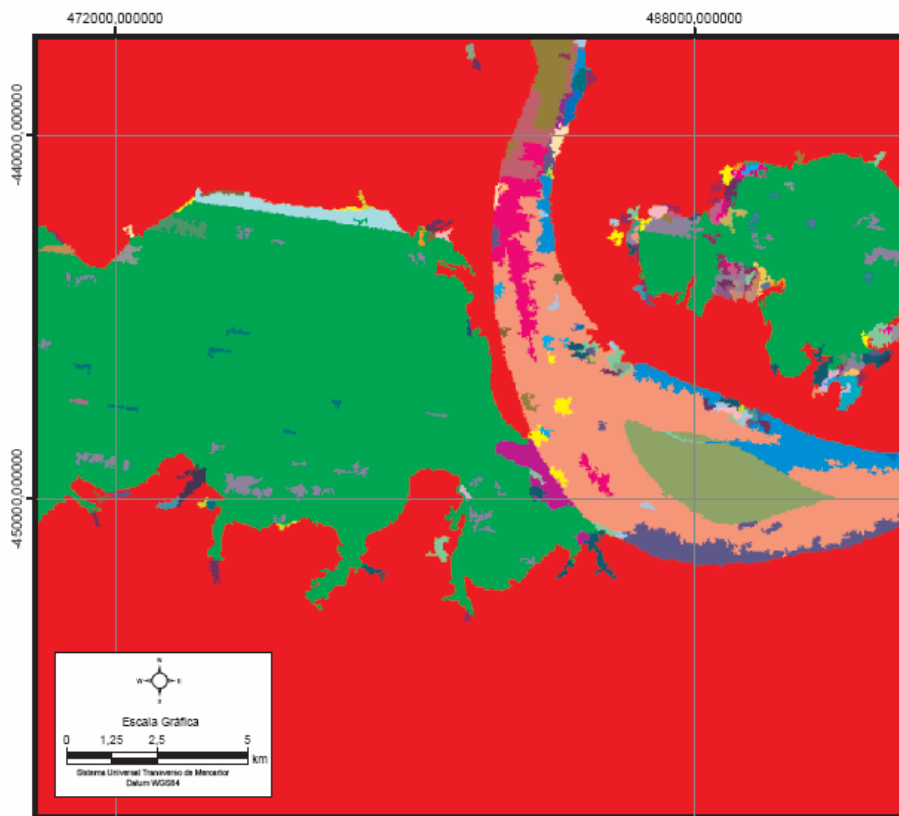


Figura 5.45 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

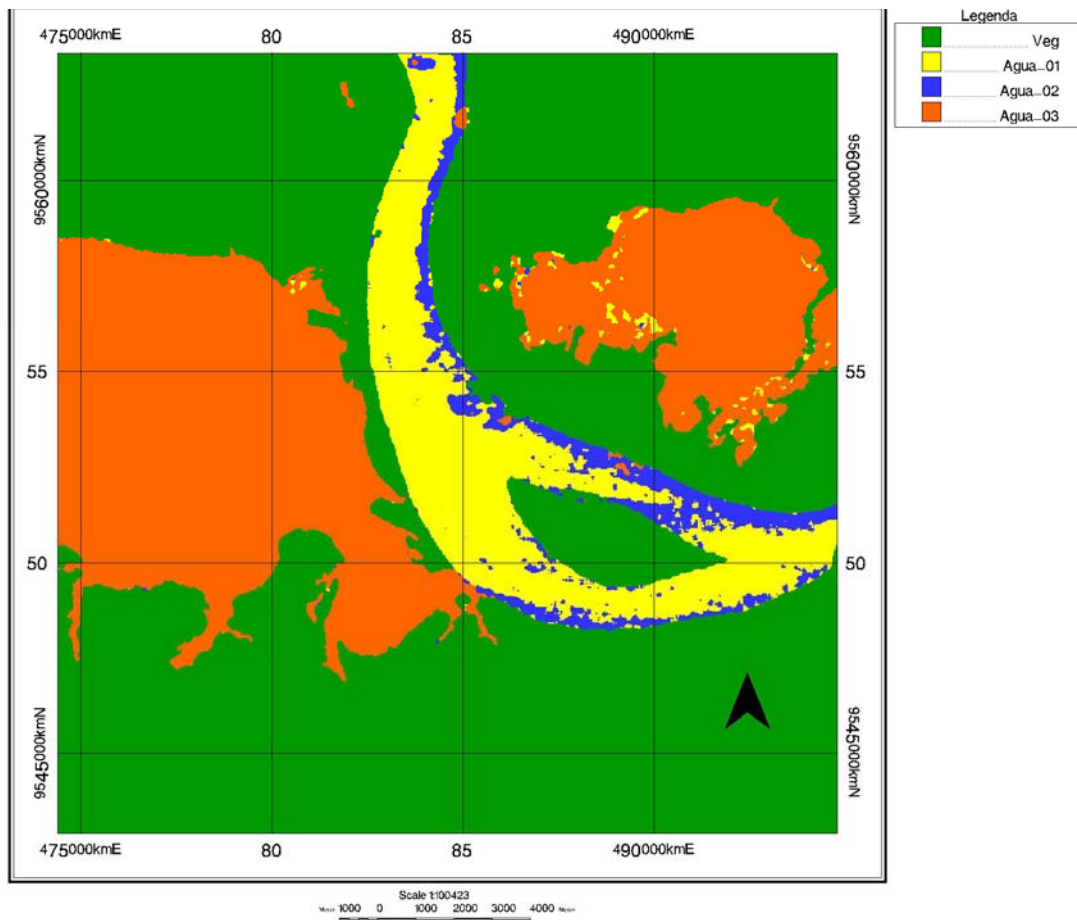


Figura 5.46 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada Isodata aplicada à imagem-fração água preta; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia). A classe “Água 03” apresenta maior contribuição do componente puro água preta, enquanto “Água 01” apresenta a menor contribuição. Comparar com Figura 5.44.

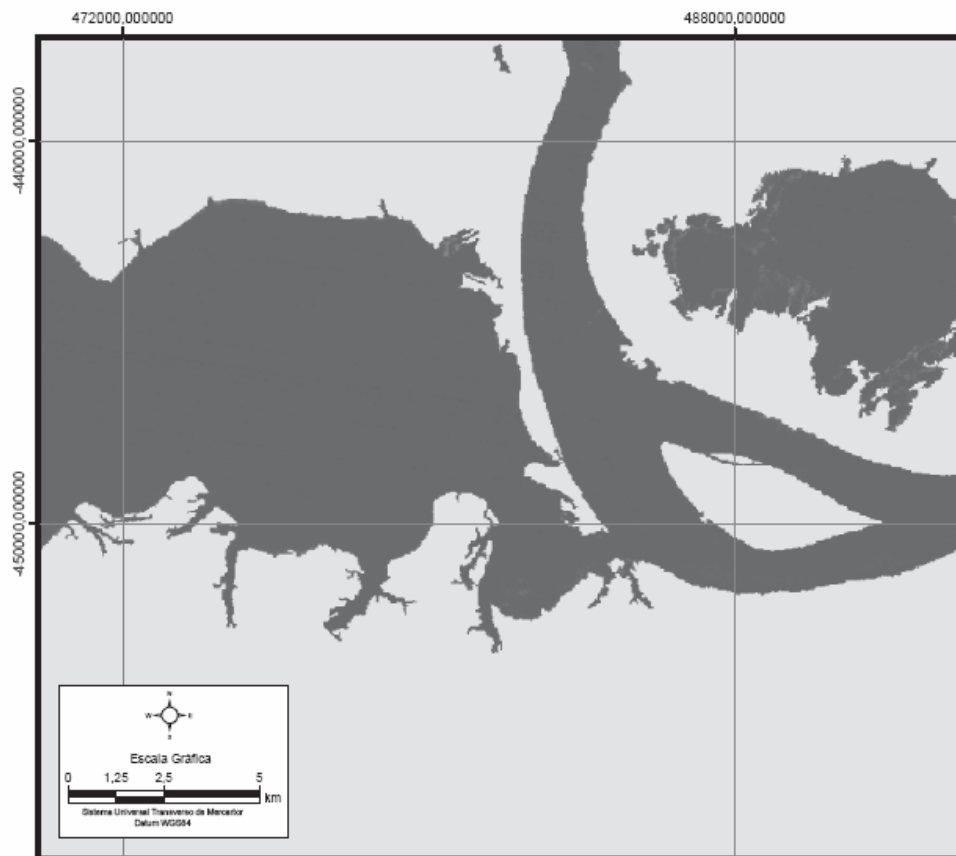


Figura 5.47 - Detalhe na área de Coari para a imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).

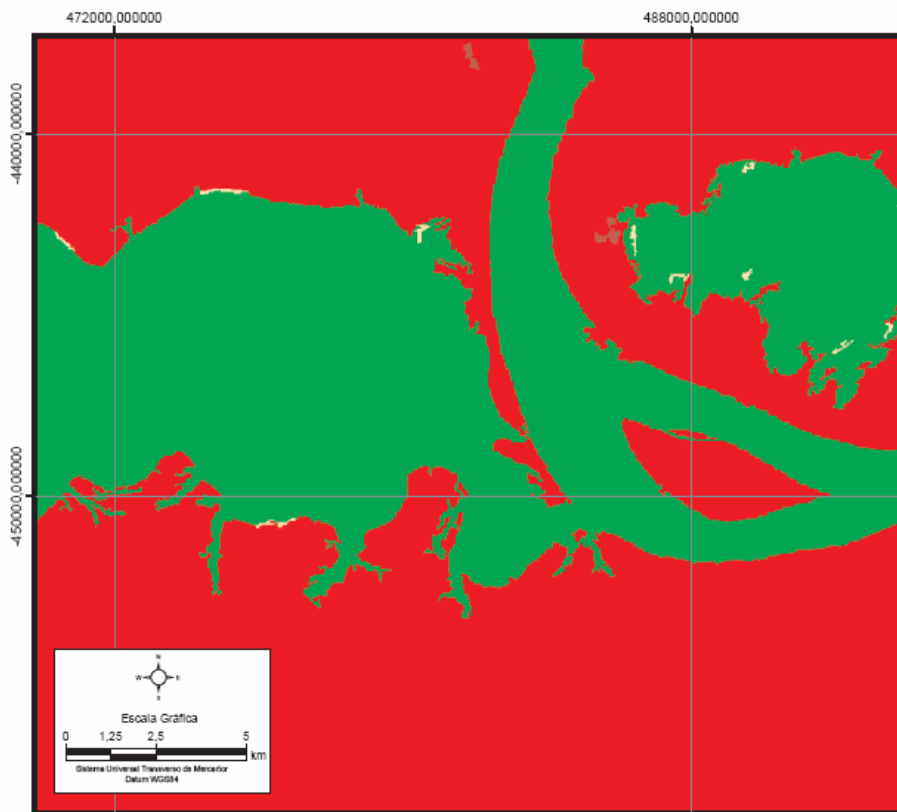


Figura 5.48 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada ISOSEG aplicada à imagem-fração nuvens; imagem Landsat-5 TM obtida em 09/06/2005 (cheia).



### 5.5. Classificação não-supervisionada USTC aplicada à banda 1 da imagem Landsat-5 TM referente ao período hidrológico da cheia.

Para fins de comparação, a banda 1 da imagem Landsat-5 TM adquirida no período da cheia (09/06/2005) foi submetida à classificação textural utilizando o algoritmo USTC (*Unsupervised Semivariogram Textural Classifier*). O produto resultante encontra-se exibido na Figura 5.49, na qual se podem distinguir porções extremamente homogêneas interpretáveis como água preta (“Água 01”) e água branca (“Água 02”). No entanto, feições espectrais sutis, como a contaminação por nuvens ao longo do Rio Solimões (Figuras 5.44, 5.45 e 5.46), não são detectáveis com a simples classificação textural da banda 1 do Landsat-5 TM.

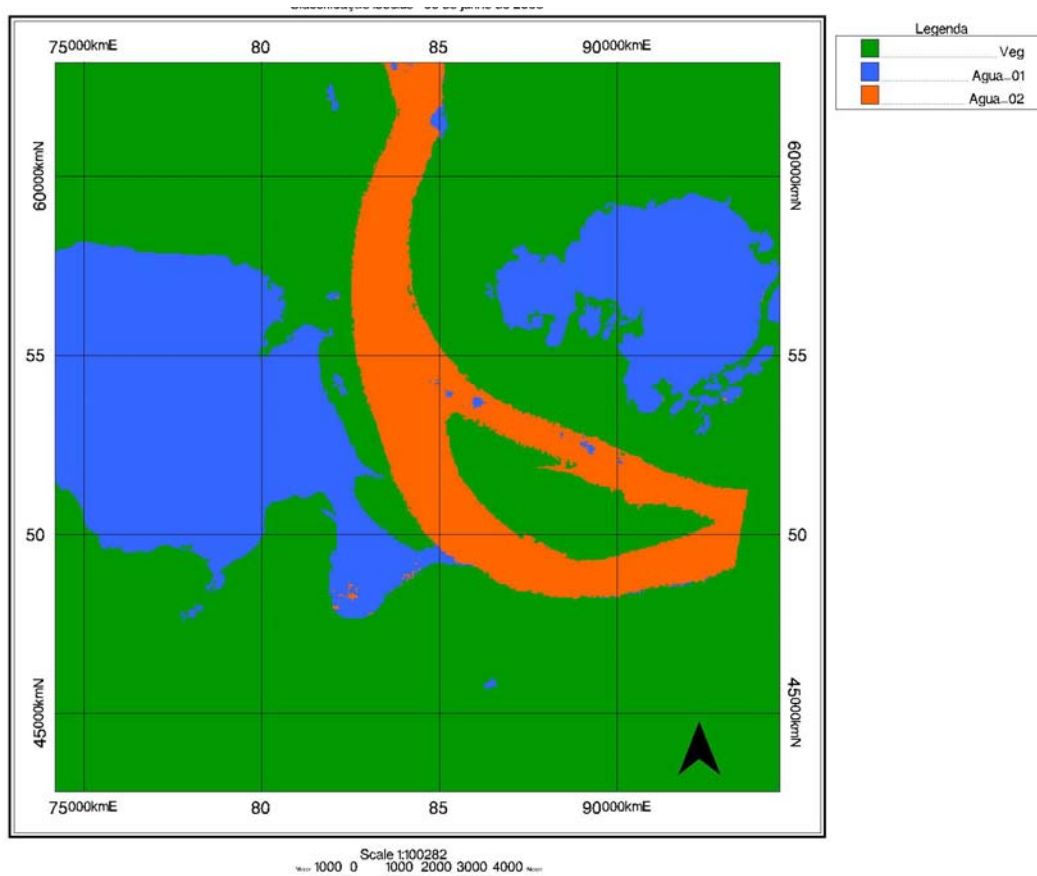


Figura 5.49 - Detalhe na área de Coari para a classificação não-supervisionada USTC aplicada à Banda 1 da imagem Landsat-5 TM, obtida em 09/06/2005 (cheia) “Água 01” é interpretada como água preta; “Água 02” é interpretada como água branca.

## 5.6. Implicação dos resultados para a modelagem atmosférica e de dispersão de poluentes

A circulação atmosférica na área de Coari responde às diferenças de temperatura entre a superfície aquática e a terrestre, estabelecendo uma circulação conhecida como brisa de rio. Tal circulação é gerada a partir do estabelecimento de gradientes térmicos que ocorrem na região, oriundos do aquecimento diferencial de tais superfícies. A região de mistura entre as águas do lago Coari (água preta) e do Rio Solimões (água branca) apresenta significativa distinção em densidade e diferenciais térmicos. Tais características podem constituir importantes fontes de variabilidade para a circulação atmosférica em micro escala e, conseqüentemente, para a dispersão de constituintes passivos, tais como óleo, nas cercanias do Terminal de Coari (Figura 2.1).

A influência do fenômeno de brisa de rio foi observada no simulado realizado no trecho do Rio Solimões entre o Terminal de Coari – Solimões e a cidade de mesmo nome, em 29 de outubro de 2003 (Figura 5.50). Nesse experimento, foram lançadas cerca de 5 toneladas de pipocas ao longo de uma seção transversal no Rio Solimões, em frente ao terminal de abastecimento. A dispersão das pipocas, cuja trajetória foi acompanhada a partir do monitoramento de imagens adquiridas por sensoriamento remoto, ocorreu, como esperado, no sentido do escoamento fluvial. Ao se aproximarem da região do “furo” que liga o Lago Coari e o Rio Solimões, parte das pipocas se dirigiu ao interior do lago, se contrapondo ao escoamento fluvial e passando por uma região de baixa hidrodinâmica. Tal fato só poderia estar associado à ocorrência de alguma forçante atmosférica que dispersasse os “derivadores” (pipocas) para o interior do lago, uma vez que nessa região descarga fluvial se dá em direção ao Rio Solimões (conforme verificadi nas Figuras 5.8 e 5.32, por exemplo).

Esse processo de dispersão foi depois evidenciado com a execução de dois experimentos numéricos computacionais, que simularam a dispersão do poluente em dois diferentes cenários ambientais: sem vento (Figura 5.51) e com a influência de vento (Figura 5.52) de 2 m/s com direção oeste (para o interior do lago) (Torres Júnior, 2002 e 2003). No primeiro dos experimentos, não foi possível observar a penetração do poluente no lago. Os resultados do segundo experimento evidenciaram a penetração do poluente no interior do lago, conforme observado no simulado (Figura 5.51). Tais resultados evidenciaram a influência do vento local sobre a dispersão de poluentes passivos e tornaram evidente a inclusão de tais processos para o correto entendimento da dispersão de poluentes na região de estudo.

Os resultados da presente pesquisa podem fornecer insumos importantes para estudos hidrológicos e de modelagem atmosférica e de dispersão de poluentes no Rio Solimões e no Lago de Coari, como suporte à contingência no caso de derramamento de óleo no Terminal de Coari, principalmente, nos seguintes aspectos: verificar o influxo de água preta do Lago de Coari no Rio Solimões, de modo a traçar seu percurso hidrodinâmico; mapear o contato entre água branca e água preta, de modo a separar domínios de diferentes densidades e temperaturas; determinar a distribuição espacial de diferentes tipos de água, como condição de contorno em modelos atmosféricos para estudos associados a brisa de rio.

O efeito de brisa de rio, como observado nos grandes e extensos rios da região amazônica, ocorre basicamente devido ao aquecimento diferencial durante o dia e a noite, entre a superfície de terra e a de água, em função da diferente capacidade de absorção de calor destes dois meios. Este aquecimento diferenciado, promove a formação de um sistema de baixa pressão atmosférica sobre a superfície mais aquecida, favorecendo o movimento ascendente do ar nesta região. Entretanto, este movimento ascendente gera ainda um fluxo em baixos níveis da região mais fria para a mais aquecida e o oposto em altos níveis, o que faz com que surja uma célula de circulação no plano vertical. Esta célula se inverte em função do aquecimento diurno, gerando o fenômeno de brisa de rio com período de aproximadamente 24 horas. Este efeito é análogo ao observado no caso de brisa marítima (Oliveira e Fitzjarrald, 1993 e Silva Dias *et al.*, 2004). Estas influências são mais intensas nas regiões em que a largura do rio é considerável, tais como próximo à Manaus (confluência os Rios Negro e Solimões), Santarém (Rios Tapajós e Amazonas) e Belém (Rios Tocantins e parte sul da Foz do Rio Amazonas) (Fisch *et al.*, 1996).

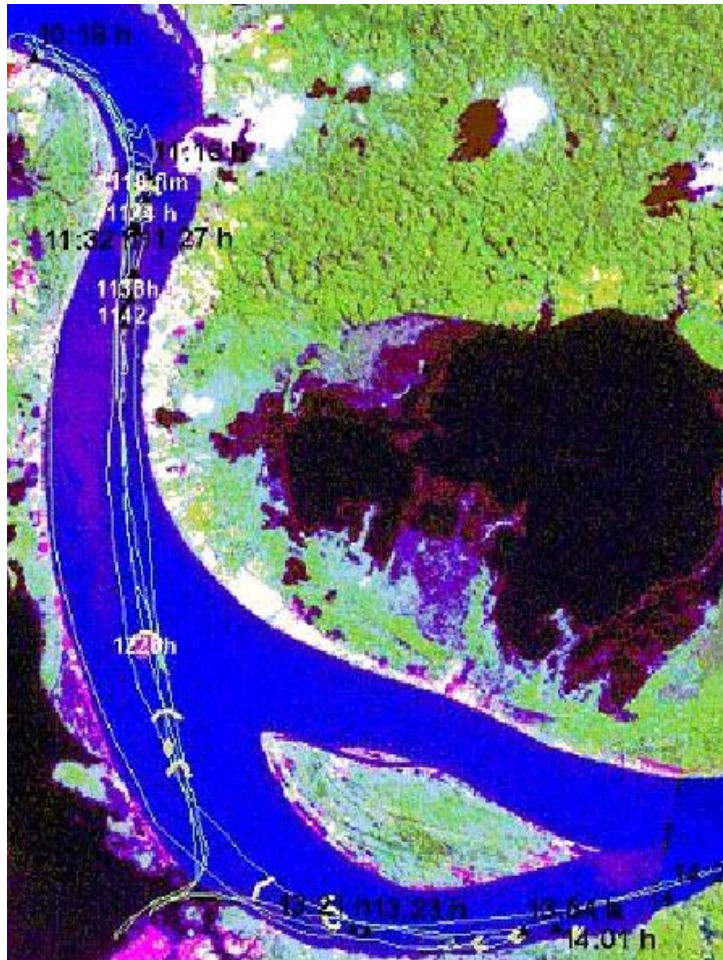


Figura 5.50 - Imagem Landsat do simulado realizado pela Petrobras no trecho do Rio Solimões entre o Terminal de Coari – Solimões e a cidade de Coari, em 29 de outubro de 2003.

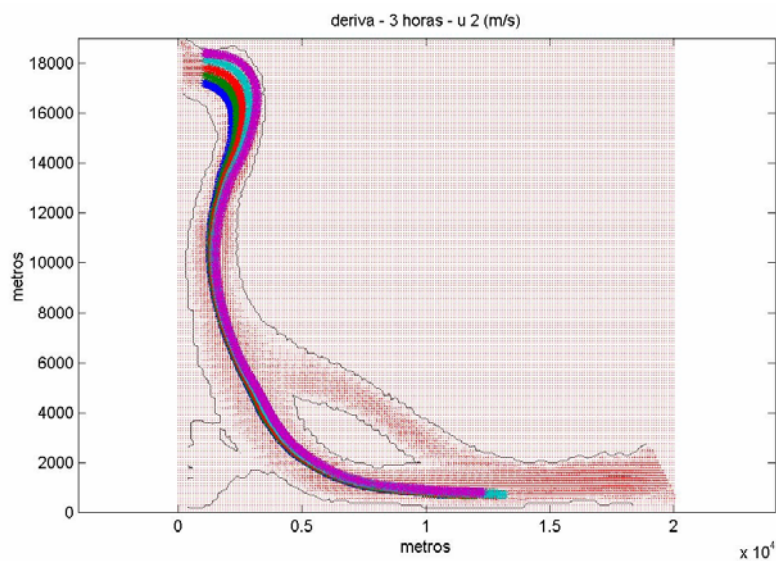


Figura 5.51 - Experimento numérico computacional simulando a dispersão do poluente, desconsiderando a ação do vento.

Fonte: Torres Júnior (2002 e 2003).

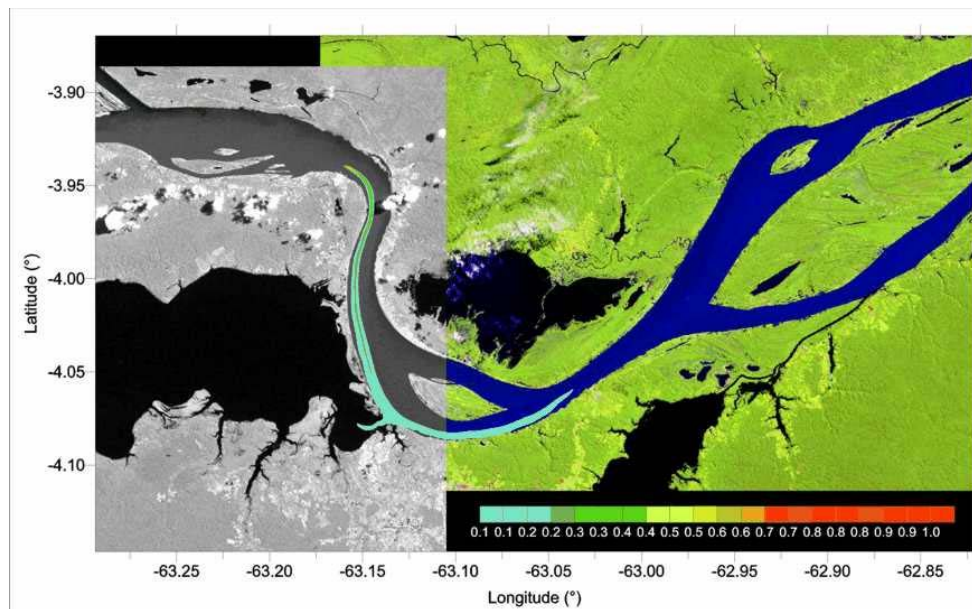


Figura 5.52-Experimento numérico computacional simulando a dispersão do poluente, considerando a ação do vento.

Fonte: Torres Júnior (2002 e 2003).

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A assinatura espectral de um *pixel* em uma imagem de sensoriamento remoto adquirida em ambientes aquáticos da Amazônia é, na maioria dos casos, resultado da contribuição de diversos tipos de água e da cobertura de nuvens dentro do *pixel*. Assim, a presente dissertação procurou mapear a entrada de água preta originária do Lago de Coari no interior do Rio Solimões, utilizando imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5 e a técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Os dados Landsat-5 TM disponíveis na área de estudo foram selecionados para abranger as diferentes fases do ciclo hidrológico no complexo Solimões/Amazonas (seca, enchente, cheia e vazante).

A região investigada inclui o Terminal de Coari, na margem direita do Rio Solimões, por onde a Petrobras escoar, através de transporte fluvial até outro terminal em Manaus, a produção de óleo da Província de Urucu, hoje estimada em 50.000 barris por dia. Na confluência do Lago de Coari com o Rio Solimões, encontra-se a cidade do mesmo nome, que representa um dos mais importantes núcleos urbanos do Estado do Amazonas.

Os produtos derivados da aplicação do MLME aos dados Landsat-5 TM incluem: assinaturas espectrais referentes aos componentes puros (água branca, água preta e nuvens), imagens-fração dos componentes puros, classificação não-supervisionadas ISOSEG aplicada às imagens-fração segmentadas. Foram obtidos produtos para as cenas inteiras e, posteriormente, para uma área detalhada na confluência do Rio Solimões com o Lago de Coari, a qual foi objeto de análise. Foram aplicadas também as classificações Isodata nas imagens-fração água branca e água preta em todas as fases do ciclo hidrológico, assim como a classificação USTC na banda 1 da imagem Landsat-5 TM no período da cheia (09/06/2005).

Quanto às assinaturas espectrais, verifica-se que o componente puro correspondente às nuvens apresenta reflectância máxima nos intervalos espectrais correspondentes às bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor Landsat-5 TM, nos períodos referente à pesquisa. Para os rios de água branca, em decorrência dos materiais em suspensão, os valores de reflectância são mais altos que a água preta. A única exceção a tal padrão ocorreu no período de seca, quando somente houve diferença significativa entre água branca e água preta no intervalo espectral correspondente à banda 3 do Landsat-5 TM.

Os resultados da aplicação do MLME permitiram mapear, nas diferentes fases do ciclo hidrológico, fluxos de água preta originária do Lago de Coari no interior do Rio Solimões. Tal fluxo é mais expressivo no período da vazante (imagem Landsat-5 TM de 03/09/2007), diminuindo em intensidade na enchente (imagem Landsat-5 TM de 30/04/2008) e na cheia (imagem Landsat-5 TM de 09/06/2005). A presença de nuvens impõe sérias limitações à interpretação das imagens-fração água branca e água preta na época da seca (imagem Landsat-5 TM de 05/10/2007). A esse respeito, vale destacar que as imagens-fração nuvens foram úteis para avaliar a influência da nebulosidade na discriminação dos demais componentes puros (água branca e água preta).

O atual estudo constitui-se em uma importante fonte de informações físicas a serem introduzidas como condição de contorno em modelos atmosféricos regionais. Tais modelos geram dentre outros resultados o campo de vento (velocidade e direção) em superfície essencial para a modelagem da dispersão de constituintes passivos no ambiente fluvial e conseqüentemente para o mapeamento de regiões sensíveis a vazamentos de óleo oriundo das atividades associadas à indústria do petróleo na Amazônia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, E.H. (2006). Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/Terra. São José dos Campos. 220p. (INPE-14621-TDI/1200). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).
- ANA, Agência Nacional de Águas. HidroWeb, Sistema de Informações Hidrológicas. [online] Disponível na Internet via WWW. URL:<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/HidroWeb.asp>. Arquivo capturado em 2008.
- Ayres, J.M. (1995). As matas da várzea do Mamirauá: Médio Rio Solimões. Brasília, DF, Tefé, AM: CNPq; Sociedade Civil Mamirauá,. 124 p.
- Barbosa, C.C.F.; Novo, E.M.L.; Carvalho, J.C.; Filho, W.P.; Mantovani, J.E. (2003). Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2419 - 2425.
- Barbosa, C.C.F. (2005). Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. São José dos Campos. 287p. (INPE- 14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).
- Barker, J.L.; Abrams, R.B.; Ball, D.L.; Leung, K.C. (1984). Radiometric calibration and processing procedure for reflective bands on Landsat-4 protoflight Thematic Mapper, *NASA Technical Report N84-31731*, p. 40.
- Brondizio, E. S.; Moran, E. F.; Mausel, P.; Wu, Y. (1993). Padrões de assentamento caboclo no Baixo Amazonas: análise temporal de imagens de satélite (TM Landsat) para estudos da ecologia humana de populações da Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7. Curitiba, 10-14 maio. Anais. São José dos Campos, INPE, 1993, v. 1 p. 16-26.



- Câmara G., Souza R.C.M., Freitas U.M., Garrido J. (1996). "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling". *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403.
- Campbell, J. B. (1987), "Introduction to Remote Sensing", Virginia Polytechnic Institute, the Guildford press, New York , pp. 551.
- Chander, G.; Markmam, B. (2003). Revised Landsat -5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (11): 2674-2577.
- Chavez, P.C. Jr. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral image, *Photogramm. Eng. & Remote Sens.*, 55(9):1285-1294.
- Costa, A. S.; Souza Jr. C. M. (2005). Comparação entre imagens Landsat e MODIS para Detecção de Incrementos de Desmatamento: um estudo de caso na região do Baixo Acre. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto XII, Goiânia, Brasil, 2005. Anais. São José dos Campos, INPE, p.1469-1476.
- Crosta, A. P. (1992), *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*, I.G/UNICAMP - Campinas. S.P., Brasil.
- Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio, A. R. (1988). Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto V., Natal, 1988. Anais. São José dos Campos, INPE, v. 2, p. 400-405.
- Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. (1996). Clima da Amazônia. [on line]. *Climanálise Especial 10 anos, número especial*, ref. 3, 5p.
- Fiorio, R. P. Disponível na Internet via [www.esalq.usp.br/departamentos/ler/disciplinas/Topo/LER450/Fiorio](http://www.esalq.usp.br/departamentos/ler/disciplinas/Topo/LER450/Fiorio)  
Acessado em março de 2008.

GEOCOVER-IMAGEM Landsat. Disponível na Internet via WWW.  
URL:<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid> > Arquivo capturado em 2008.

Hussain, Z. (1991). Digital image processing: practical applications of parallel processing techniques. Ellis Horwood. 406p.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br> acessado em maio de 2008.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em [www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html) acessado em maio de 2008.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em [www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentação.html](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/segmentação.html) acessado em maio de 2008.

Jensen, J. (2000). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. New Jersey: Prentice Hall.

Junk, W.J. (1983) - As águas da região amazônica. Salati, E., Junk, W.J. e Schubart, H.O.R. (eds.). Amazônia: Desenvolvimento, Integração e Ecologia.: 45-100.

Junk, W. J. (1989). Flood tolerance and tree distribution in central Amazonian floodplains. In L. B. Holm-Nielsen, I. C. Nielsen, & H. Balslev (Eds.), Tropical forests: Botanical dynamics, speciation and diversity ( pp. 47– 64). London: Academic Press.

Junk, W.J. (1993). Wetlands of Tropical South America. *In*: Whigham, D., Hejny, S.; Dykyjova, D. (eds.) *Wetlands of the world: Inventory, ecology and management*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 679-739.

Junk, W. J. (1997). The Central Amazon Floodplain - Ecology of a Pulsing System. Verlag Berlin Heidelberg New York: Springer, 525 p.

- Klinge, H. (1967). Podzol soils: a source of blackwater rivers in Amazonia, 117-125. In: H. Lent (ed.). Atas do Simpósio sobre a biota amazônica – Limnologia. Belém: UFPA, vol. 3.
- Markham, B. L.; Barker, J.L. (1986). Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. EOSAT Landsat Technical Notes, No 1, August, 8p.
- Mather, P. M. (1987). Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester: John Wiley and Sons. 352p.
- Mertes, L.A.K.; Smith, M.O.; Adams, J.B. (1993). Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sens. Environ.* v. 43, n. 3, p. 281-301.
- Mertes, L.A.K. (1994). Rates of flood-plain sedimentation on the central Amazon River. *Geology* 22:171-174.
- Miranda, F.P; Fonseca, L.E.N.; Beisl, C.H.; Rosenqvist, A; Figueiredo, M.D.M.A.M. (1997). Seasonal mapping of flooding extent in the vicinity of the Balbina Dam (Central Amazonia) using RADARSAT-1 and JERS-1 SAR data. In *Geomatics in the Era of RADARSAT (GER'97), Proceedings*.
- Novo, E.M.L.M; Shimabukuro, Y.E. (1994). Spectral mixture analysis of inland tropical waters. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (3): 663-667.
- Novo, E. M. L. de M. (1995). Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blucher.
- Novo, E.M.L.M.; Barbosa, C.C.F.; Freitas, R.M.; Shimabukuro, Y.E.; Melack, J.M.; Pereira Filho, W. (2006). Seasonal changes in chlorophyll distribution in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Limnology*, 7(3): 153-161.

- Oliveira, A. P.; Fitzjarrald, D. R. (1993). The Amazon river breeze and the local boundary layer: I. observations. *Boundary Layer Meteorology*, vol 63, p. 141-162.
- Prince, J.C. (1987). Calibration of satellite radiometric and the comparison of vegetation indices, *Remote Sens. Environ.* 21:15-27.
- Projeto RADAMBRASIL. (1976). **Folha S/A 21- Santarém**; geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DPNM. (Levantamento dos Recursos Naturais, v. 10).
- Richards, J.A. (1986). *Remote Sensing and Digital Image Analysis*. Campbell, Australia: Springer-Verlag.
- Robinove, C. J. (1982). Computation with physical values from Landsat digital data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48 (5): 781-784.
- Rudorff, C. M.; Novo, E. M. L. M.; Galvão, L. S. (2006). Spectral mixture analysis of inland tropical Amazon Floodplain waters using EO-1 Hyperion. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6, Denver, USA. **Proceedings**. Denver.
- Sabins, F.F. (1997), "*Remote Sensing: principles and interpretation*". 3<sup>a</sup> ed. New York, W.H. Freeman and Company, 494 p.
- Santos, R. C. (2002). Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando Sensoriamento Remoto. Rio de Janeiro. 153p. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ.
- Shimabukuro, Y. E.; Smith, J. A., (1991), "*The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data*". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29 (1):16-20.

- Shimabukuro, Y. E.; Batista, G.T.; Mello, E.M.K; Moreira, J.C.; Duarte,V. (1998). Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation Landsat TM images of the Amazon Region. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (3): 535-541.
- Shimabukuro, Y.E.; Ponzoni, J. F. (2007). *Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação*. São José dos Campos,SP. A. Silva Vieira Ed.
- Silva Dias, P. L.; Longo, M.; Fitzjarrald, D. R.; Denning, A. S. (2004). River Breeze circulation in eastern Amazonia: observations and modeling results. *Theor. Appl. Climatol.*,78, 111-121.
- Silva, T. S. F. (2004). *Imagens EOS-MODIS e Landsat 5 TM no estudo da dinâmica das comunidades de macrófitas na várzea Amazônica*. São José dos Campos. 167p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Sioli, H. (1984). The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types, 127-165. In *the Amazon, Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*, Sioli H. (ed.), Junk Publ.,Dordrecht.
- Sioli, H. (1985). *Amazônia: Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. Petrópolis: Ed. Vozes Ltda. 69 p.
- Sioli, H. (1990). *Amazônia fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. Instituto Max-Planck de Limnologia. Editora Vozes Ltda, Petrópolis, RJ. 72p.
- The United States Geological Survey (USGS). Landsat Project. Disponível na Internet via WWW. URL <http://landsat.usgs.gov>>.Acessado em março de 2008.
- Torres Júnior, A.R. (2002). Modelagem e deriva de manchas de óleo em rios. In: IV Workshop do Projeto Piatam, 2002. Manaus-AM.

Torres Júnior, A.R. (2003). Modelagem de Dispersão de constituintes em ambiente fluvial no contexto do Projeto Piatam II. In: Workshop de Modelagem do Projeto Piatam II, 2003, Rio de Janeiro. Workshop de Modelagem do Projeto Piatam II.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)