



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**USO DE SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS PALSAR-2/ALOS 2 PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DO SOLO E DETECÇÃO  
DE ÁREAS ÚMIDAS NA REGIÃO DA ILHA DO BANANAL, TRECHO  
MÉDIO DO RIO ARAGUAIA**

**Jorge Bohrer Marques**

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF: julho / 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**USO DE SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS PALSAR-2/ALOS 2 PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DO SOLO E DETECÇÃO  
DE ÁREAS ÚMIDAS NA REGIÃO DA ILHA DO BANANAL, TRECHO  
MÉDIO DO RIO ARAGUAIA**

Jorge Bohrer Marques

Orientador: Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Coorientador: Dr. Fernando Campagnoli

Dissertação de Mestrado

Brasília – DF: julho / 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**USO DE SÉRIE TEMPORAL DE IMAGENS PALSAR-2/ALOS 2 PARA  
CLASSIFICAÇÃO DE USO E COBERTURA DO SOLO E DETECÇÃO  
DE ÁREAS ÚMIDAS NA REGIÃO DA ILHA DO BANANAL, TRECHO  
MÉDIO DO RIO ARAGUAIA**

Jorge Bohrer Marques

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, opção Acadêmica.

Aprovado por:

---

Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Doutor (Geografia – UnB)  
(Orientador)

---

Fernando Campagnoli, Doutor (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL)  
(Coorientador)

---

Éder de Souza Martins, Doutor (Geografia – UnB)  
(Examinador Interno)

---

Humberto Navarro de Mesquita Júnior, Doutor (Serviço Florestal Brasileiro - SFB)  
(Examinador Externo)

---

Renato Fontes Guimarães, Doutor (Geografia – UnB)  
(Examinador Interno/Suplente)

Brasília-DF, 21 de julho de 2017

Marques, Jorge Bohrer

Uso de série temporal de imagens PALSAR-2/ALOS 2 para classificação de uso e cobertura do solo e detecção de áreas úmidas na região da ilha do bananal, trecho médio do rio Araguaia, 72 p., (UnB-IH-GEA, Mestre, Gestão Ambiental e Territorial, 2017).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Instituto de Humanas, Departamento de Geografia.

1. Áreas úmidas

2. SAR

3. Sensoriamento Remoto

4. Ilha do Bananal

I. UnB-IH-GEA

É concebido à Universidade de Brasília permissão para produzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Jorge Bohrer Marques

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por estar sempre ao meu lado nos mais diversos desafios da vida. A valorização e a construção do conhecimento iniciam-se no berço, e tenho muito a agradecer à minha mãe, Maria das Graças Bohrer Marques, e ao meu pai, Jorge Marques de Oliveira, por incentivarem a busca incessante pelo conhecimento.

Agradeço a oportunidade de viver e trabalhar na cidade de Brasília, que ao longo desses quatro anos me trouxeram muitas alegrias, novas experiências, novas amizades e fez ser o profissional que sou. Agradeço também a oportunidade de ter trabalhado na Secretaria do Patrimônio da União (SPU) que possibilitou conhecer melhor a realidade fundiária do país, especialmente na Amazônia Legal. A fase embrionária dessa pesquisa foi justamente durante este período.

Agradeço ao Dr. Fernando Campagnoli, que desde o período em que trabalhamos juntos na SPU foi um grande incentivador para a realização desse mestrado. Além disto, se tornou coorientador e muito contribuiu com sua valiosa ajuda e seus sábios ensinamentos.

Agradeço ao prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior por seu meu orientador e pela disposição em esclarecer dúvidas, compartilhar conhecimentos e paciência nos momentos de angústias. Por ter me dado a oportunidade de fazer parte da equipe do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE), no qual tive o privilégio de fazer novas amizades e trocar experiências no âmbito do geoprocessamento.

Agradeço ao Dr. Humberto Navarro de Mesquita Júnior por ser um parceiro dessa pesquisa e responsável pela disponibilização das imagens de radar. Juntamente, o meu agradecimento vai para a *Japan Aerospace Agency* (JAXA) responsável pela produção e distribuição das imagens PALSAR-2/ALOS 2.

Aos membros integrantes da banca examinadora, pela disposição em avaliar o trabalho e sugerir aperfeiçoamentos necessários.

Agradeço especialmente a minha namorada e companheira Juliana, que me apoiou durante todo o período do mestrado e muito me ajudou nos momentos finais desse mestrado. Te amo muito!!!

Agradeço aqueles que de alguma forma me ajudaram a alcançar o objetivo de obter o grau de mestre em Geografia. É inviável mencionar tod@s que me ajudaram, mas fica aqui o meu sincero sentimento de gratidão!

## RESUMO

A pesquisa avaliou o uso de série temporal de imagens PALSAR-2/ALOS 2 para classificação de uso e cobertura do solo e detecção de áreas úmidas compreendidas na ilha do Bananal, trecho médio do rio Araguaia. A identificação dos ambientes que sofrem periodicamente influência de grandes rios é uma importante ferramenta para gestão ambiental e territorial e contribui para as políticas públicas territoriais atualmente existentes. Foram utilizadas quatro imagens do sensor PALSAR-2/ALOS 2, banda L, com resolução de 6,25 metros. Dados complementares foram úteis no sentido de auxiliar as devidas interpretações obtidas a partir das imagens SAR, como as informações oriundas da estação fluviométrica, imagens ópticas e MDE. A área de estudo é um local de intensos conflitos fundiários e apresenta peculiaridades geoambientais que a torna uma região de interesse ambiental e fundiário. A metodologia aplicada conhecida como Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP) serviu para gerar componentes de cada imagem SAR e a transformada MNF auxiliou a melhora na relação sinal-ruído. Para fins de comparação aplicou-se o filtro adaptativo Gamma cuja intenção foi comparar com os resultados do CDP-MNF. Foi aplicado o algoritmo de classificação SVM sobre ambos os métodos de tratamento de imagem e o método CDP-MNF apresentou resultados satisfatórios. Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que a transformação CDP-MNF alcançou um detalhamento maior para o uso do classificador SVM, pois apresentou uma relação mais complexa e eficiente para separar diferentes alvos. Os resultados de coeficiente Kappa foi de 0,62 sobre o resultado SVM / CDP-MNF e 0,57 sobre o resultado SVM / Gamma, sendo considerados de concordância substancial. A estimativa de inundação foi calculada com base na série histórica de cotas e vazões de estação fluviométrica operada pela ANA. O resultado da variação na área de inundação foi na ordem de 10% entre a imagem que apresentou menor cota de inundação com a imagem que apresentou maior cota de inundação. Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de ferramentas adequadas para identificação de áreas úmidas.

**Palavras-chave:** Áreas úmidas, Sensoriamento Remoto, SAR, Ilha do Bananal ;

## **ABSTRACT**

The research evaluated the use time series of the PALSAR-2/ALOS 2 to classify land use and cover and detection of wetlands included in Bananal Island, the middle stretch of the Araguaia River. The identification of flooded areas of large rivers is an important tool for environmental and territorial management and contributes to the current territorial public policies. Four images of the PALSAR-2/ALOS 2, L-band sensor were used, with a resolution of 6.25 meters. Complementary data were useful in order to aid the interpretation of the SAR images, such as information from the fluviometric station, optical images and DEM. The study area is a site of intense land conflicts and presents geoenvironmental peculiarities that make it a region of environmental interest and land tenure. The applied methodology known as Analysis of Density and Probability Components (ADPC) served to generate components of each SAR image and the MNF transform assists the improvement in the signal-to-noise ratio. For the purpose of comparison the Gamma adaptive filter was applied whose intention was to compare with the results of the DPC-MNF. The SVM classification algorithm was applied to both imaging methods and the DPC-MNF method presented satisfactory results. With the results obtained, it can be stated that the CDP-MNF transformation reached a greater detail for the use of the SVM classifier, because it presented a more complex and efficient relation to separate different targets. The Kappa coefficient results were 0.62 on the SVM/DPC-MNF result and 0.57 on the SVM/Gamma result, being considered with substantial agreement. The flood estimation was calculated based on the historical series of river flow rates and flows operated by the ANA. The result of the variation in the flood area was in the order of 10% between the image that presented the lowest flood level with the image that presented the highest flood level. This work contributed to the development of adequate tools to identify wetlands.

**Keywords:** Wetlands, Remote Sensing, SAR, Bananal Island

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>18</b>
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
3.1 Características gerais de ambientes de inundação .....	19
3.2 Características gerais das imagens de radar .....	21
3.3 Aplicações com imagens de radar .....	24
<b>4. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>26</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 Materiais.....</b>	<b>32</b>
5.1.1 Sensores PALSAR-2/ALOS 2.....	32
5.1.2 Dados Complementares .....	35
<b>5.2 Métodos .....</b>	<b>37</b>
5.2.1 Tratamento do ruído .....	38
5.2.1.1 <i>Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP)</i> .....	39
5.2.1.2 <i>Filtro adaptativo Gamma</i> .....	40
5.2.2 Classificação.....	40
5.2.3 Análise de acurácia.....	41
5.2.4 Análise da dinâmica de inundação .....	42
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
6.1 Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP) .....	43
6.2 Filtro adaptativo Gamma .....	47
6.3 Classificação.....	49
6.4 Validação do mapeamento.....	54
6.5 Análise da dinâmica de inundação .....	57
<b>7. DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Chave dos principais tipos de florestas amazônicas sujeitas à inundação .....	20
<b>Figura 2</b> – Efeitos da rugosidade na superfície .....	22
<b>Figura 3</b> – Características geométricas de uma imagem de radar .....	23
<b>Figura 4</b> – Mapa de localização da área de estudo .....	27
<b>Figura 5</b> – Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas .....	31
<b>Figura 6</b> – Relação das imagens PALSAR-2/ALOS 2 adquiridas .....	34
<b>Figura 7</b> – Gráfico do regime fluviométrico do rio Araguaia com as indicações das imagens SAR .....	36
<b>Figura 8</b> – Fluxo metodológico do processamento digital da série temporal das imagens SAR, visando classificar as diferentes feições de uso e cobertura do solo .....	37
<b>Figura 9</b> – Fluxo metodológico para o tratamento individualizado de cada imagem SAR, visando identificar a dinâmica de inundação.....	38
<b>Figura 10</b> – Procedimento para gerar as componentes de densidade de probabilidade .....	39
<b>Figura 11</b> – Hiperplano de separação entre classes espectrais em um classificador SVM ....	41
<b>Figura 12</b> – Relação das 16 componentes geradas a partir da ACDP – HH .....	43
<b>Figura 13</b> – Cubo temporal das 128 componentes ACDP.....	44
<b>Figura 14</b> – Distribuição das CDP do cubo temporal das imagens SAR .....	45
<b>Figura 15</b> – Gráfico dos autovalores das 128 componentes do cubo temporal .....	46
<b>Figura 16</b> – Comparação dos valores das CDP antes e após a inversa do MNF (ACDP-MNF) .....	46
<b>Figura 17</b> – Comparação entre as assinaturas de pixels da imagem original e da imagem pelo método CDP-MNF .....	47
<b>Figura 18</b> – Comparação da imagem original sobre a imagem com filtro Gamma .....	48
<b>Figura 19</b> – Assinatura das amostras levantadas sobre as CDP-MNF .....	49
<b>Figura 20</b> – Assinatura das amostras levantadas sobre o filtro Gamma.....	49
<b>Figura 21</b> – Assinatura das amostras de uso sobre as CDP-MNF.....	51

<b>Figura 22</b> - Assinatura das amostras de uso sobre o filtro Gamma.....	51
<b>Figura 23</b> – Classificação SVM gerada a partir das imagens CDP-MNF .....	53
<b>Figura 24</b> – Classificação SVM gerada a partir das imagens Gamma .....	54
<b>Figura 25</b> – Resultado da classificação manual com base na imagem OLI-Landsat 8 .....	55
<b>Figura 26</b> – MDE com destaque da região com cotas topográficas mais elevadas.....	58
<b>Figura 27</b> – Dinâmica de inundação a partir das imagens SAR.....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Principais bandas dos sensores SAR .....	21
<b>Tabela 2</b> – Nomenclatura de vegetações .....	29
<b>Tabela 3</b> – Especificações do sensor PALSAR-2/ALOS 2 .....	32
<b>Tabela 4</b> – Informações das imagens PALSAR-2/ALOS 2 adquiridas.....	33
<b>Tabela 5</b> – Informação da imagem óptica utilizada.....	35
<b>Tabela 6</b> – Informações das cotas da régua da ANA correspondente as datas das imagens SAR e o valor da cota da média das máximas histórica.....	36
<b>Tabela 7</b> – Interpretação do coeficiente Kappa .....	42
<b>Tabela 8</b> – Acurácia Geral e Coeficiente Kappa sobre o mapeamento realizado.....	56
<b>Tabela 9</b> – Matriz de confusão sobre o classificador SVM/CDP-MNF.....	56
<b>Tabela 10</b> – Matriz de confusão sobre o classificador SVM/Gamma .....	57
<b>Tabela 11</b> – Porcentagem de inundação em relação as imagens SAR .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACDP – Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade

ALOS – Advanced Land Observing Satellite

ANA – Agência Nacional das Águas

APC – Análise dos Principais Componentes

APP – Área de Proteção Permanente

AVNIR-2 – Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2

CDP – Componentes de Densidade e Probabilidade

CF/88 – Constituição Federal de 1988

ENVI – Environment for Visualizing Images

FBD – Fine Beam Dual Polarization

FUNAI – Fundação Nacional do Índio

GIS – Geographic Information System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency

JERS-1 – Japanese Earth Resource Satellite - 1

LMEO – Linha Média das Enchentes Ordinárias

MDE – Modelo Digital de Elevação

MNF – Minimum Noise Fraction

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OLI – Operational Land Imager

PALSAR – Phased Array type L-Band Synthetic Aperture Radar

PARNA – Parque Nacional

PRISM – Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping

RF – Random Forest

RHTA – Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia

SAM – Mapeador Espectral de Ângulos

SAR – Synthetic Aperture Radar

SCM – Mapeador de Correção Espectral

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação

SPU – Secretaria do Patrimônio da União

SR – Sensoriamento Remoto

SRC – Sistema de Referência de Coordenadas

SVM – Support Vector Machine

TI – Terra Indígena

UC – Unidade de Conservação

UTM – Universal Transversa de Mercator

WGS-84 – World Geodetic System 1984

## 1 – INTRODUÇÃO

A problemática ambiental nas últimas décadas se tornou um tema de atenção internacional e, de forma gradativa, diferentes mecanismos políticos que visam a preservação ambiental estão sendo aplicados em todo o mundo. Cada vez mais a demanda e a exploração de forma insustentável dos recursos naturais ocasionam degradações socioambientais e a consequente diminuição da disponibilidade dos serviços ecossistêmicos tão essenciais à manutenção da vida em geral. No caso específico dos ambientes de inundação, a realidade de degradação e exploração de seus recursos naturais não é diferente.

Estima-se que foram degradados cerca de 50% dos ambientes de inundação no mundo devido às atividades antrópicas crescentes (urbanização, agricultura e desenvolvimento rural) que alteram a dinâmica hídrica e de sedimentação, provocam eutrofização, introduzem espécies exóticas e ocasionam perda da biodiversidade (Zedler & Kercher, 2005). Esses ambientes correspondem a 6% da superfície terrestre, apesar da pouca representatividade espacial prestam importantes serviços ecossistêmicos, tais como: reciclagem de nutriente; sequestro de carbono e nitrogênio; regulação da emissão de gás metano; melhora na qualidade da água; resiliência ambiental frente às mudanças climáticas e habitats de espécies endêmicas, que as utilizam tanto para reprodução quanto para alimentação (Deák et al., 2015; Duffy & Kahara, 2011; Junk & Sparks, 1989; Watson et al., 2016). Sob o ponto de vista ambiental, os ambientes de inundação são considerados de importância internacional pela Convenção de Ramsar sobre zonas úmidas (Ramsar Convention, 1971), do qual o Brasil é signatário desde 1993 e se comprometeu a fortalecer políticas nacionais para a gestão e proteção desses ambientes. No entanto, a realização de inventários, classificações e delimitações de forma robusta a respeito destes ecossistemas tem sido pouco eficiente (Junk, 2011).

A perda da biodiversidade e das características hidrológicas inerente aos ambientes de inundação deve-se, predominantemente, às atividades agrícolas intensivas que utilizam técnicas de drenagem e práticas de substituição da vegetação nativa por monoculturas agrícolas, ocasionando mudanças no ritmo hidrológico (Watson et al., 2016; Zedler & Kercher, 2005). A partir da década de 1990, a expansão de aglomerações urbanas nessas regiões vem aumentando e conseqüentemente a sua degradação (Gutzwiller & Flather, 2011).

No caso brasileiro, os ambientes de inundação estão resguardados por legislações específicas que as condicionam tanto no aspecto fundiário quanto ambiental, o que acarreta em apropriação destes territórios e formas de uso de maneira igualmente específica. No aspecto

fundiário, a Constituição Federal de 1988 (CF/88), em seu artigo 20, abarca uma gama de bens patrimoniais que é de responsabilidade da União. Dentre eles, podemos destacar os ambientes conceituados como bens patrimoniais da União, que correspondem as áreas que representam a dinâmica hidrológica natural de corpos hídricos, como é o caso contido no inciso III da CF/88: “os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e praias fluviais” (Brasil, 1988).

Outro termo importante é a definição de Terrenos Marginais que está ancorada no Decreto-Lei n 9.760, de 5 de setembro de 1946, que dispõe sobre a sua conceituação, e assim o define: “banhados pelas correntes navegáveis, fora do alcance das marés, vão a distância de 15 (quinze) metros, medidos horizontalmente para a parte da terra, contados desde a linha média das enchentes ordinárias” (Brasil, 1946). Portanto, a real definição dos Terrenos Marginais está diretamente atrelada ao entendimento da dinâmica de inundação do rio, na qual é chamada de “Linha Média das Enchentes Ordinárias” (LMEO). A LMEO está condicionada às características morfológicas de sua bacia hidrográfica, associado à pedologia, regime de chuva e os tipos de vegetação encontradas nesta área. Atualmente, as demarcações de LMEO homologadas pela Secretaria do Patrimônio da União (SPU) apresentam um percentual muito baixo, de apenas 1% do total estimado para o Brasil (MPOG, 2014) e grande parte deste passivo encontra-se na região da Amazônia Legal. Devido a esta baixa porcentagem de áreas demarcadas, e conseqüentemente, a imprecisão dos limites entre o público e o privado que diversos processos de regularização fundiária em áreas públicas apresentam dificuldades, e casos de conflitos entre o que é de domínio público e particular são frequentes (Benatti, 2005; Benatti, 2016). A indefinição dominial do território público gera apropriação indevida, assassinatos de lideranças locais, de quilombolas, indígenas e de povos e comunidades tradicionais em geral que sofrem pressões das mais diferentes formas de grileiros de terras públicas. Neste sentido, o desafio em delimitar estes ambientes se torna uma questão crucial para a efetiva gestão destas áreas.

No aspecto ambiental, outro instrumento legal que trata de áreas sob influência hidrológica dos rios é o que consta no Código Florestal brasileiro, revisado e sancionado pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que mantém a importância das áreas adjacentes aos rios definida em seu artigo 3º inciso II como sendo Áreas de Proteção Permanente (APP): “área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de

fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas” (Brasil, 2012). A delimitação das APPs dependerá da largura do curso d’água na qual está associada, conforme indicado no Capítulo II do Código Florestal. Neste sentido, percebe-se que há uma atenção especial aos terrenos que margeiam os corpos d’água como elementos imprescindíveis para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, independente da sua situação dominial. Os ambientes influenciados pelo transbordamento periódico de rios considerados federais, além de constituírem como área especial de APP, também são considerados como Terrenos Marginais. Dessa forma, podemos afirmar que, em termos jurídicos, as áreas enquadradas tanto nas APPs como nos Terrenos Marginais são áreas de especial interesse para preservação da biodiversidade e qualidade dos corpos hídricos, as quais são eminentemente de domínio da União. Esta condição jurídica evidencia a necessidade de gestão territorial de tais áreas.

Todavia, o marco jurídico de preservação ambiental e fundiário não tem efeito prático se o Poder Público for incapaz de conter ações de desmatamento, drenagens ou quaisquer outras interferências que possam prejudicar este frágil ecossistema. Na região tropical da América do Sul, Junk e Piedade (2004) evidenciaram que cerca de 20% da área é periodicamente inundada, uma quantidade significativa em comparação com outras regiões do mundo. Diversos fatores antrópicos relacionados a expansão das atividades econômicas em regiões como a Amazônia Legal, têm efeitos negativos em seu aspecto ambiental, como exemplo, o caso do arco do desmatamento ocasionado pela construção de rodovias federais (Fearnside & Graça, 2006), as atividades de monocultura de soja (Domingues & Bermann, 2012), os grandes projetos de hidroelétricas, de mineração (Junk & Piedade, 2004) entre outras atividades. Um importante fator responsável pela dificuldade de monitoramento e consequente gestão destes territórios é a capacidade técnica e operacional em delimitar a dinâmica hidrológica dos rios. Neste sentido, Dias (2014) salienta que a deficiência na delimitação é um fator que limita as ações de gestão e planejamento territorial, embora o uso de geotecnologias envolvendo ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto vêm possibilitando superar tais condicionantes.

Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto (SR) surgem como um instrumento que têm demonstrado resultados satisfatórios na geração de dados cartográficos, de forma a atender as expectativas de produção em larga escala, ou seja, de grandes recortes geográficos. Atualmente, trabalhos envolvendo a cartografia automatizada e o monitoramento de ambientes usando SR permitem produzir informações espaciais com baixo custo relativo (Martins & Schaefer, 2005). Os sensores ópticos espectrais a bordo de satélites ou

aerotransportados são dados de sensoriamento remoto mais acessíveis e amplamente aplicados em trabalhos envolvendo SR para diversas finalidades. Essas imagens atuam na faixa do visível e infravermelho e apresentam limitações para trabalhos em regiões com alta incidência de nuvens, pois elas não ultrapassam a composição física das nuvens (Souza-Filho et al., 2011). Aproximadamente 75% dos ambientes de inundação estão sob um denso dossel florestal, e outros 25% são identificados como água aberta (Melak & Hess, 2010). O uso de imagens ópticas para delimitação de ambientes de inundação tem a capacidade de identificar o conceito “água aberta” e também, o uso e cobertura do solo quando não há incidência de nuvens. A limitação do uso de imagens ópticas ocorre devido às condições atmosféricas, uma alternativa são os sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) pois a sua aplicação apresenta resultados satisfatórios em ambientes inundáveis, conforme diversas pesquisas realizadas (Hess et al. 1995; Kasischke et al. 1997; White et al. 2015).

## **2 – OBJETIVO**

O objetivo geral desta pesquisa é propor uma metodologia para processamento digital de série temporal de imagens de radar cuja intenção é a produção de dados cartográficos necessários ao monitoramento ambiental e fundiário das áreas sujeitas à inundação de rios.

O objetivo específico é avaliar a aplicação do processamento digital da série temporal sobre quatro imagens PALSAR-2/ALOS 2, Banda L com polaridades HH e HV e resolução de 6,25 metros, na área de estudo localizada numa determinada região da ilha do Bananal, trecho médio do rio Araguaia. Pretende-se identificar e delimitar o uso e cobertura do solo, bem como detectar área úmida a partir das imagens disponibilizadas e compreender a sua dinâmica de inundação. Além disto, pretende-se contribuir com argumentos técnico-científicos para delimitar áreas sob o domínio da União com uso de técnicas de sensoriamento remoto.

## 3 – REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 – Características gerais de ambientes de inundação

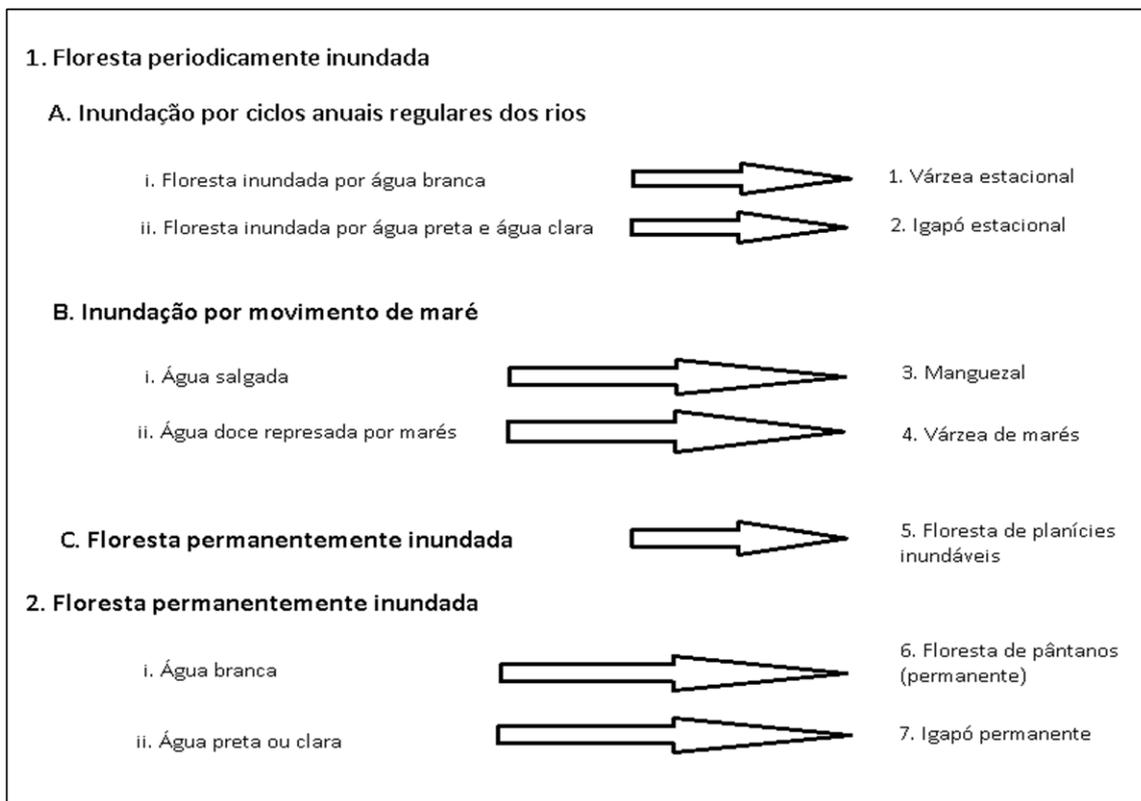
Os ambientes de inundação caracterizam por um constante intercâmbio de água, sedimentos e nutrientes que os diferenciam tanto dos ambientes aquáticos como dos terrestres (Arnesen, 2012). Esses ambientes possuem uma intrínseca relação entre solo-água, seja ela proveniente de água doce (várzeas, igapós, entre outros) ou salgada (manguezais).

Para Junk et al. (1989) os ambientes de inundação se caracterizam por serem áreas “episodicamente ou periodicamente inundadas pelo transbordamento lateral dos rios ou lagos e/ou pela precipitação direta ou pelo afloramento do lençol freático, de forma que a biota responde ao ambiente físico-químico com adaptações morfológicas, anatômicas, fisiológicas e etológicas, gerando estruturas específicas e características dessas comunidades”. Portanto, os ambientes inundáveis possuem três feições principais (Junk, 2011): (1) grau de inundação ou de saturação do solo; (2) tipos de vegetações aquáticas (hidrófitas); e (3) solos hidromórficos.

Um conceito importante na dinâmica hidrológica é o de “pulso de inundação” (Junk & Sparks 1989; Junk, 2011), que possibilita uma compreensão mais abrangente do funcionamento e ciclo de um rio. O pulso de inundação pode ser caracterizado pelos seguintes atributos: duração, frequência, amplitude e regularidade da dinâmica hidrológica. A duração e a amplitude estão relacionadas com a área de contribuição de uma bacia hidrográfica, enquanto a frequência e a regularidade são condicionantes pluviométricos, e estão diretamente relacionadas ao regime de chuva e seu respectivo ritmo pluviométrico (Junk & Sparks, 1989). Esse conceito aborda os ambientes de inundação como um fenômeno dinâmico entre a cheia e a vazante do rio. A regularidade do pulso de inundação é um indicador do biorritmo existente ao longo de toda uma bacia hidrográfica, no qual diversas espécies animais e vegetais dependem deste ritmo hidrológico para a manutenção de funções vitais e da presença de diversidade ecológica.

Prance (1980) busca revisar terminologias considerando as inúmeras características dos ambientes de inundação. Existe uma correlação intrínseca entre a característica bioquímica das águas e a terminologia “várzea” e “igapó”, sendo a primeira caracterizada pela presença de “água branca”, enquanto a última diz respeito à presença de “água preta”. A várzea é a denominação mais comum ao tratar os ambientes de inundação de rios, sendo definido por Guerra (1993) como terrenos baixos e relativamente planos junto às margens dos rios também

considerados como leito maior dos rios, são definidas como sendo ambientes que sofrem inundações periódicas, enquanto os igapós são permanentemente inundados. Neste estudo sobre ambientes de inundação, Prance (1980) definiu chaves dos principais tipos de ambientes de inundação (**Figura 1**).



**Figura 1** – Chave dos principais tipos de florestas amazônicas sujeitas à inundação (Fonte: Prance, 1980 – adaptado)

Existem outras pesquisas relacionadas à conceituação de várzea, embora pouco se diferenciam em seu aspecto central, basicamente caracterizado pela periodicidade de inundação associada aos sedimentos em suspensão nas águas fluviais (Sioli, 1967; Prance, 1980; Junk, 1989; Ayres, 1995; Iriondo, 1982). É importante destacar alguns esforços no sentido de utilizar ferramentas de SR para identificação de várzeas, dentre elas podemos mencionar o Projeto Nossa Várzea que buscou identificar as áreas de várzea ao longo da calha do rio Amazonas (Santos, 2005) e o desenvolvimento de metodologia de predição de áreas de inundação nas várzeas dos rios da Amazônia Legal realizada pela SPU (Campagnoli et al., 2016).

### 3.2 – Características gerais das imagens de radar

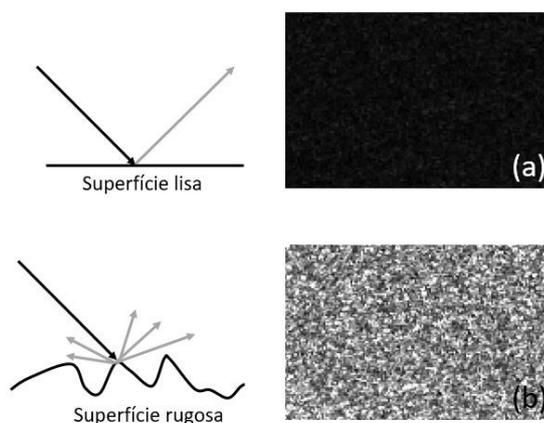
Os sensores SAR são do tipo ativo, ou seja, não dependem da energia eletromagnética do Sol para produzir e registrar dados, como é o caso dos sensores passivos (ópticos) que dependem da energia solar para registrar as imagens. Portanto, os sensores SAR podem realizar o imageamento tanto durante o período do dia quanto no período noturno. Isto é possível porque trabalham com o pulso de energia na faixa de micro-ondas, a qual interage com a superfície do terreno produzindo retroespalhamento da energia, que retorna ao receptor do sensor SAR. Uma vantagem deste comprimento de onda, a depender da banda, é a possibilidade de ultrapassar as nuvens e penetrar na estrutura das copas de árvores, minimizando sua interferência nos dados gerados (Jensen, 2009). Este é um grande diferencial dos sensores passivos em relação aos sensores ativos. A **Tabela 1** mostra as bandas espectrais existentes nos sensores de radar SAR.

**Tabela 1** – Principais bandas dos sensores SAR. (Fonte: Jensen, 2009 - adaptado)

Bandas na faixa de micro-ondas (RADAR)	Comprimento de onda em cm	Frequência em GHz
K	0,75 – 2,4	40,0 – 12,5
X	2,4 – 3,8	12,5 – 8,0
C	3,9 – 7,5	8,0 – 4,0
S	7,5 – 15,0	4,0 – 2,0
L	15,0 – 30,0	2,0 – 1,0
P	30,0 – 100,0	1,0 – 0,3

Além das características dos comprimentos de ondas e frequência, as imagens de radar apresentam componentes específicas no que tange a sua energia eletromagnética, os pulsos de energia são enviados de forma polarizada, sendo nos sentidos: Horizontal (H) e Vertical (V). As energias polarizadas emitidas e recebidas pelos sensores SAR podem ser das seguintes formas de polaridade: HH – envio e retorno de energia polarizada horizontalmente; HV – envio de energia polarizada horizontalmente e retorna verticalmente; VV – envio e retorno de energia polarizada verticalmente; VH – envio de energia polarizada verticalmente e retorna horizontalmente (Jensen, 2009).

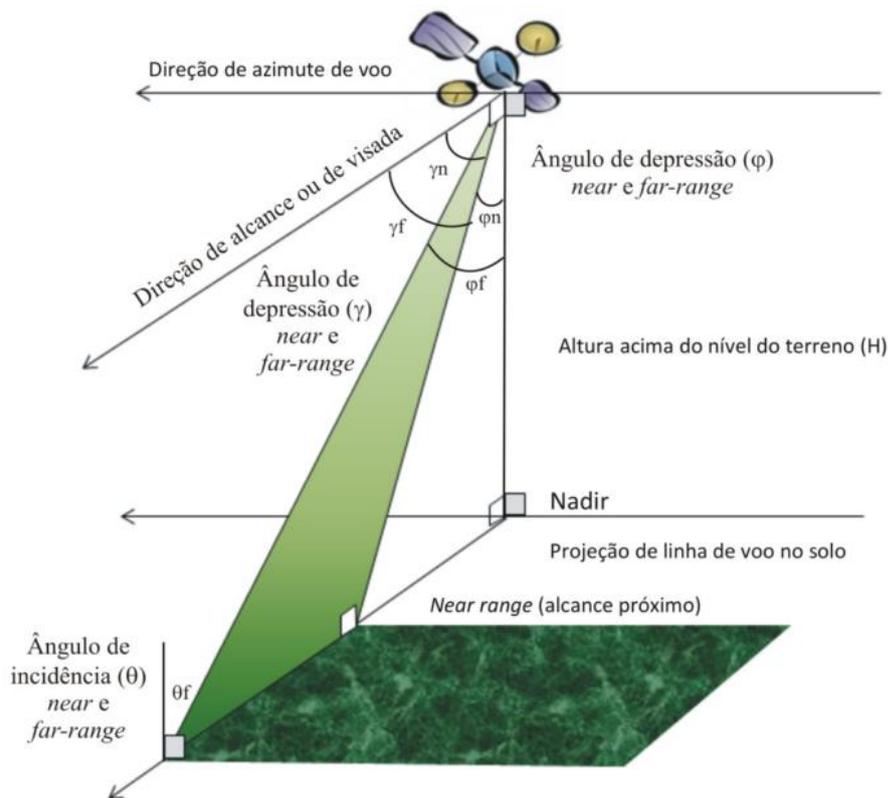
Ao encontrar qualquer objeto na superfície terrestre, as ondas emitidas pelos sensores SAR, refletem a rugosidade e ocasionam diferentes formas de retroespalhamentos, a depender da sua natureza física. Diferentes feições da superfície terrestre resultam numa determinada característica ao retornar a onda refletida. Superfícies lisas costumam apresentar imagens escuras, pois o retroespalhamento é especular, enquanto superfícies rugosas tendem a ser mais claras, pois o retroespalhamento apresenta de forma multivariada, conforme ilustrado na **Figura 2**. Além disso, podemos mencionar o efeito conhecido como reflexão de canto, ou *double bounce*, no qual ocorre o retroespalhamento sobre duas superfícies posicionadas a 90° (tronco e superfície d'água, por exemplo) (Arnesen, 2012).



**Figura 2** – Efeitos da rugosidade na superfície: (a) superfície lisa, reflexão especular; (b) superfície rugosa, reflexão difusa.

A direção de azimute gera influência nos resultados obtidos através do efeito do pulso de energia emitida pelo sensor de radar, pois no caso, este parâmetro é a indicação do sentido da linha de voo ou órbita no qual o sensor está acoplado. A direção de alcance (*range*), também denominada de visada, é a relação do alcance da imagem SAR sobre o terreno. O ângulo de depressão é medido a partir do plano horizontal e o pulso de energia da antena SAR ao longo da visada. Este ângulo pode ser do alcance próximo (*near range*) e do alcance distante (*far range*), já a média destes ângulos é determinada pelo ponto médio na imagem. O ângulo de incidência é medido a partir do pulso de energia e a linha perpendicular à superfície terrestre.

Numa situação hipotética de uma superfície plana, o ângulo de incidência e o ângulo de depressão seriam complementares. No entanto, em imagens geradas por sensores a bordo de satélites orbitais esta situação não é verdadeira, pois a curvatura terrestre e a rugosidade do relevo faz com que estes ângulos não sejam complementares. A **Figura 3**, melhor ilustra as informações das características geométrica de uma imagem de radar.



**Figura 3** – Características geométricas de uma imagem de radar (Fonte: Maciel, 2012)

A constante dielétrica diz respeito à capacidade dos materiais alvos do pulso de energia eletromagnética em conduzir a energia elétrica (Jensen, 2009). Superfícies com baixo índice de umidade tem a constante dielétrica que variam de 3 a 8 na região do espectro das micro-ondas, já superfícies úmidas apresentam um elevado valor de constante dielétrica (Jensen, 2009). Isto contribui para analisar as imagens de SAR, uma que vez a influência da constante dielétrica sobre superfície úmida é extremamente alta, o que auxilia trabalhos envolvendo a identificação de áreas de alagamento.

Outro aspecto importante encontrado nas imagens SAR é o padrão com aspecto granuloso conhecido como “sal e pimenta”, também chamado de efeito *speckle*. Este efeito está presente devido às condições próprias das ondas de radar, que atuam na faixa de micro-ondas, e ocasionam uma interferência aleatória nos alvos imageados e que, conseqüentemente, causa uma formação igualmente aleatória de áreas escuras e claras entre os pixels (Jensen, 2009). Para amenizar o efeito *speckle*, utiliza-se filtros espectrais adaptativos de forma a melhorar a recombinação entre os pixels, e assim, amenizar este efeito tipicamente existente em imagens SAR.

### 3.3 – Aplicações com imagens de radar

Estudos recentes comprovam a eficácia dos sensores SAR para diversas finalidades, dentre elas podemos mencionar as pesquisas que abordam a questão da degradação florestal causada por queimadas (Martins et al., 2016); mapeamento de vegetação (Urbazaev et.al. 2015); análise geomorfológica e monitoramento de movimentos de terra (Schlögel et al., 2015); estudos urbanos servindo de insumo para um planejamento urbano e regional (Zhang et al., 2016); e identificação de ambientes inundados, como é o caso da proposta desta pesquisa. Estudos de monitoramento de inundação de rios de grandes extensões vem utilizando imagens SAR com bons resultados (Dellepiane & Angiati, 2012; Arnesen et al. 2013; Zhao et al. 2014).

Diversos tipos de técnicas de processamentos digitais de imagens têm sido utilizados: etapas de calibração das imagens, redução do ruído do tipo *speckle*, análise do histograma e classificação por meio de diversos algoritmos e métodos. Hess et al. (2015) utilizou imagens SAR do projeto JERS-1, adquiridas entre outubro e novembro de 1995 para mapeamento de áreas alagadas na bacia do Amazonas e demonstrou bons resultados para o mapeamento em regiões tropicais. Os estudos que abordam a problemática de identificação de ambientes de inundação com uso de imagens SAR, revelam que a banda L com polaridade HH é o mais adequado para este tipo de trabalho (Arnesen et al., 2013; Hess et al. 2003; White et al., 2015). No entanto, a depender dos condicionantes do ambiente, com suas características de uso e cobertura do solo, outras bandas e polarizações podem ser utilizadas a fim de auxiliar possíveis dificuldades de classificação. Dados complementares também são importantes para a interpretação das imagens SAR e subsequente etapa de classificação, como é o caso da contribuição das próprias imagens ópticas, que geralmente são úteis para aferir a definição de “água aberta” e de outras unidades de paisagem existente na região, muito comum nos estudos sobre o tema (Arnesen et al., 2013).

A etapa de filtros espectrais adaptativos para eliminar o ruído *speckle* é fundamental para alcançar uma boa classificação, e assim, definir com melhor eficiência as áreas de inundação. Os tratamentos de dados SAR apresentam uma variedade de filtros adaptativos, tais como: filtro de Lee (Zhao et al., 2014; Dellepiane & Angiati, 2012; Carvalho Júnior et al., 2014), filtro mediana (Carvalho Júnior et al., 2014; Hess et al., 1995), filtro de mínima quadrática média de erros (Carvalho Jr et al., 2014); filtro de Frost (Dellepiane & Angiati, 2012), filtro Gabor (Carvalho Júnior et al., 2014), filtro Gamma (Giustarini et al., 2013; Maciel,

2012; Costa & Telmer, 2006), entre outros. Novas abordagens de filtros espectrais vêm sendo desenvolvida em pesquisas recentes, no qual podemos citar o trabalho de Carvalho Júnior (2014) que apresenta uma Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP) para o uso de filtros espectrais em imagens SAR. Este procedimento obteve bons resultados para o estudo da cobertura e uso da terra na Amazônia Legal (Maciel, 2012).

Estudo do histograma das imagens SAR também é uma etapa importante em análises envolvendo SR e serve para ajustar e melhorar o contraste das imagens e permitir um processo de melhoria da interpretação visual e de segmentação da imagem (Dellepiane & Angiati, 2012). A curva do histograma possibilita uma melhor classificação das imagens, podendo ser por meio dos métodos de mapeador espectral de ângulo (SAM), mapeador de correção espectral (SCM) (Carvalho Júnior et al., 2014), aplicação do algoritmo Random Forest (RF) (Zhao et al., 2014; Fu et al., 2017; Furtado et al., 2016), aplicação do algoritmo Support Vector Machine (SVM) (Irion et al., 2016; Cánovas-García, 2015).

A etapa de classificação geralmente é baseada nas feições extraídas dos domínios espectral, espacial e/ou temporal (Kasischke et al., 1997). No que tange aos estudos sobre classificação para identificação de áreas de inundação, as pesquisas aplicam definições de classes para as feições indicadas nas imagens, como por exemplo, a pesquisa de Arnesen et al. (2013) que utilizou cinco classes para classificação das imagens SAR, sendo elas: água aberta, macrófitas, floresta inundada, floresta não-inundada e solo. Por outro lado, Zhao et al. (2014) aplicou também cinco classes: água aberta, pasto, depósito aluvial, pântano e floresta. A definição das classes está condicionada aos mecanismos de retroespalhamento indicado no seu histograma refletindo as diferentes feições da superfície terrestre identificadas e as particularidades regionais encontradas.

Estudos de análise temporal de imagens SAR tem demonstrado resultados positivos em diferentes regiões brasileiras, como nos rios Purus, Solimões e Negro (Alsdorf et al. 2000; Frappart et al. 2005), rio Amazonas (Alsdorf et al., 2007, 2010; Arnesen et al. 2013), e planície do Pantanal (Costa & Telmer, 2006; Evans et al. 2010), o que permite afirmar que muitos trabalhos utilizando imagens SAR para predição de inundação já ocorreram tendo como a análise temporal um importante método para alcançar tal objetivo.

## 4 – ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na região de confluência do rio Javaés com o rio Araguaia, na planície de inundação do rio Araguaia, também conhecida como “ilha do bananal”. As imagens adquiridas para esta pesquisa estão localizadas entre as Latitudes 9,5°S e 10,5°S e Longitudes 49,5°W e 50,5°W (**Figura 4**). A escolha desta área justifica-se pela especificidade da região, pois ela apresenta uma extensa planície de inundação e possui intensos conflitos fundiários.

O rio Araguaia está inserido na Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia (RHTA), que consiste na maior bacia inserida totalmente em território brasileiro e a segunda maior em área e volume de água, inferior apenas à Região Hidrográfica do Amazonas (MMA, 2009). A RHTA abrange aproximadamente 11% do território nacional, incluindo os Estados de Goiás, Mato Grosso, Tocantins, Pará, Maranhão e Distrito Federal, e possui uma área de drenagem correspondente a cerca de 918.822 km<sup>2</sup>, sendo que apenas a bacia do rio Araguaia representa 42% (385.060 km<sup>2</sup>) (MMA, 2009).

A planície do bananal é considerada a maior planície fluvial do mundo e consta na relação de zonas úmidas de importância internacional pela convenção Ramsar (Ramsar Convention, 1971), bem como apresenta uma região de importância para conservação da biodiversidade aquática devido à diversidade existente destes ambientes (Morais et al. 2008). A região é um ecótono entre os biomas do Cerrado e a Amazônia, possuindo uma rica biodiversidade por ser área de transição, com características fitossociológicas destes biomas. No sentido de incentivar à preservação e a conservação da sociobiodiversidade existente, foram criadas Unidades de Conservação e Terras Indígenas.

O clima na bacia do Araguaia é tropical e possui períodos bem definidos de chuva (novembro a março) e estiagem (junho a agosto), com índice pluviométrico anual de 1.700 mm e temperaturas médias mensais entre 24<sup>o</sup> e 26<sup>o</sup> C (MMA, 2009). A amplitude de inundação varia de 4 a 7 metros (Irion, 2016). A classificação climática de Koppen é o tipo Aw, úmido megatérmico, com período seco de 4 a 5 meses (Aquino et. Al., 2005; MMA, 2001), influenciado pela massa de ar equatorial continental e pela zona de convergência intertropical. A bacia hidrográfica possui uma diferença longitudinal na distribuição espacial das chuvas, sendo assim genericamente distribuída: alto Araguaia (1500 mm anuais), médio Araguaia (1000 mm anuais), e baixo Araguaia (2000 mm anuais) (Aquino et al. 2005; Latrubesse & Stevaux, 2006).

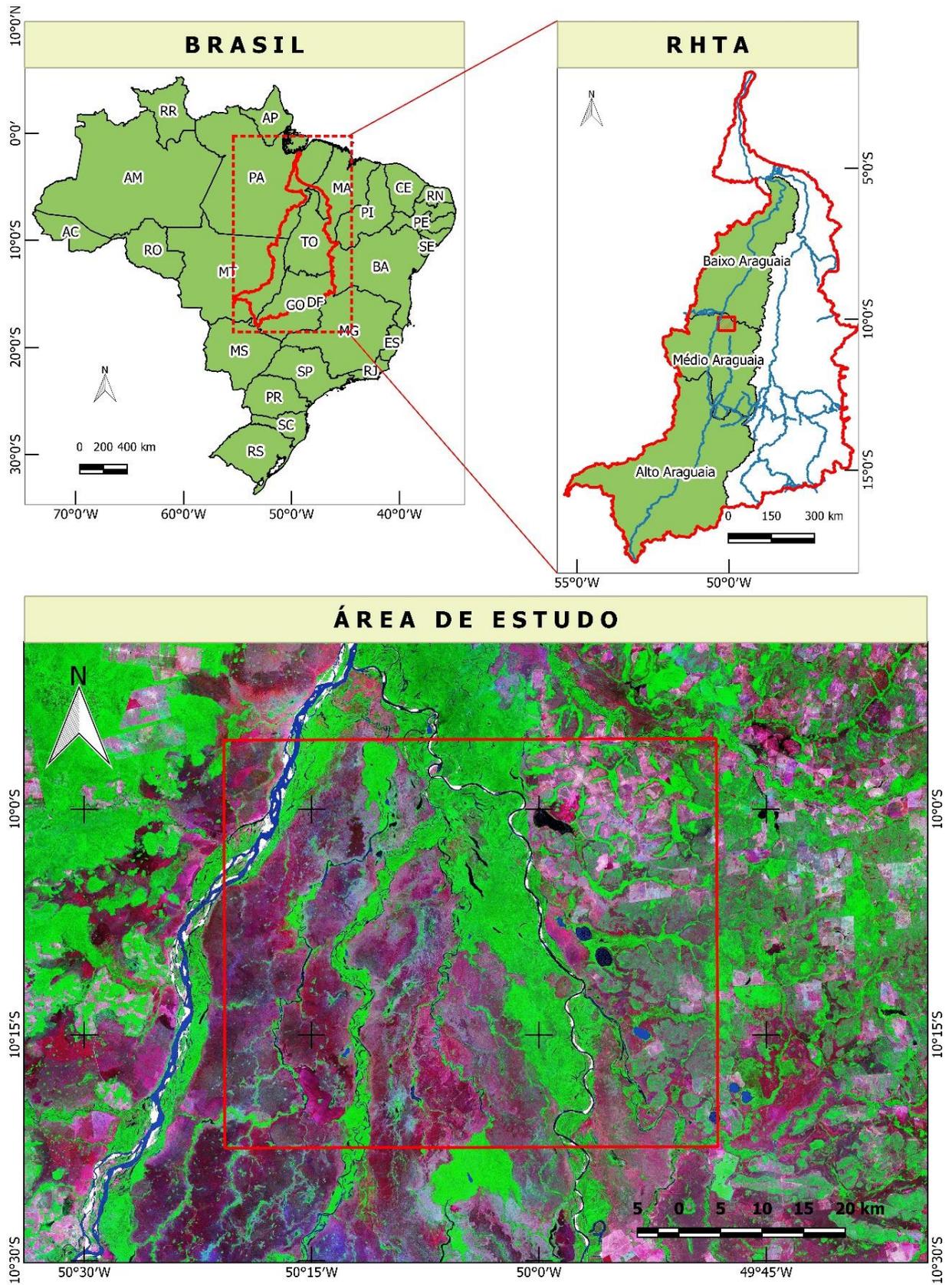


Figura 4 – Mapa de localização da área de estudo.

O alto Araguaia é a região de nascentes, onde o canal do rio percorre vales encaixados de rochas basálticas e sedimentares controlados por lineamentos estruturais do ciclo tectônico Transbrasiliano (Latrubesse & Stevaux, 2006). O trecho médio apresenta a extensa planície da ilha do bananal com importantes rios tributários, podendo citar os rios das Mortes, Vermelho, Crixás, entre outros (Latrubesse & Stevaux, 2006). O baixo Araguaia ocorre à jusante da planície do Bananal e se estende até o seu encontro com o rio Tocantins, não evidencia planícies de inundação devido ao forte controle estrutural do canal do rio encaixado em rochas pré-cambrianas (Latrubesse & Stevaux, 2006).

A planície do Bananal é uma ampla faixa de deposição sedimentar adjacente ao canal do rio Araguaia com uma área de aproximadamente 90.000 km<sup>2</sup>, correspondendo 23% da bacia do Araguaia, contendo paleomeandros, canais abandonados e lagoas circulares (MMA, 2001; Irion, 2016). A planície apresenta duas feições geomorfológicas características: (i) depósitos aluvionais ao longo dos vales, caracterizados por diques marginais, ilhas e lagos de meandros; (ii) depósitos aluvionais que se encontram nos interflúvios, caracterizadas por lagoas temporárias e/ou permanente e drenagem indecisa constituindo uma área periodicamente inundável (MMA, 2001). Estudos recentes a respeito de informações sobre as características sedimentares da planície do bananal indicam que em regiões de maiores registros geológicos de sedimentação apresentam uma profundidade de cerca de 2.000 metros de camadas sedimentares, compreendidos entre as eras Paleozóica até o início do Quaternário (Pleistoceno), localizado entre os municípios de Luiz Alves e o sudeste da ilha do Bananal (Irion et al., 2016), esta informação constata que a planície do bananal tem uma característica de inundação há bastante tempo, justificando sua condição estrutural de alagamento bem desenvolvida.

A vegetação da planície do Bananal apresenta uma característica peculiar, típico de ambientes de inundação. Segundo levantamento fitossociológico e florístico realizado por Latrubesse & Stevaux (2006), consta que nesta região existem quatro unidades de vegetação: (a) vegetação pioneira herbácea; (b) vegetação arbustiva-arbórea; (c) vegetação arbórea; (d) vegetação antropizada (Latrubesse & Stevaux, 2006). A unidade de vegetação caracterizada como pioneira herbácea predominada por espécies de gramíneas e está mais vinculada diretamente ao rio Araguaia, pois estas vegetações recebem sedimentos argilosos ricos em matéria orgânica das enchentes ordinárias do rio, porém na época da seca as gramíneas, ciperáceas e alguns arbustos desenvolvem-se rapidamente. A unidade de vegetação arbustiva-arbórea está sujeita a uma estabilidade maior no processo de crescimento das espécies, propiciando o desenvolvimento de algumas espécies maiores, sendo predominante as arbustivas

e arbóreas. Esta unidade de vegetação predomina em regiões de meandros abandonados e também estão sujeitos à inundação periódica do rio. Já a unidade de vegetação arbórea contém espécies com uma estabilidade maior comparado as outras unidades vegetacionais e uma diversidade de espécies, embora mantêm-se a influência das enchentes ordinárias do rio. Por fim, a unidade vegetacional antropizada corresponde a uma classificação de todas as vegetações oriundas de intervenções humanas na região, incluindo-se aí as pastagens, lavouras, arrozais, entre outras (Latrubresse & Stevaux, 2006).

Para fins de definição de nomenclaturas das unidades de paisagem existente na área de estudo, serão consideradas as terminologias adotadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no qual as seguintes vegetações são descritas na área de estudo: (a) Savana Parque com Floresta de Galeria; (b) Savana Arborizada com Floresta de Galeria; (c) Floresta Estacional Aluvial; (d) Pastagem Cultivada (IBGE, 2012). Para simplificar as nomenclaturas dos tipos de vegetações encontradas, a proposta das unidades de paisagem deste trabalho está indicada na **Tabela 2**.

**Tabela 2** – Nomenclaturas de vegetações (Fonte: IBGE, 2012 - adaptado)

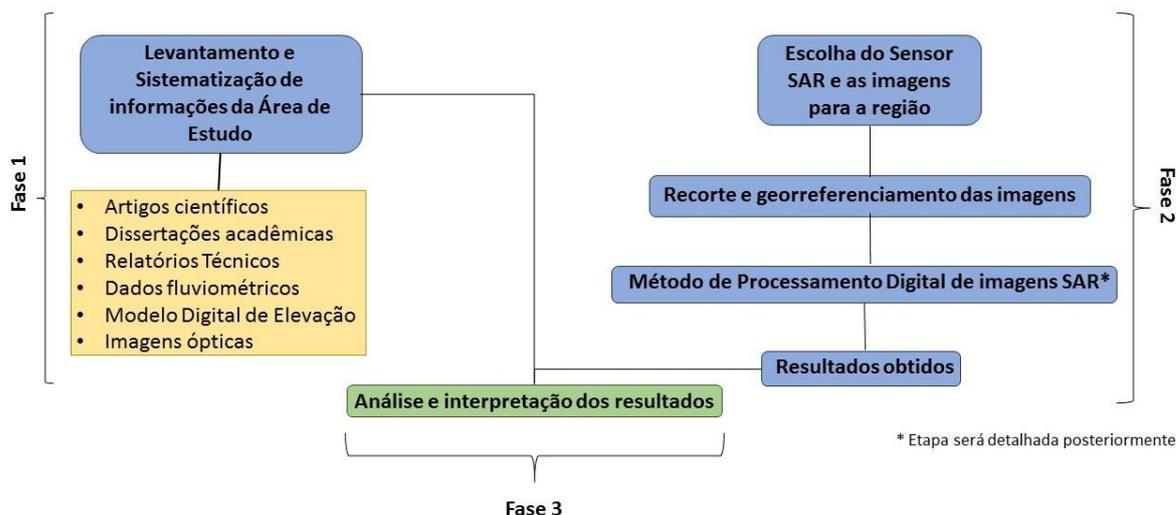
Nomenclatura PROBIO	Nomenclatura adotada
Savana Parque com Floresta de Galeria	Savana Parque
Savana arborizada com Floresta de Galeria	Savana Arborizada
Floresta Estacional Aluvial	Floresta
Pastagem Cultivada	Uso Agropecuário

Devido as características ambientais específicas dessa região, uma Unidade de Conservação de Proteção Integral foi instituída, disposto no Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) como Parque Nacional do Araguaia (Parna Araguaia). O Parna Araguaia foi criado pelo Decreto nº 47.570, de 31 de dezembro de 1959, cujo objetivo inicial era prioritariamente preservar a região da ilha do Bananal. No entanto, o Conselho Consultivo do Parque como mecanismo para fazer cumprir os objetivos primários da Unidade de Conservação (UC) foi criado apenas em 2011 por meio da Portaria nº 103 de 6 de dezembro. Além do Parque Nacional do Araguaia, a região apresenta uma diversidade de etnias indígenas, incluindo algumas Terras Indígenas (TI) já demarcadas e homologadas pela Fundação Nacional do Índio (FUNAI), sendo elas: Utaria Wyhyna/Iròdu Iràna, Inawebohona, Tapirapé/Karajá, Krahó-Kanela, constituídas pelas etnias predominantes do povo Krahó-Kanela, Javaé e Karajá.

Quanto aos aspectos sociais, a região é palco de intensos conflitos fundiários e socioambientais, principalmente porque integra o “arco do desmatamento” (Fearnside & Graça, 2006), ocasionados pelas construções de rodovias e da expansão de culturas agropastoris predominando a cultura da soja e a criação de gado. Esta situação agrava uma relação territorial de expropriação de terras e assassinatos de lideranças locais que tradicionalmente utilizam os recursos naturais de forma sustentável. O mapeamento dos conflitos socioambientais no estado de Mato Grosso evidencia-se que na região também existem comunidades tradicionais conhecidas como “Retireiros do Araguaia” que utilizam coletivamente a pastagem natural da região associado à várzea do rio Araguaia para criação extensiva de gado (Silva & Sato, 2012).

## 5 – MATERIAIS E MÉTODOS

Diante das questões levantadas acerca da problemática de gestão e monitoramento ambiental dos ambientes de inundação e para alcançar resultados satisfatórios para sua delimitação, os procedimentos metodológicos adotados foram separados em fases (**Figura 5**).



**Figura 5** – Fluxograma metodológico das atividades desenvolvidas.

A primeira fase da pesquisa constou de uma revisão bibliográfica e obtenção dos seguintes dados: (a) leituras das réguas das estações fluviométricas que possibilitou compreender a própria dinâmica hidrológica e seu respectivo pulso de inundação, (b) o MDE que possibilitou a interpretação morfológica da região estudada, e (c) seleção de imagens ópticas disponíveis na área de estudo para a devida interpretação visual.

A segunda fase constou da seleção das imagens de radar e definição das etapas de processamento digital de imagens. Esta pesquisa teve a oportunidade de utilizar imagens do satélite ALOS 2 oriunda da agência espacial Japonesa (JAXA), foram disponibilizadas quatro imagens entre os anos de 2015 e 2016. A partir disto, iniciou-se a etapa do método de processamento digital de imagens SAR que está melhor detalhado no item 5.2 da presente pesquisa.

A terceira fase considerou os resultados do processamento das imagens SAR a partir da interpretação e análise dos dados complementares com o objetivo de chegar ao resultado da dinâmica de inundação.

## 5.1 – Materiais

### 5.1.1 – Sensores PALSAR-2/ALOS 2

As imagens SAR utilizadas são provenientes do sensor PALSAR-2 (*Phased-Array L-Band Synthetic Aperture Radar*) a bordo do satélite ALOS 2 (*Advanced Land Observing Satellite*) desenvolvido pela Agência Espacial Japonesa (*Japan Aerospace Exploration Agency* - JAXA) e lançado no dia 24 de maio de 2014, sucedendo a missão ALOS (Okada et al., 2011; Rosenqvist et al., 2014; Shimada et al., 2010). Uma diferença fundamental entre os projetos ALOS e ALOS-2 é que o primeiro possuía três sensores, sendo eles: PRISM (imagens pancromáticas com três ângulos de visada que permite gerar o Modelo Digital de Elevação); AVNIR-2 (apresenta bandas multiespectrais da faixa do visível ao infravermelho próximo, possibilitando a geração de índice de vegetação e composição RGB); e o PALSAR (imagens de radar, banda L, ideal para trabalhos que necessitem de análises que ultrapassem a cobertura vegetal e de nuvens) (Arnesen et al., 2013; Hess et al. 2003). Por outro lado, o satélite ALOS-2 apresenta a bordo apenas o sensor PALSAR 2 que possibilita a continuidade dos registros realizados pelo sensor PALSAR/ALOS. A **Tabela 3** apresentam as especificações técnicas do sensor PALSAR-2. As imagens do projeto ALOS possuem uma gama de usos e aplicações, principalmente no monitoramento dos seguintes alvos: (a) desastres naturais ou antrópicos; (b) uso e cobertura do solo; (c) plantações agrícolas; (d) cobertura florestal (JAXA, 2016). Dentre este escopo de funcionalidades e aplicações, o monitoramento do regime de inundação de grandes rios também é contemplado com o uso destas imagens.

**Tabela 3** – Especificações do sensor PALSAR-2/ALOS 2 (Fonte: Okada et al. 2011 - adaptado)

Item	Parâmetro	Observações
Frequência	Banda L	1.257,5 MHz
Largura de banda	84 MHz (máximo)	
Ângulo de Incidência	8 a 70°	
Modo de Observação	Spotlight / Strip-map / Scan SAR	
Resolução (m)	3 x 1 / 3 x 3 / 6 x 6 / 10 x 10 / 100 x 100	Spotlight / Ultra-Fine / High-Sensitive / Fine / ScanSAR
Largura da faixa (Km)	25 x 25 / 50 / 50 / 70 / 350 / 490	
Direção de visada	Direita e esquerda	
Polaridade	Simplex / Duplo / Polaridade completa	✓ Modo de polaridade

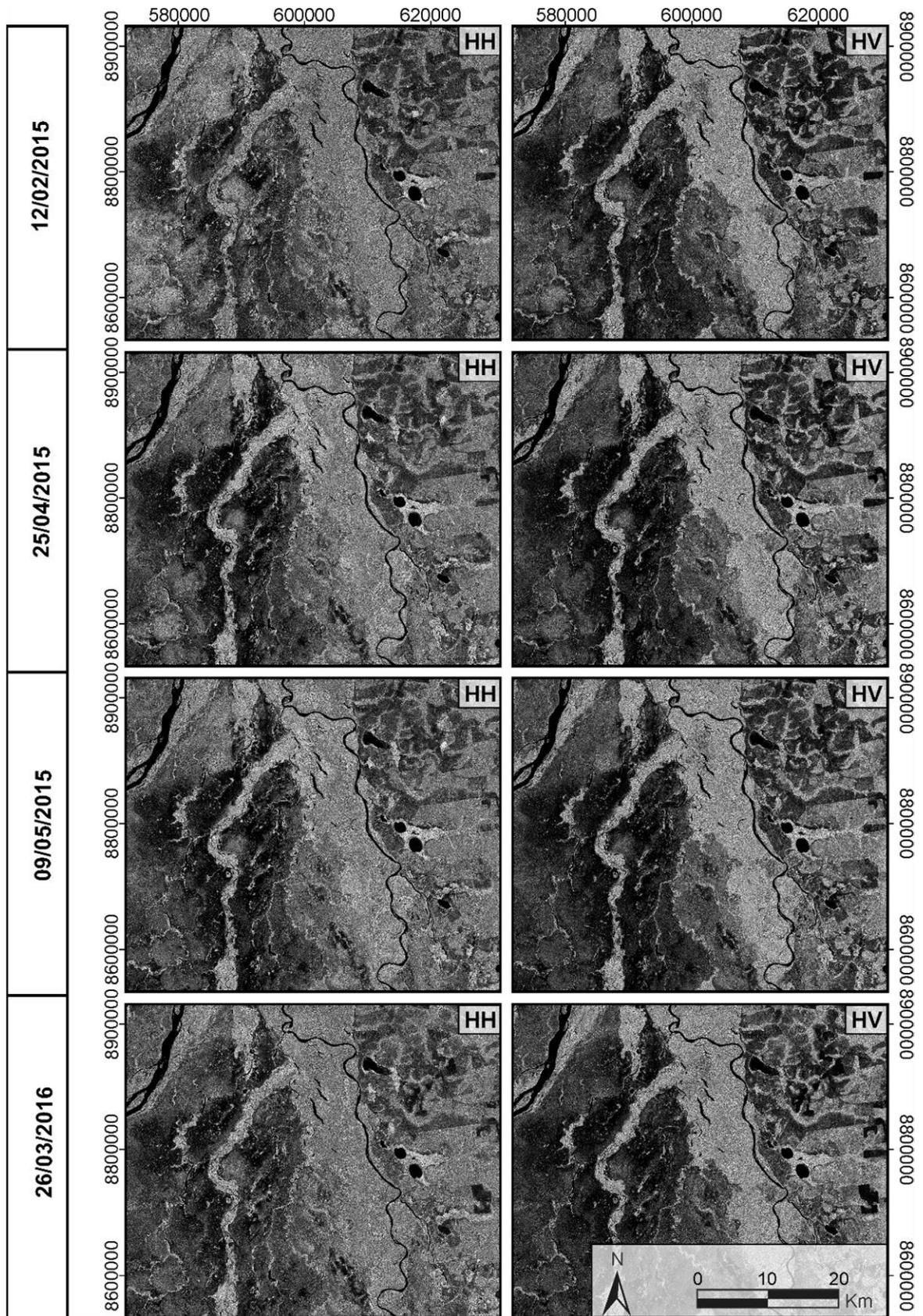
		compacta opcional disponível ✓ Largura da faixa é limitada na polaridade completa
Antena SAR	Antena de matriz ativa	3 m (Elevação) x 10 m (Azimute)

Os dados gerados pelo sensor PALSAR-2/ALOS 2 estão disponibilizados em diferentes níveis de processamento, sendo eles: 1.1 / 1.5 / 3.1 (JAXA, 2016). Foram adquiridas quatro imagens no nível de processamento 1.5 com os seguintes pré-processamentos já realizados: (a) conversão do alcance inclinado para alcance no terreno; (b) imagem geocodificada e georreferenciada; e (c) dados convertidos para amplitude (JAXA, 2016). As imagens são referentes à banda L com polaridade HH e HV no modo de imageamento FBD (Fine Beam Dual Polarization) e resolução espacial de 6,25 metros, o Sistema de Referência de Coordenadas estão definidas como Datum WGS 84 / UTM 22 Sul.

As quatro imagens correspondem a uma mesma área ao longo do período 2015-2016, contendo direções orbitais ascendente e descendente (**Tabela 4**). Todas as imagens foram recortadas através de um perímetro que recobre todas as imagens, de forma a compreender uma região única, independente da sua direção de imageamento (ascendente e descendente) (**Figura 6**).

**Tabela 4** – Informações das imagens PALSAR-2/ALOS 2 adquiridas

Cenas	SceneID	Resolução espacial	Sistema UTM	Off Nadir	Polarimetria	Data do imageamento	Direção de imageamento
01	ALOS2039036980-150212	6,25 m	Zona 22 Sul	28,6o	HH / HV	12 / 02 / 2015	Ascendente
02	ALOS2049753820-150425	6,25 m	Zona 22 Sul	32,9o	HH / HV	25 / 04 / 2015	Descendente
03	ALOS2051823820-150509	6,25 m	Zona 22 Sul	32,9o	HH / HV	09 / 05 / 2015	Descendente
04	ALOS2099433820-160326	6,25 m	Zona 22 Sul	32,8o	HH / HV	26 / 03 / 2016	Descendente



**Figura 6** – Relação das imagens PALSAR-2/ALOS 2 adquiridas.

### 5.1.2 – Dados Complementares

Diversos estudos científicos com imagens SAR apoiam seus resultados com informações de dados complementares para uma melhor aferição dos objetos mapeados (Hess et al., 2015; Furtado et al., 2016; Arnesen et al., 2013). Nesta pesquisa, foi utilizada imagem óptica OLI-Landsat 8 (30 metros de resolução espacial), dados de estação fluviométrica próxima a área de estudo e MDE proveniente da Sentinel 1-A.

A utilização de imagens de sensores ópticos justifica-se devido a facilidade de visualização das feições representadas nas imagens, auxiliando na classificação das imagens SAR e na identificação das características de uso e cobertura do solo. Dessa forma, o espectro na faixa do visível da região da imagem óptica auxilia na interpretação visual para uma classificação manual que serve para comparar com o mapeamento feito através das imagens SAR. Portanto, foi escolhida uma imagem OLI-Landsat 8 com baixa porcentagem de nuvens e com registro temporal próximo aos registros das imagens SAR (**Tabela 5**). A imagem óptica foi devidamente recortada de forma a recobrir a mesma área de estudo.

**Tabela 5** – Informação da imagem óptica utilizada

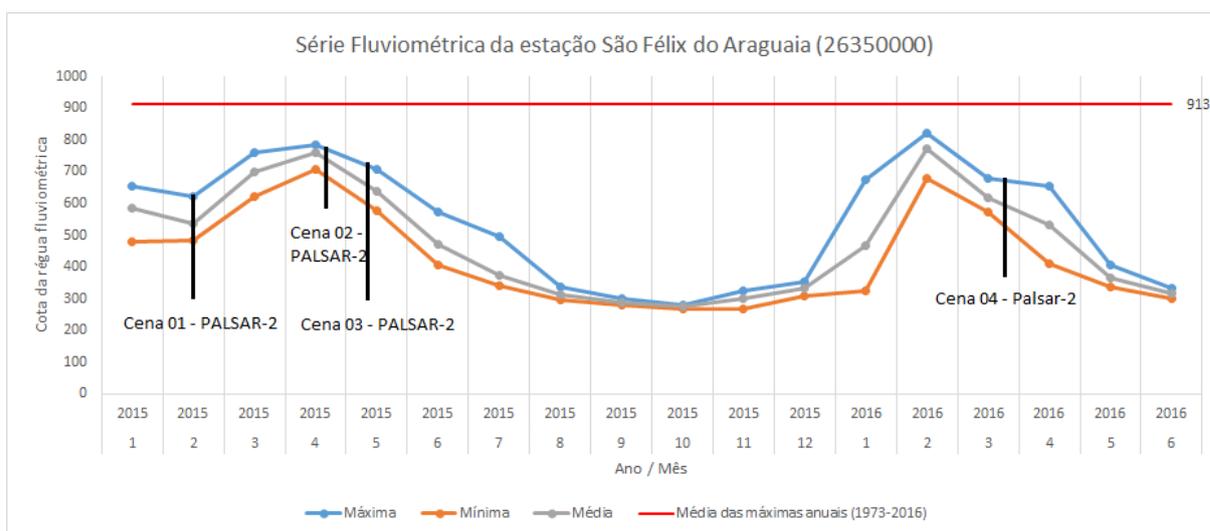
Sensor óptico	Imagem	Path/Row	Data
OLI-Landsat 8	LC8 223067 2015150 LGN00	223/67	30/05/2015

Foi utilizado dados da estação fluviométrica que está localizada no município de São Félix do Araguaia à montante da área de estudo. Os dados foram obtidos no site da hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) da Agência Nacional de Águas (ANA). A série histórica da estação fluviométrica de São Félix do Araguaia (1973-2016) permitiu calcular a média das enchentes ordinárias do rio Araguaia, conforme os procedimentos técnicos adotados na Orientação Normativa que disciplina a demarcação de Terrenos Marginais - ON-GEADE-003<sup>1</sup> (MPOG, 2001), bem como a identificação pontual da cota correspondente a cada imagem SAR adquirida (**Tabela 6**). Desta forma foi possível ter uma estimativa das enchentes, com base nas informações fluviométricas aliadas aos registros das imagens disponíveis para esta

---

<sup>1</sup> ON-GEADE 003 no seu item 4.10 normatiza o cálculo da média das Enchentes Ordinária, tendo como fundamento o valor das cotas máximas anuais com período de recorrência igual a 3 anos, excluindo as enchentes com recorrência igual ou superior a 20 anos. A partir disto, calcula-se a média aritmética da cota máxima anual referente às enchentes máximas com períodos de recorrência entre 3 a 20 anos, chegando ao resultado do valor da cota das observações fluviométricas referente à média das Enchentes Ordinárias.

pesquisa e avaliar de que forma as imagens estão representando a enchente do rio Araguaia. A partir da análise da série histórica da estação foi possível identificar as cotas de inundação nas datas das imagens PALSAR-2/ALOS 2, bem como a identificação da média das máximas anuais da série histórica registrada, com o valor de 913 cm (**Figura 7**). O gráfico do ciclo hidrológico do rio Araguaia evidencia que a época do ano com a maior cota de inundação ocorre entre fevereiro a maio, condizentes com as datas das imagens adquiridas.



**Figura 7** – Gráfico do regime fluviométrico do Rio Araguaia com as indicações das imagens SAR.

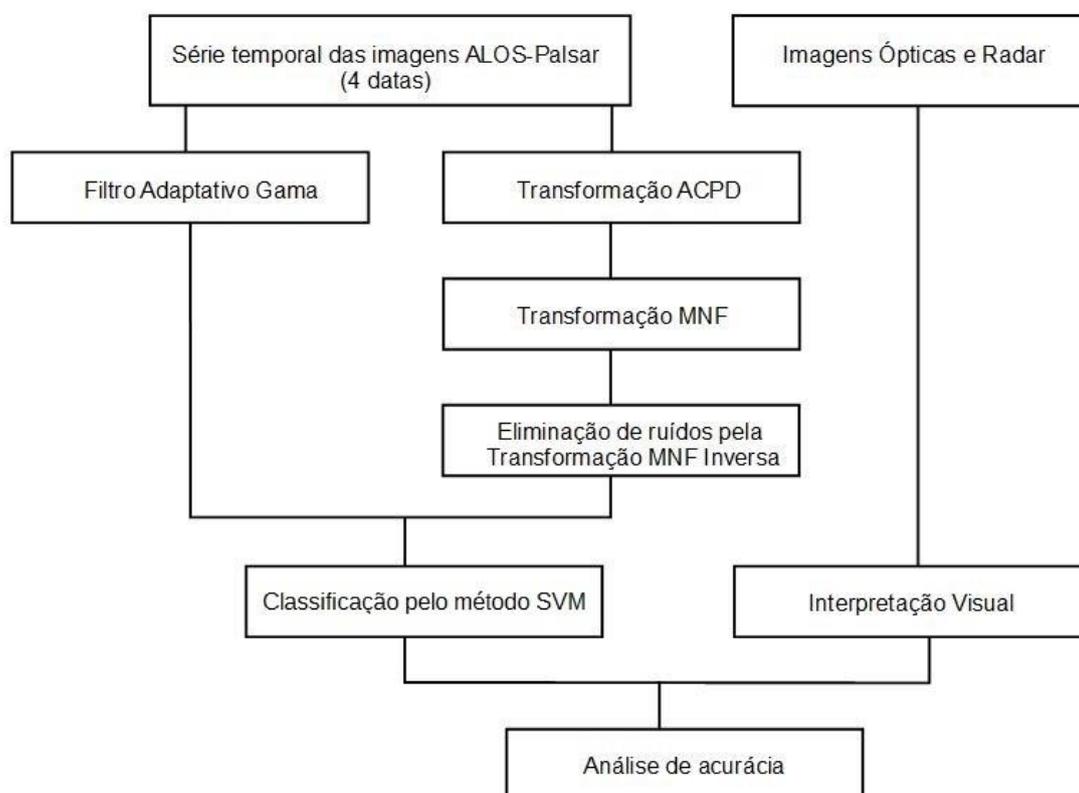
**Tabela 6** – Informações das cotas da régua da ANA correspondente as datas das imagens SAR e o valor da cota da média das máximas histórica

Estação Fluviométrica	Média das máximas anuais (LMEO)	Período	
26350000	<b>Cota 913</b>	8/1973 a 2/2016	
Estação Fluviométrica	Imagens SAR	Cota indicada na Estação	Data
26350000	Cena 01	492	12/02/2015
26350000	Cena 02	769	25/04/2015
26350000	Cena 03	678	09/05/2015
26350000	Cena 04	638	26/03/2016

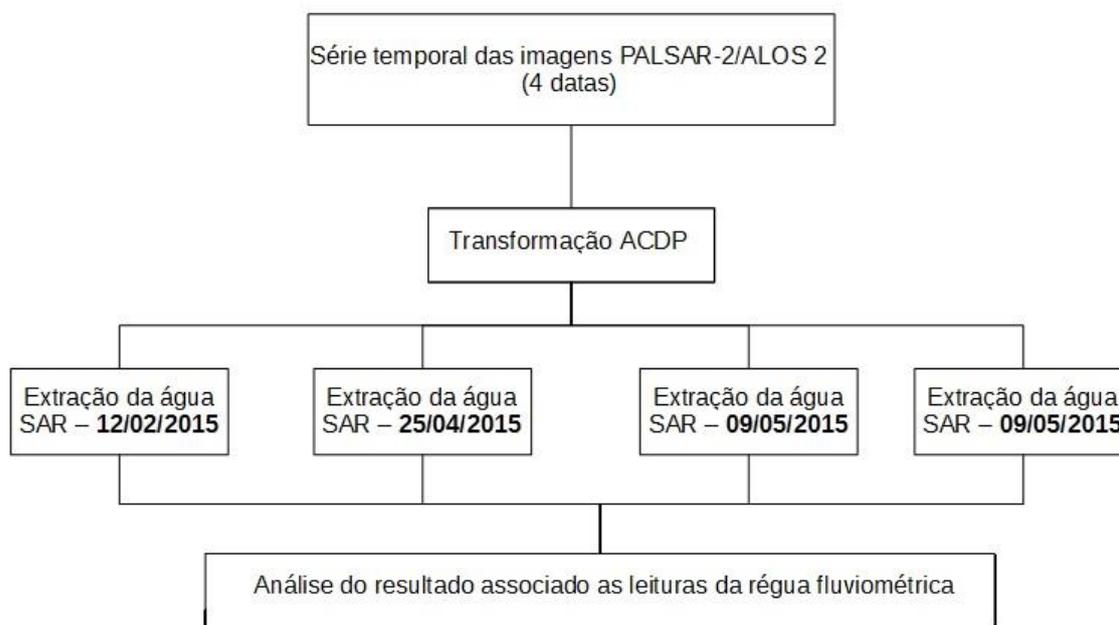
O MDE derivado a partir de interferometria das imagens de radar Sentinel 1-A (resolução espacial de 10 metros) possibilita identificar as feições geomorfológicas com cotas altimétricas mais elevadas, eliminando possíveis confusões na interpretação das zonas úmidas (Hess, 2015; Bates et al., 2006). Para a geração do MDE foi utilizado o programa específico da Agência Espacial Européia (ESA), denominado Sentinel Application Platform (SNAP) (Zuhlke et al. 2015).

## 5.2 – Métodos

As etapas de processamento digital das imagens SAR foram divididas em duas abordagens: (a) tratamento das imagens a partir da série temporal, cujo objetivo é identificar e classificar as diferentes feições de uso e cobertura do solo (**Figura 8**); (b) tratamento individualizado das imagens, cujo objetivo é identificar a dinâmica de inundação extraindo o comportamento da água a partir da CDP-MNF associados as leituras da régua fluviométrica (**Figura 9**).



**Figura 8** – Fluxo metodológico do processamento digital da série temporal de imagens SAR, visando classificar as diferentes feições de uso e cobertura do solo.



**Figura 9** – Fluxo metodológico para o tratamento individualizado de cada imagem SAR, visando identificar a dinâmica de inundação.

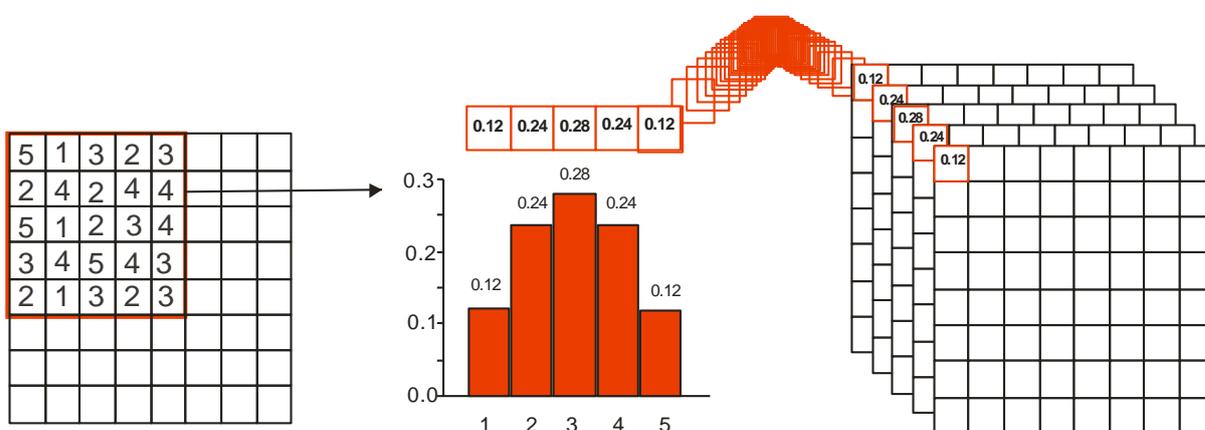
A primeira abordagem prepara os dados para realizar o processamento digital de imagens, incluindo aí: tratamento do ruído, classificação e análise de acurácia. Já a segunda abordagem foi um exercício de interpretação e análise dos dados disponíveis de forma a buscar compreender a dinâmica de inundação. Esses procedimentos estão melhor descritos nos itens subsequentes.

### 5.2.1 – Tratamento do ruído

As imagens SAR geralmente apresentam ruídos do tipo *speckle* responsáveis pelo aspecto granular nas imagens, dificultando uma classificação uniforme. Assim, a filtragem e consequentemente a redução de ruído é uma etapa importante da pesquisa. Nesta pesquisa, foi utilizado o método Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP) proposto por Carvalho Júnior (2014), e o filtro adaptativo Gamma, com vistas a comparar os resultados espectrais de ambos os métodos.

### 5.2.1.1 – Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP)

O ACDP estabelece um histograma de frequência para uma janela móvel que transcorre a imagem, distribuindo o valor de cada categoria do histograma (intervalo de valores) em uma banda específica (**Figura 10**). Desta forma, gera-se uma sequência de imagens, onde a frequência de cada categoria do histograma é representada por uma imagem. No método ACDP, as seguintes variáveis são definidas pelo usuário: (a) número de categorias presentes no histograma e (b) o tamanho da janela.



**Figura 10** – Procedimento para gerar as componentes de densidade de probabilidade: uma janela móvel (no exemplo com dimensão de 5 x 5) calcula o histograma de frequência e estabelece uma sequência de imagens onde cada imagem representa uma componente (Fonte: CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2014).

Com o resultado ACDP realizou-se a junção de todas as imagens com vistas a construir um cubo temporal no qual abrange todas as imagens e suas respectivas componentes. Em seguida, foi aplicado sobre o cubo temporal da ACDP a transformação Minimum Noise Fraction (MNF) (Green *et al.*, 1988) que é um método análogo à Análise de Principais Componentes (APC). O MNF diminui a dimensionalidade dos dados e ordena as componentes em termos de qualidade de imagem, melhorando a relação sinal-ruído (Carvalho Júnior *et al.*, 2014; Maciel 2012; Carvalho Júnior *et al.*, 2002). Este método é usado para determinar a dimensionalidade inerente dos dados de imagem, segregar e equalizar o ruído nos dados e reduzir os requisitos computacionais dos processamentos subsequentes (Rajendran *et al.*, 2016). O procedimento matemático do MNF pode ser dividido em quatro etapas (Carvalho Júnior *et al.*, 2002): (a) obtenção de uma amostra do ruído e cálculo de sua matriz de covariância; (b)

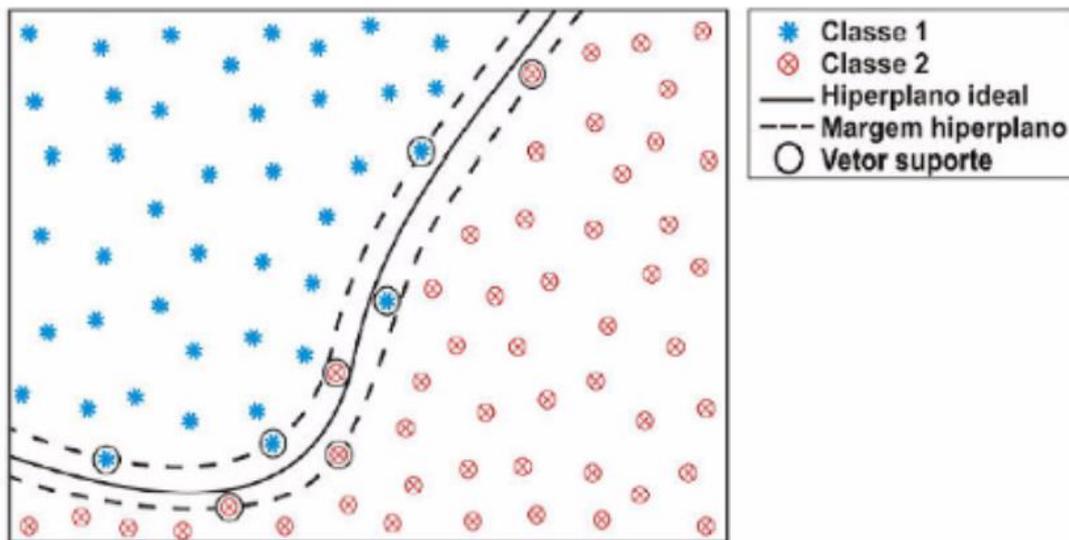
estabelecimento de um índice de fracionamento do ruído; (c) implementação da função de transformação linear nos moldes da APC; e (d) inversão do procedimento do MNF considerando apenas a fração do sinal. A transformação MNF inversa retorna os dados para dimensão original considerando apenas as componentes relativas ao sinal.

#### 5.2.1.2 – Filtro adaptativo Gamma

Com o intuito de comparar os resultados obtidos a partir do CDP-MNF, também foi utilizado o filtro adaptativo Gamma sobre toda a série temporal das imagens SAR. A série temporal utilizada nesta filtragem foi composta pelas imagens polarizadas HH e HV para as quatro datas, totalizando um arquivo com oito bandas (2 cenas para cada data). O filtro gamma é amplamente consolidado no processamento de imagens SAR, no qual tem a função de reduzir a variância do ruído em regiões homogêneas enquanto preserva os limites de diferentes feições (Shi & Fung, 1994).

#### 5.2.2 – Classificação

A classificação das imagens CDP-MNF e das imagens filtradas a partir do Gamma foram realizadas pelo algoritmo Support Vector Machine (SVM), que consiste em uma classificação supervisionada sendo baseada na teoria de aprendizagem estatística. Esta teoria utiliza uma superfície de decisão definidas por vetores amostrais (escolha do operador) identificados e distribuídos, no qual cada superfície lança um voto unitário para a classe. Dessa forma, ocorre a separação das superfícies maximizando a margem de separação entre elas, gerando assim diferentes classes. Esta superfície de decisão é conhecida como hiperplano ideal (*optimal hyperplane*), enquanto os pontos próximos às margens do hiperplano ideal são denominados vetores de suporte (support vectors) (**Figura 11**) (Viana, 2012; Costa et al., 2010). O classificador SVM demonstra ser adequado em imagens complexas, tal como são as imagens SAR (Szuster et al., 2011).



**Figura 11** – Hiperplano de separação entre classes espectrais em um classificador SVM (Fonte: Costa et al., 2010).

Por ser um algoritmo supervisionado, a seleção de amostras de treinamento é necessária para a aprendizagem estatística. O processo de classificação adotou os seguintes procedimentos: (a) levantamento das regiões amostrais em toda a série temporal SAR; (b) aplicação do classificador SVM; e (c) interpretação das classificações geradas associado aos dados complementares.

### 5.2.3 – Análise de acurácia

A análise de acurácia foi obtida através do coeficiente Kappa e da precisão geral das classificações SVM no que diz respeito ao uso e cobertura do solo. A análise da classificação SVM adotou como imagem de comparação a classificação manual realizada através da imagem OLI-Landsat 8. As classes “Savana Parque” e “Savana Parque (Campo úmido)” foram inseridas em uma única classe para as devidas estatísticas de apuração de concordância, uma vez que esta definição diz respeito à dinâmica hídrica que ocorrem nesta unidade de paisagem. Para se alcançar o resultado da acurácia geral da classificação automática, realiza-se a proporção do número de pixels corretamente classificados pelo número total de pixels, enquanto o Kappa é um coeficiente que varia de 0 a 1 representando um índice geral de concordância. A **Tabela 7** demonstra a qualidade da concordância a partir do resultado do coeficiente Kappa.

**Tabela 7** – Interpretação do coeficiente Kappa (Fonte: Landis & Koch, 1977 – adaptado)

<b>Coeficiente Kappa de Concordância</b>	
Valor do coeficiente Kappa	Interpretação
< 0	Sem concordância
0 – 0,19	Concordância pobre
0,20 – 0,39	Concordância fraca
0,40 – 0,59	Concordância moderada
0,60 – 0,79	Concordância substancial
0,80 – 1,00	Concordância quase perfeita

#### **5.2.4 – Análise da dinâmica de inundação**

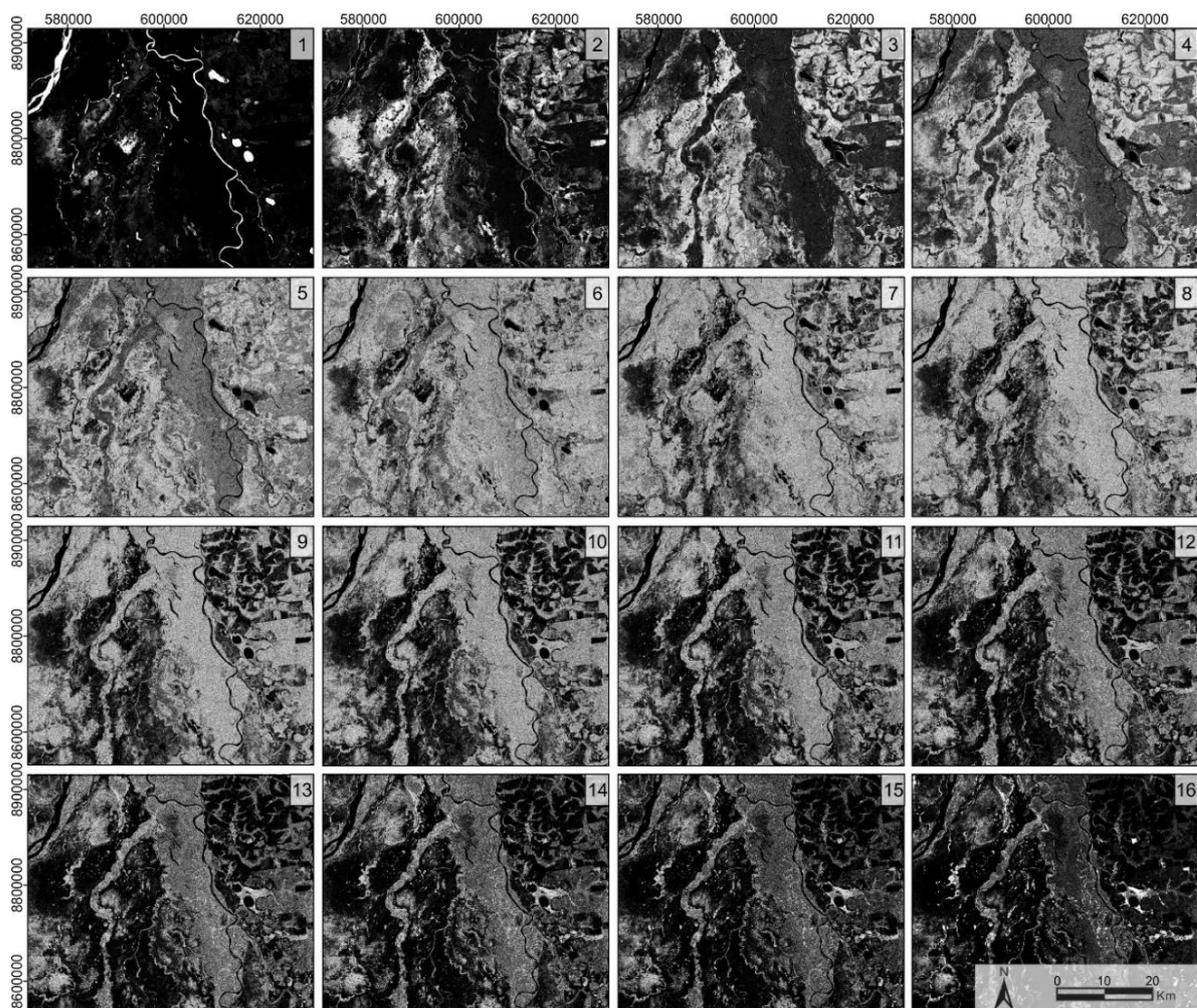
A análise da dinâmica de inundação, a partir dos dados gerados, demonstra o pulso de inundação existente no trecho da ilha do bananal possibilitando estimar a área de inundação existente na região. A interpretação morfológica, com o apoio do MDE, auxilia na identificação de áreas com cotas topográficas elevadas, podendo identificar regiões que podem ser desconsideradas da interpretação de inundação do rio Araguaia e Javaés. A informação topográfica possibilita excluir certas áreas, mesmo apresentando espectro característico da composição de água, pois o objetivo deste trabalho é identificar a dinâmica de inundação do rio. As imagens SAR capturam a umidade independente das condições topográficas, podendo ser proveniente do transbordamento do rio ou de eventuais regiões úmidas que não sofrem a influência do rio.

As informações do sensor PALSAR-2/ALOS 2 foram balizadas com as cotas das estações fluviométricas, permitindo relacionar a distribuição espacial das áreas úmidas com a cota da régua da estação fluviométrica São Félix do Araguaia na data correspondente. A análise temporal das áreas úmidas foi realizada de forma binária (área seca X área úmida), considerando o comportamento da água na primeira componente da ACDP-MNF de todas as imagens disponibilizadas utilizando um *threshold* de 1 - 0,25.

## 6 – RESULTADOS

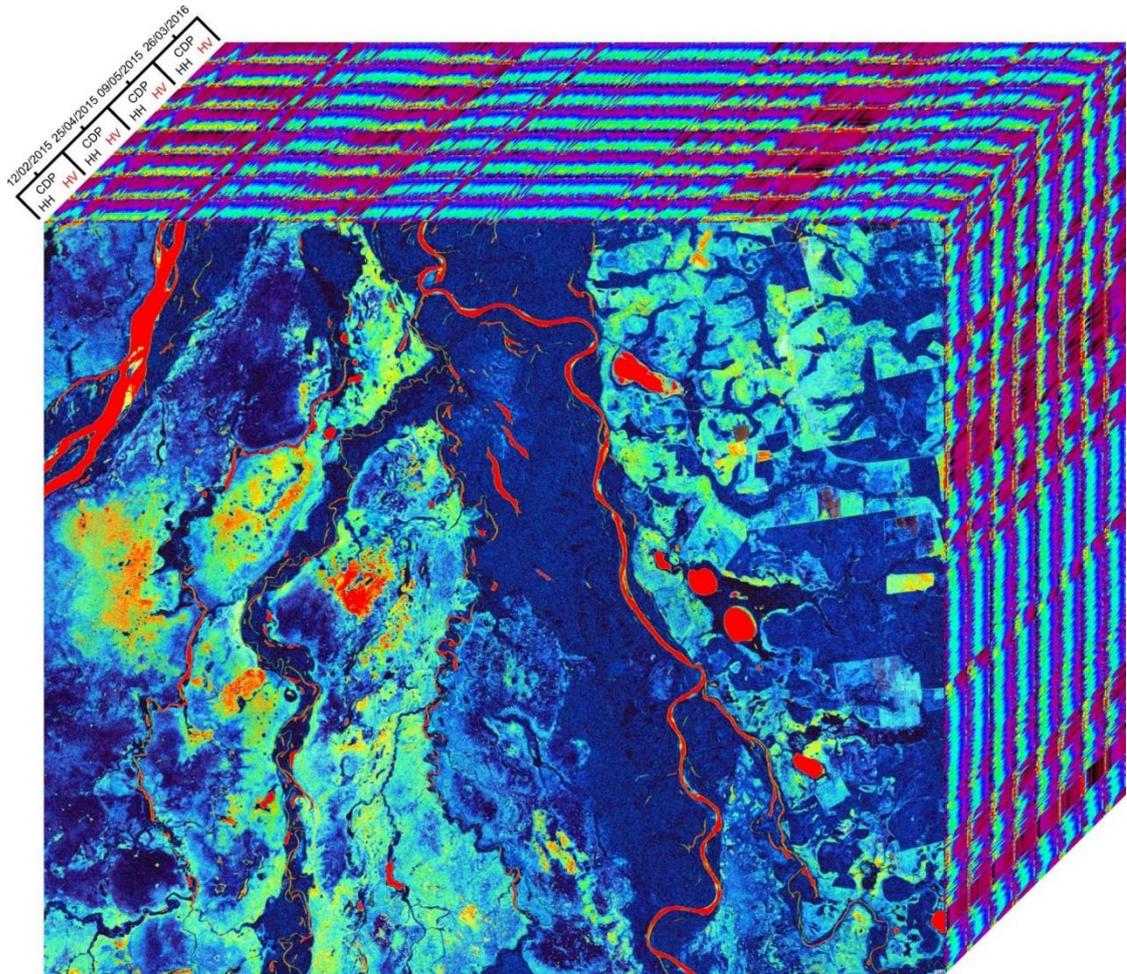
### 6.1 – Análise de Componentes de Densidade e Probabilidade (ACDP)

Foi utilizado o programa Abílio para o processamento das Componentes de Densidade e Probabilidade (CDP), e assim, gerar o resultado de cada imagem SAR adquirida. Foi adotado o parâmetro de níveis de cinza = 16 sobre cada polaridade (HH e HV) com janela móvel = 11. A **Figura 12** exemplifica o resultado alcançado pelo método ACDP, considerando as 16 componentes da imagem SAR com polaridade HH. O comportamento da água foi facilmente identificado estando concentrado predominantemente na componente 1 das imagens ACDP devido a sua característica de reflectância especular (**Figura 12–1**).



**Figura 12** – Relação das 16 componentes geradas a partir da ACDP – HH

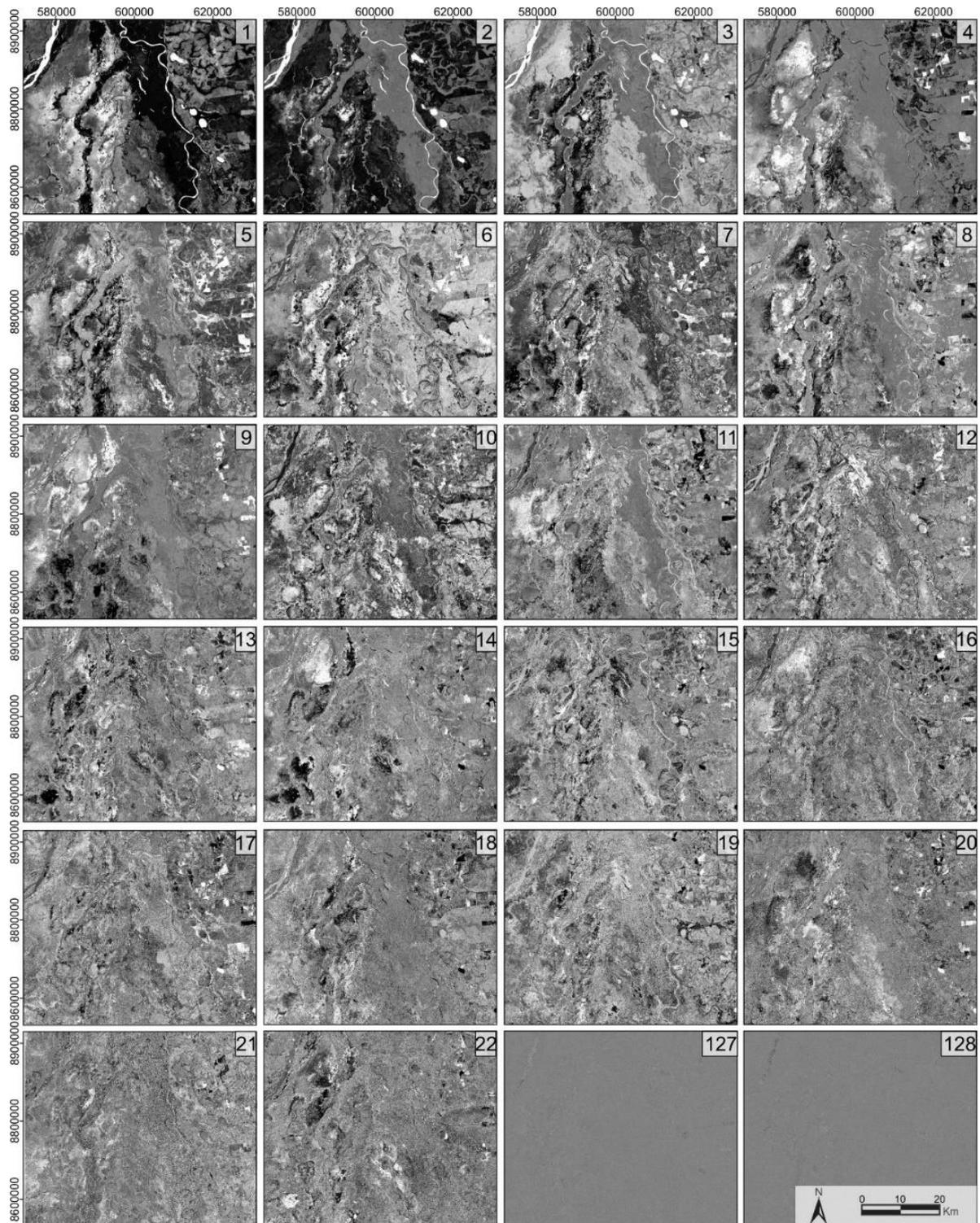
Com vistas a possibilitar o estudo da série temporal das imagens SAR, as componentes ACDP e suas respectivas polaridades (HH+HV) foram unidas para cada data, totalizando 32 bandas (16+16). Logo após, de maneira a formar um cubo temporal, foram unidas as quatro cenas para formar um registro temporal com todas as 128 componentes (32 componentes x 4 cenas = 128 componentes da série temporal) (**Figura 13**).



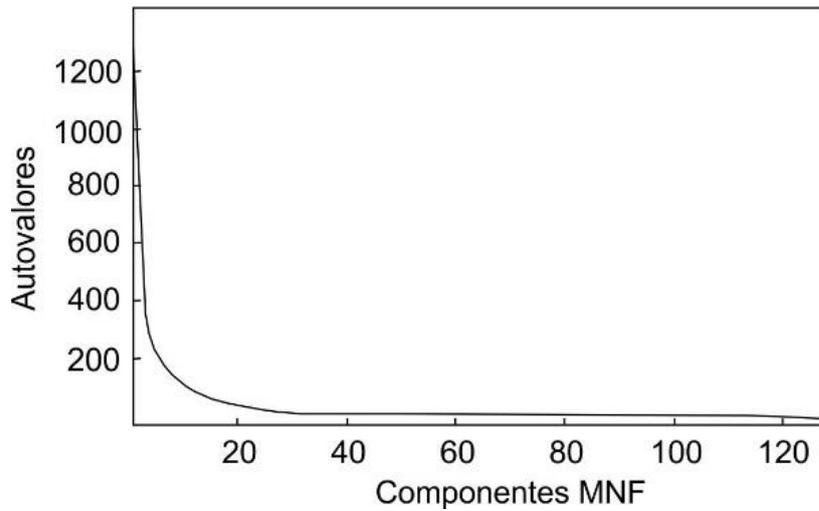
**Figura 13** – Cubo temporal das 128 componentes ACDP

A partir do resultado do cubo temporal das componentes CDP, a transformação MNF foi aplicado em todas as 128 componentes. A **Figura 14** demonstra o comportamento das componentes CDP do cubo temporal das imagens SAR, no qual é nítida que a fração ruidosa está concentrada nas últimas componentes do cubo temporal. Portanto, a transformação MNF inversa foi aplicada com propósito de separar a fração ruidosa das CDP. A realização da inversa do MNF adotou as 13 primeiras componentes devido a acentuada queda dos autovalores nessa

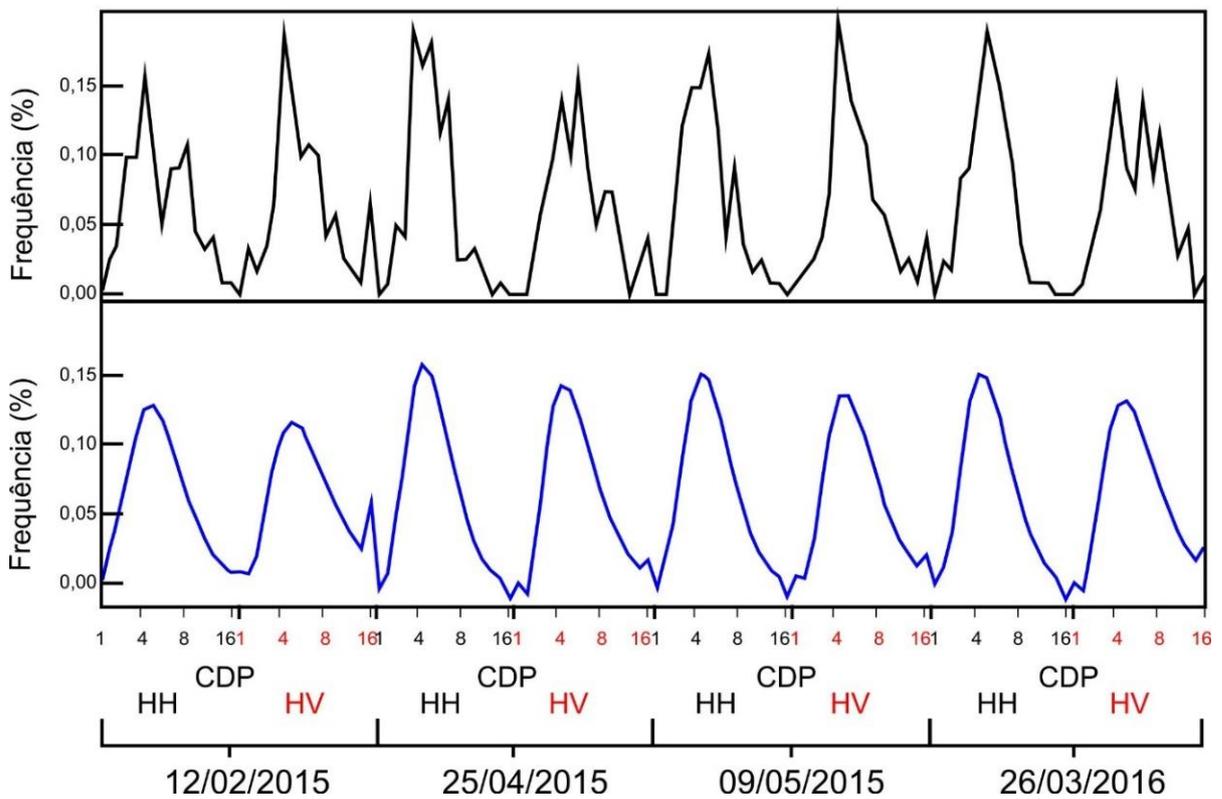
componente (**Figura 15**). O procedimento de inversão do MNF proporciona uma intensa suavização das assinaturas temporais dos pixels (**Figura 16**).



**Figura 14** – Distribuição das CDP do cubo temporal das imagens SAR



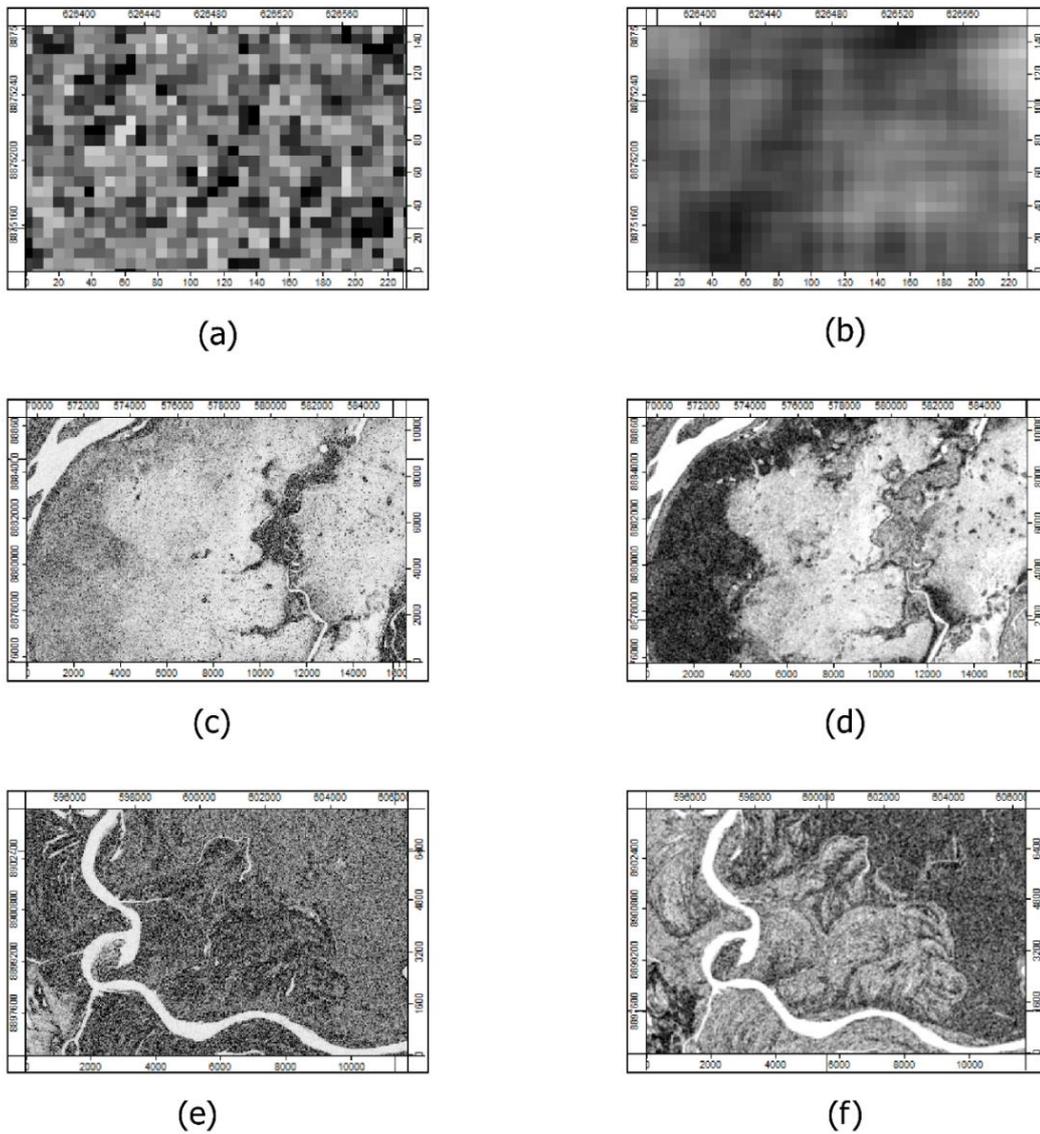
**Figura 15** – Gráfico dos autovalores das 128 componentes do cubo temporal.



**Figura 16** – Comparação dos valores das CDP antes e após a inversa do MNF (ACDP-MNF).

A **Figura 17** demonstra os efeitos do processamento ACDP-MNF sobre a imagem SAR, tais como: suavização (**Figura 17 a, b**); melhor definição dos limites das feições (**Figura 17 c, d**); e realce dos canais e meandros abandonados (**Figura 17 e, f**). Estas características demonstram que o método ACDP-MNF melhora consideravelmente as imagens SAR,

facilitando assim a sua respectiva classificação.

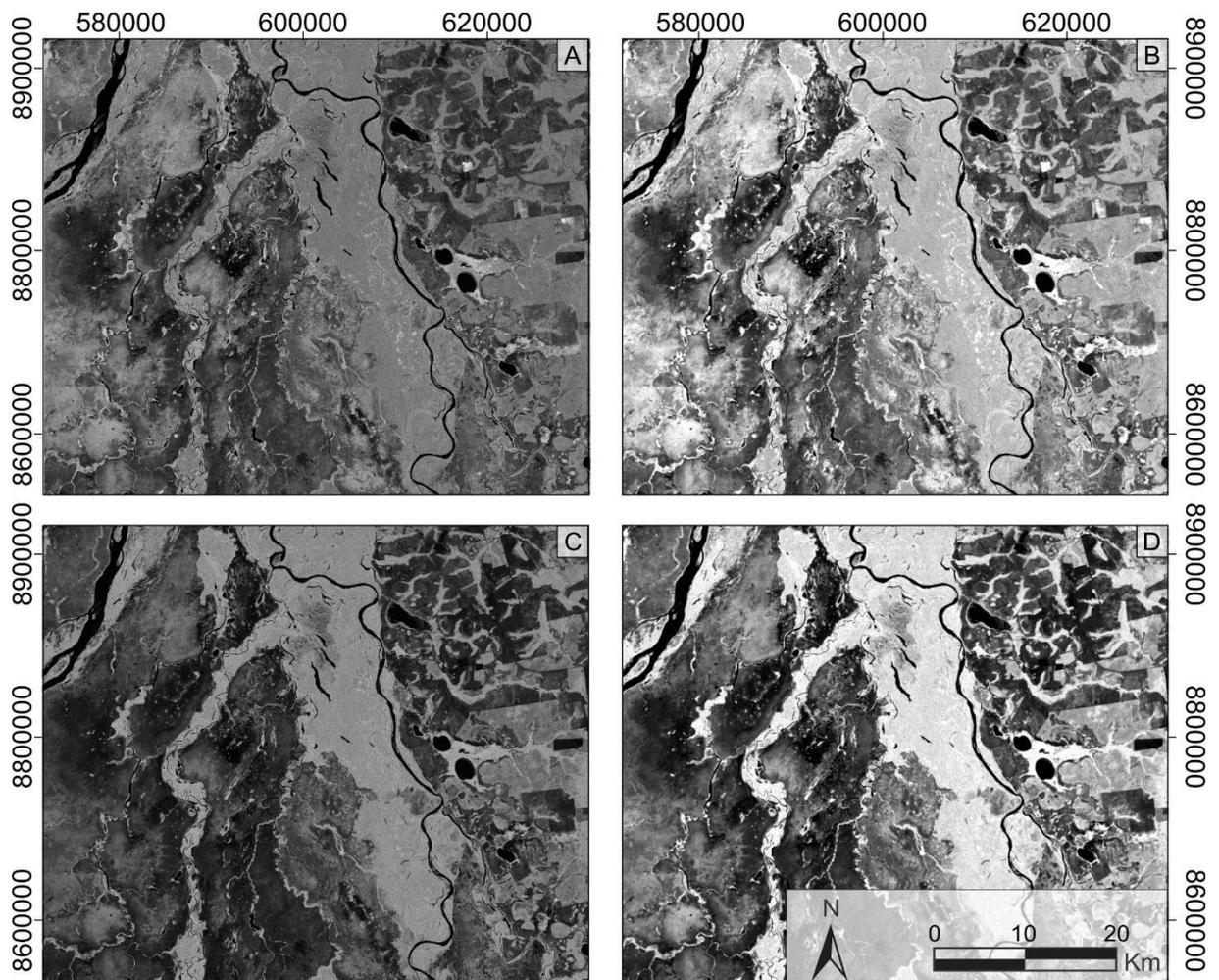


**Figura 17** – Comparação entre as assinaturas de pixels da imagem original e da imagem pelo método CDP-MNF.

## 6.2 Filtro adaptativo Gamma

O filtro Gamma foi aplicado na série temporal das imagens SAR, utilizando o programa ENVI 5.2. De forma análoga a etapa da CDP-MNF, uma janela móvel 11x11 foi

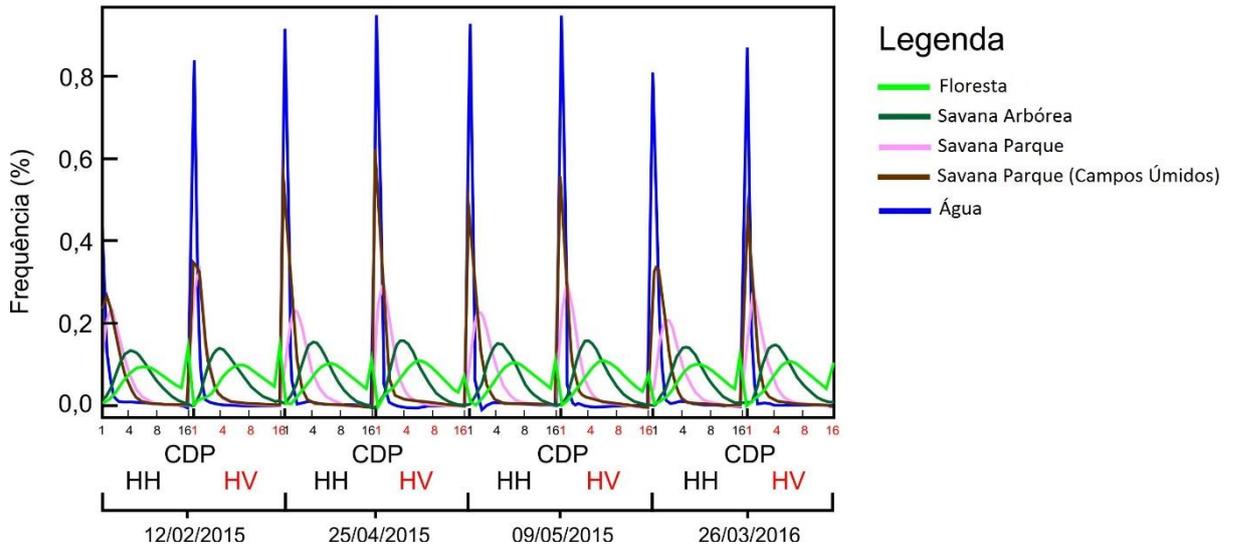
aplicado para fins de comparação. A **Figura 18** compara a imagem original com a imagem filtrada pelo Gamma com janela móvel 11x11.



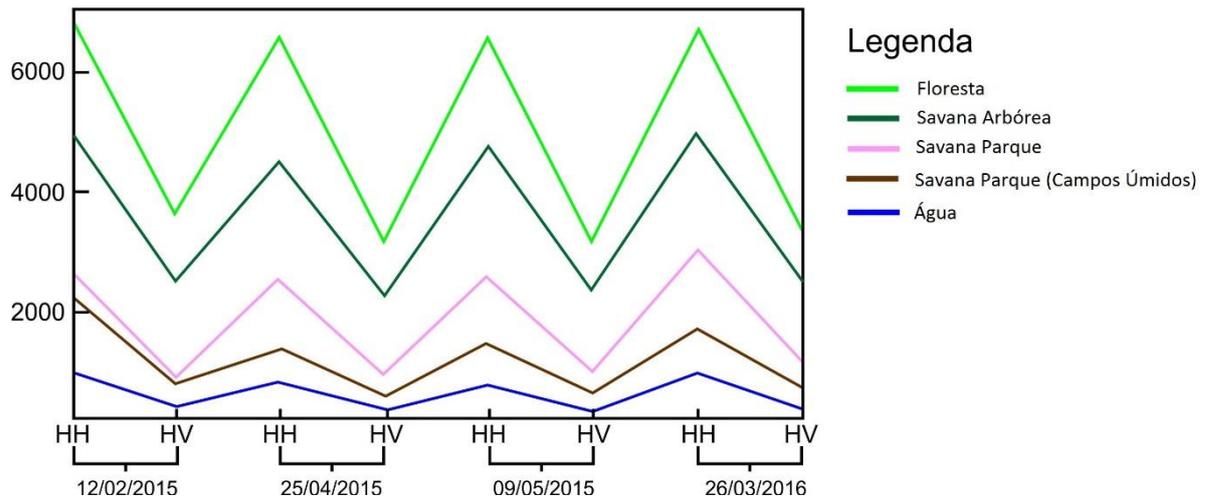
**Figura 18** – Comparação da imagem original sobre a imagem com filtro Gamma: (a) imagem HH original; (b) imagem HH filtrada; (c) imagem HV original; (d) imagem HV filtrada.

### 6.3 Classificação

As **Figuras 19 e 20** demonstram o comportamento dos diferentes alvos ao longo das componentes CDP-MNF e do filtro Gamma para classificação de uso e cobertura do solo pelo método SVM.



**Figura 19** – Assinatura das amostras levantadas sobre as CDP-MNF.



**Figura 20** – Assinatura das amostras levantadas sobre o filtro Gamma

Os valores das amostras pelo método CDP-MNF, a classe “água” apresenta uma forte representação na primeira componente de cada polaridade. A “Floresta” foi definida com base em comparações com as imagens ópticas associado à homogeneidade da feição nas imagens SAR, a assinatura desta classe apresenta de maneira mais suave ao longo das componentes, com exceção da primeira que apresenta fortes característica de água aberta. A classe “Savana arborizada” representa unidade com característica semelhante com a classe “Floresta”, no entanto, possuem pequenas disparidades ao longo das componentes. “Savana Parque” são unidades de paisagem bastante comuns na região, e a interpretação desta classe se deu por conta da resposta das assinaturas das componentes ao longo das bandas, apesar desta feição apresentar certa confusão na sua classificação. Por fim, a classe “Savana Parque (Campos úmidos)” estão indicados no que pode ser denominado a faixa de transição sobre a assinatura da água com dos campos. Esta classe, tem uma resposta das componentes concentrada na primeira e segunda bandas, próxima com as características da água, possivelmente existe uma interferência de rugosidade nesta classe ocasionado por gramíneas existentes. Neste caso podemos afirmar que se trata de uma região de transição entre área alagada e área seca, e o seu limite é identificado pontualmente de acordo com a datação de cada imagem SAR. Os valores indicados pelas assinaturas amostrais do filtro Gamma (**Figura 20**), apresentam a distribuição inversa se comparado com as da CDP-MNF (**Figura 19**), por conta de que estes valores estão indicados em amplitude.

No que tange a seleção de amostras para identificação da classe de uso antrópico, as **Figuras 21 e 22** indicam as assinaturas das amostras coletadas com este intuito. Devido a variação de diferentes usos da cobertura do solo, as diferenças a respeito do uso foram incorporadas em uma classe única, sendo definida como de “uso agropecuário”.

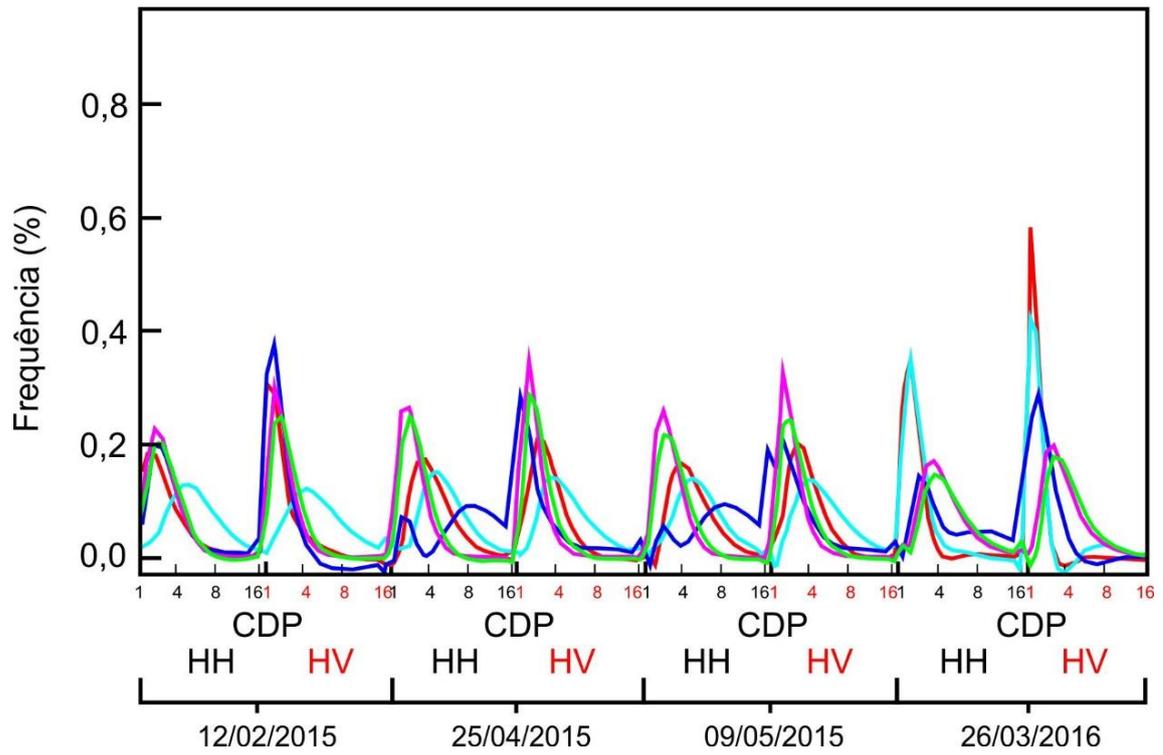


Figura 21 – Assinatura das amostras de uso sobre as CDP-MNF.

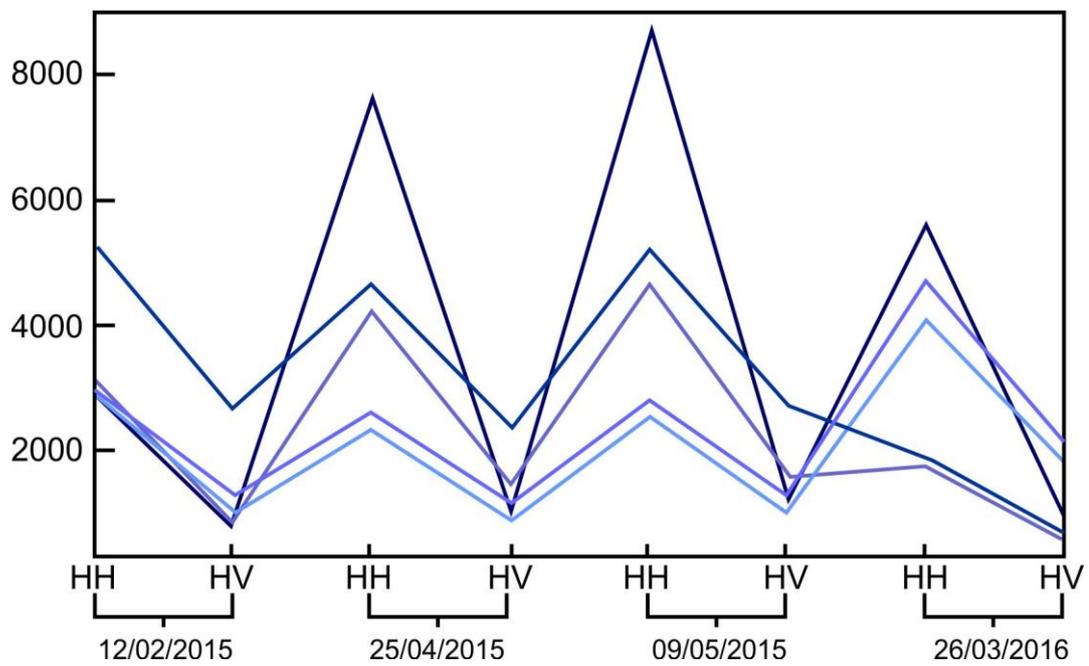
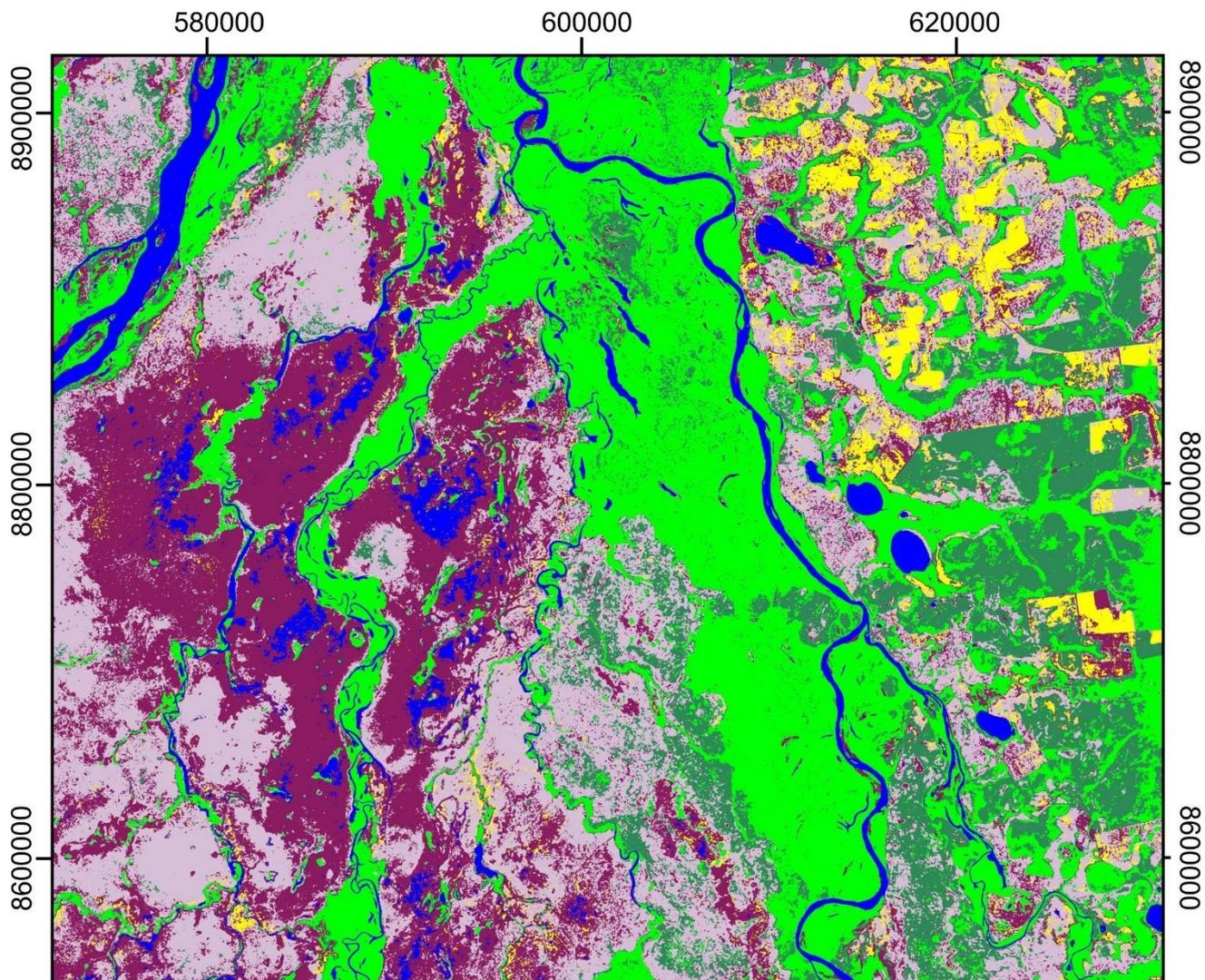


Figura 22 – Assinatura das amostras de uso sobre o filtro Gamma

Diante dos gráficos indicados nas **Figuras 21 e 22**, podemos afirmar que as amostras de uso apresentam um conjunto de assinaturas de pixels bastante similar ao encontrado na classe “Savana Parque (Campos Úmidos)”. Embora, ao analisarmos a série temporal das imagens foi identificado variações das assinaturas ao longo das imagens disponibilizadas, enquanto a classe “Savana Parque (Campos úmidos) apresenta certa homogeneidade ao longo de toda a série temporal. Esta condição possibilita a separação destas classes, embora esta análise seja possível apenas ao trabalhar com a série temporal.

As escolhas das amostras necessárias para aplicar o classificador SVM, foi um esforço minucioso para sua respectiva definição. Existem classes que apresentam assinaturas amostrais muito próximas gerando confusões ao classificador, como é o caso da classe “Savana Parque” com o de “Uso Agropecuário”, assim como as classes “Floresta” com “Savana Arborizada”. Tendo em vista estas confusões, a busca pelo melhor conjunto de amostras se deu através de diversas tentativas e seleções amostrais de maneira a melhor captar as informações corretas a partir das classes levantadas. Portanto, foram feitas diversas aplicações do SVM para alcançar o resultado indicado nas **Figuras 23** a partir da imagem CDP-MNF e **Figura 24** a partir do filtro Gamma,



Legenda

Água

Floresta

Uso Agropecuário

Savana Parque

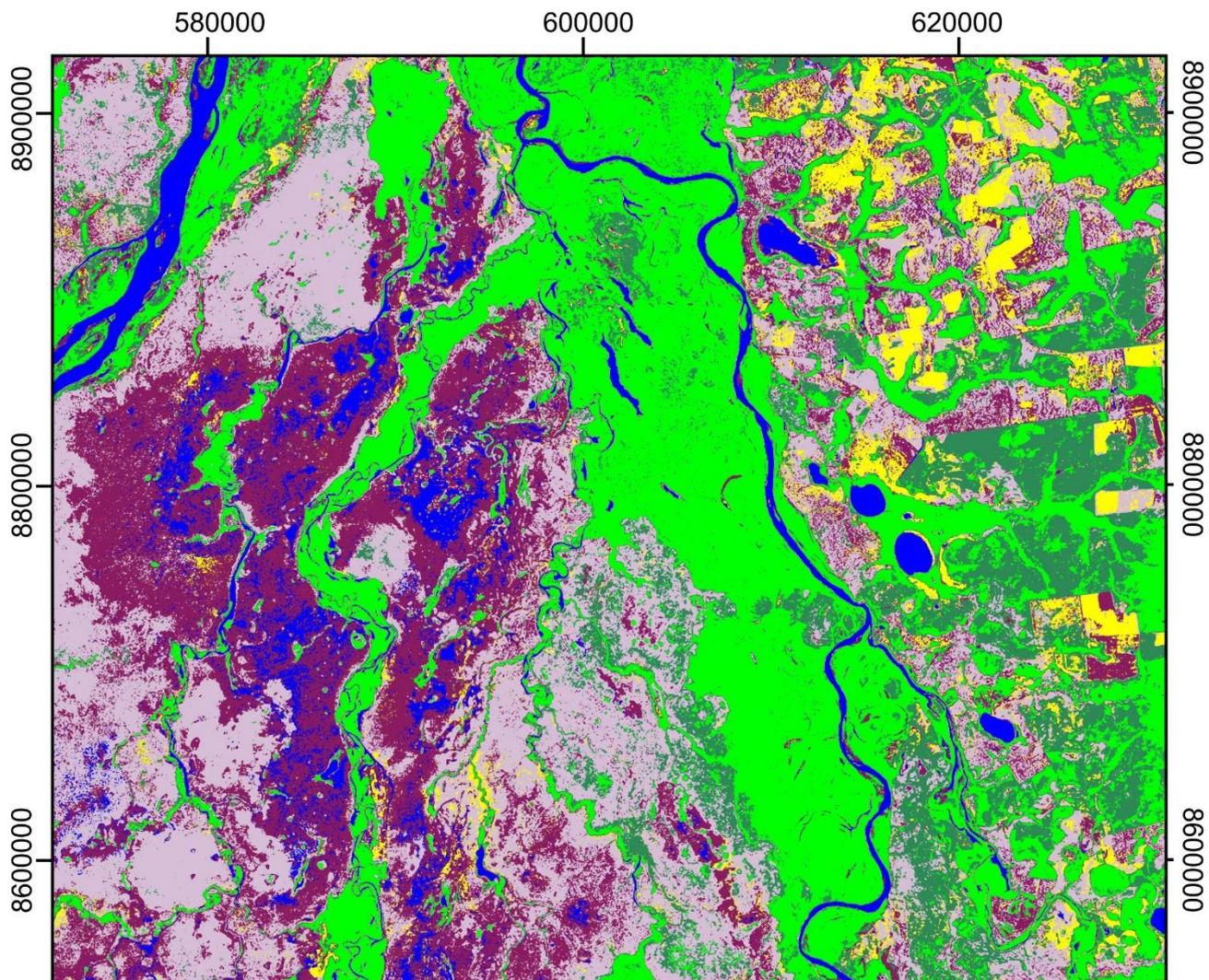
Savana Parque  
(Campo Úmido)

Savana Arborizada  
e Florestada



0 5 10 Km

**Figura 23** – Classificação SVM gerada a partir das imagens CDP-MNF.

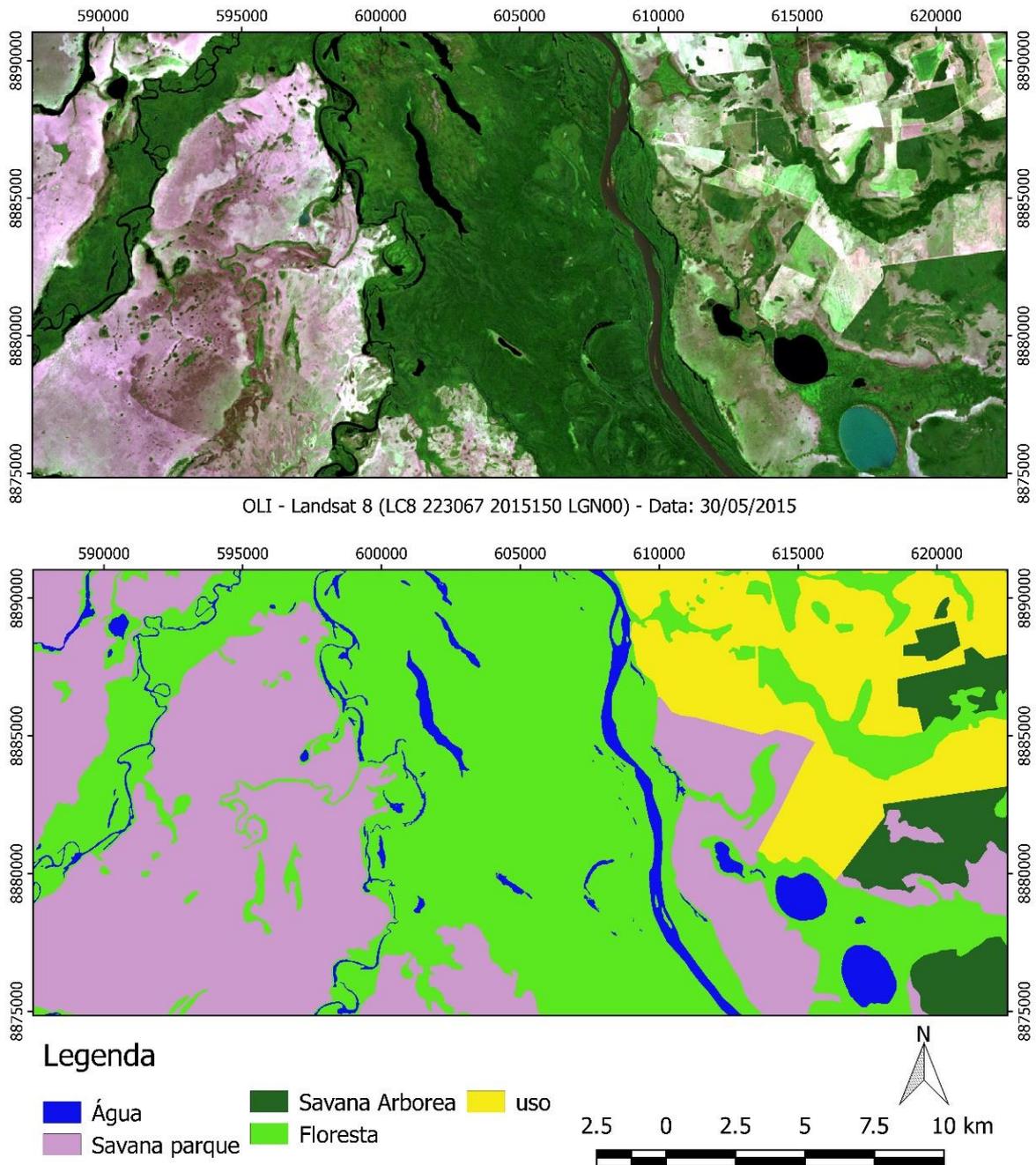


**Figura 24** – Classificação SVM gerada a partir das imagens Gamma.

#### 6.4 Validação do mapeamento

O mapeamento realizado através das imagens CDP-MNF e pelas imagens Gamma foram comparados com o mapeamento manual gerado a partir de imagem OLI-Landsat 8. A **Figura 25** demonstra o recorte da imagem óptica utilizada e o seu respectivo mapeamento para fins de comparações com a classificação SVM.

A **Tabela 8** lista os resultados dos coeficientes Kappa e acurácia geral sobre ambas as classificações pelo CDP-MNF e pelo Gamma. Neste sentido, podemos identificar um melhor coeficiente Kappa resultado da classificação pelo SVM / CDP-MNF em comparação com a classificação pelo SVM / Gamma, embora ambas as classificações apresentaram um resultado bastante semelhante com uma concordância substancial (de 0,60 a 0,79) em relação à classificação manual.



**Figura 25** – Resultado da classificação manual com base na imagem OLI-Landsat 8

**Tabela 8** – Acurácia Geral e Coeficiente Kappa sobre o mapeamento realizado.

Mapeamento	Acurácia Geral	Coeficiente Kappa
SVM / CDP-MNF	73,77 %	0,6259
SVM / Gamma	70,14 %	0,5767

A matriz de confusão evidencia os erros cometidos em cada classe estabelecida pelo classificador utilizando como referência a classificação manual. A **Tabela 9** representa a matriz de confusão do classificador SVM/CDP-MNF e a **Tabela 10** representa a matriz de confusão do classificador SVM/Gamma.

**Tabela 9** – Matriz de confusão sobre o classificador SVM/CDP-MNF

	Classificador Manual					
	Floresta	Savana Arbórea	Savana Parque	Uso Agropecuário	Água	Total
Floresta	<b>82,23 %</b>	18,64 %	2,34 %	2,63 %	5,19 %	34,60 %
Savana Arbórea	9,97 %	<b>75,04 %</b>	7,53 %	9,01 %	0,21 %	14,41 %
Savana Parque	5,30 %	4,31 %	<b>80,47 %</b>	<b>63,65 %</b>	4,75 %	40,04 %
Uso Agropecuário	0,21 %	1,97 %	2,18 %	<b>24,51 %</b>	0,02 %	4,20 %
Água	2,29 %	0,04 %	7,48 %	0,20 %	<b>89,83 %</b>	6,75 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

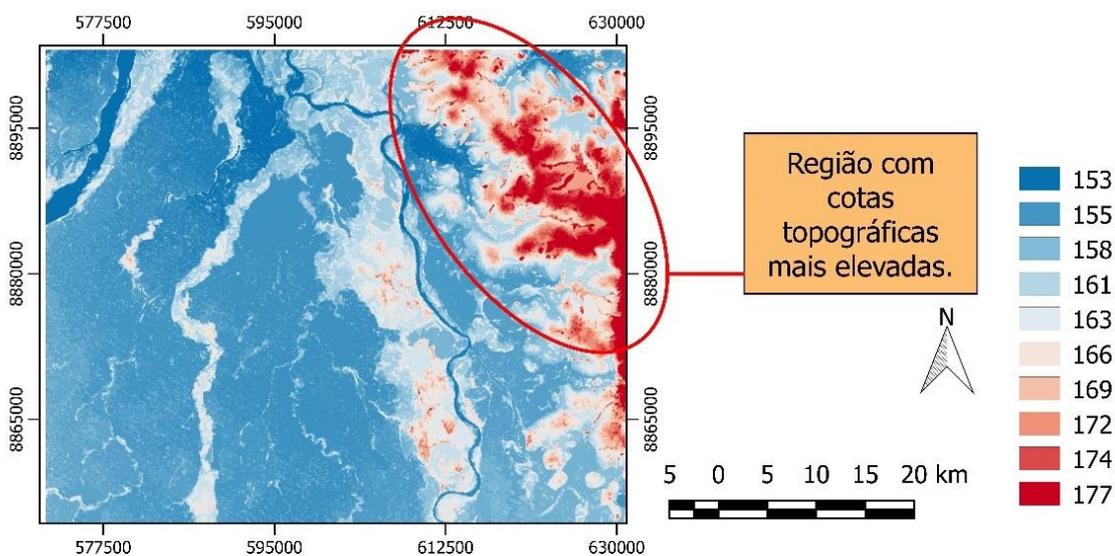
Podemos identificar uma confusão expressiva na diferenciação entre a classe “Savana Parque” com o “Uso Agropecuário” uma vez que ambos comportamentos são bastante semelhantes, a diferenciação destas classes apenas foi possível pela variação ao longo da série temporal (**Figuras 21 e 22**). As amostras de uso agropecuário apresentam variações ao longo das assinaturas temporais, evidenciando alterações repentinas, enquanto a Classe “Savana Parque” não apresenta alterações significativas ao longo do tempo.

**Tabela 10** – Matriz de confusão sobre o classificador SVM/Gamma

Classificador SVM//Gamma	Classificador Manual						
		Floresta	Savana Arbórea	Savana Parque	Uso Agropecuário	Água	Total
	Floresta	<b>81,45 %</b>	23,97 %	1,94 %	2,29 %	1,43 %	34,45 %
	Savana Arbórea	11,67 %	<b>69,92 %</b>	8,03 %	10,02 %	5,35 %	15,10 %
	Savana Parque	5,09 %	2,95 %	<b>75,25 %</b>	<b>66,16 %</b>	17,27 %	38,70 %
	Uso Agropecuário	0,87 %	3,11 %	3,31 %	<b>20,94 %</b>	1,05 %	4,55 %
	Água	0,92 %	0,05 %	11,47 %	0,59 %	<b>74,90 %</b>	7,20 %
	Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

### 6.5 Análise da dinâmica de inundação

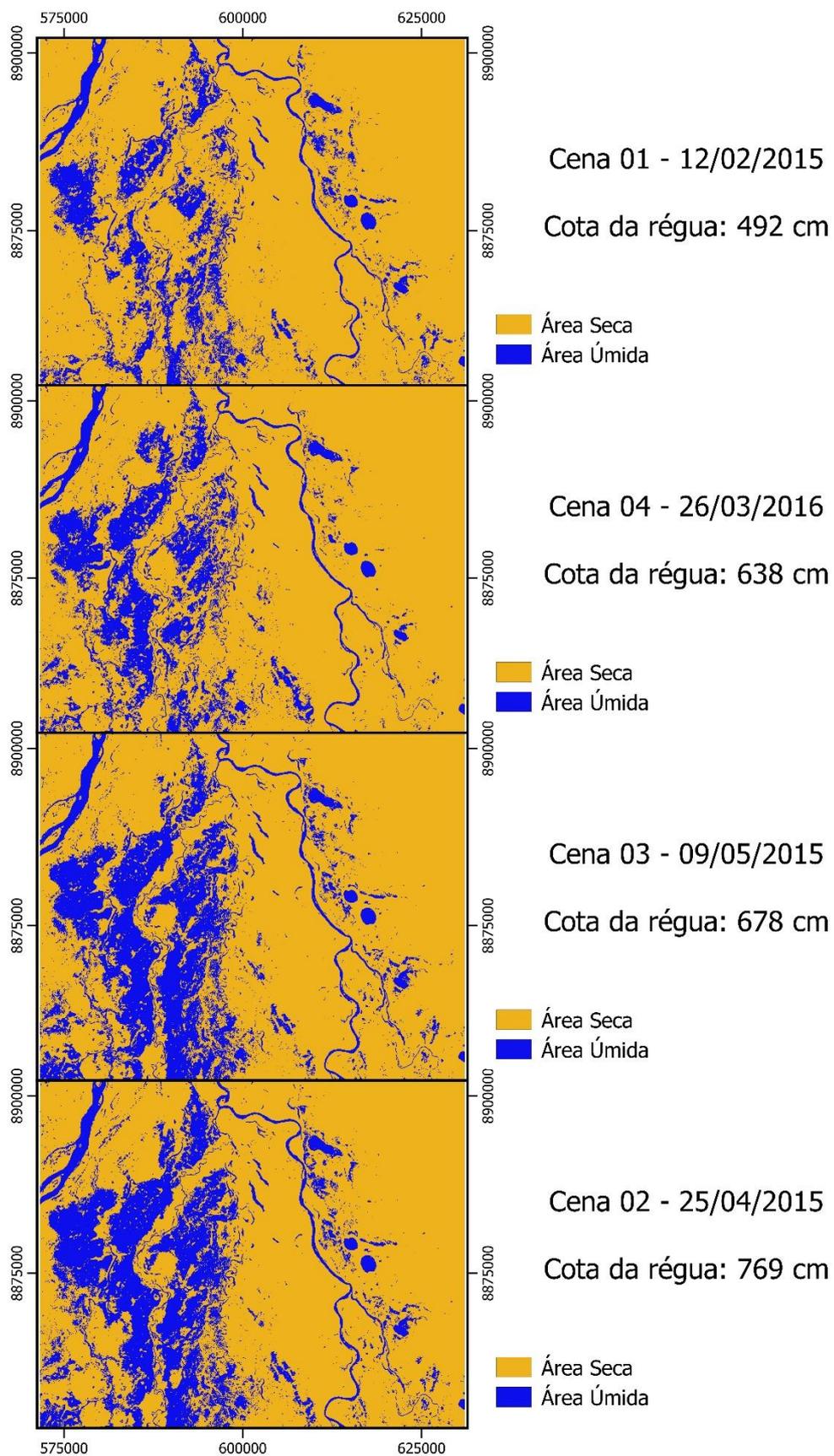
Para o estudo da dinâmica de inundação, os materiais complementares auxiliam esta análise das imagens SAR. A **Figura 26** evidencia que a parte nordeste da área apresenta uma cota altimétrica mais elevada, e qualquer resultado indicado nesta região como sendo área úmida não condiz com a dinâmica de alagamento dos rios Araguaia e Javaés, uma vez que apresenta cota topográfica elevada. Desta forma, esta parte da imagem fica excluída da interpretação da dinâmica de inundação, embora existam interferências do dossel florestal sobre o MDE gerado, principalmente ao longo do rio Javaés. A **Figura 27** apresenta a sequência de cenas conforme o aumento gradual da cota de inundação do rio Araguaia. Assim, as informações contidas nas estações fluviométricas deram suporte a análise da dinâmica de inundação na área de estudo. Tais estimativas foram organizadas em ordem crescente de inundação, possibilitando interpretar como se comporta o rio neste trecho em específico.



**Figura 26** – MDE com destaque da região com cotas topográficas mais elevadas

As imagens estudadas não refletem a média das máximas anuais que corresponde à 913 centímetros medidos a partir da régua fluviométrica (**Tabela 6**). Neste sentido, tomando como referência a data que apresenta a maior cota de inundação (Cena 02 com o valor de 769 cm), podemos observar que as drenagens menores já extravasaram seus leitos e estão diluídas na área alagada. Além disto, o comportamento geomorfológico do recorte estudado demonstra que a dinâmica de inundação se comporta de maneira diferente entre as margens do rio Javaés, como pode ser observado na **Figura 27**, pois a margem esquerda apresenta uma área mais expressiva de inundação se comparado com a margem direita.

No caso da inundação correspondente a média da máxima histórica (913 cm), o transbordamento seria 144 centímetros acima da indicada na Cena 02 ( $913 - 769 = 144$ ). Apesar dessa pesquisa não ter a oportunidade de adquirir uma imagem que representasse a cota 913, é possível deduzir uma área de alagamento bem maior do que indicado nas imagens desta pesquisa, uma vez que a região apresenta uma topografia extremamente plana, com exceção do recorte feito de cotas topográficas mais elevadas.



**Figura 27** – Dinâmica de inundação a partir das imagens SAR

Podemos estimar a porcentagem de área de alagamento de cada imagem disponibilizada. A área total do perímetro é de 296.875 hectares e a **Tabela 11** especifica a estimativa de inundação que cada imagem representa em relação a área total.

**Tabela 11** – Porcentagem de inundação em relação as imagens SAR

Cenas SAR	Área Úmida		Área Seca		Área Total		Cota da régua (cm)
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	
Cena 01	44.448,68	14,97	252.426,32	85,03	296.875,00	100	492
Cena 04	52.438,64	17,66	244.436,36	82,34	296.875,00	100	638
Cena 03	68.917,33	23,21	227.957,67	76,79	296.875,00	100	678
Cena 02	71.468,83	24,07	225.406,17	75,93	296.875,00	100	769

Diante do resultado matemático obtido conforme indicado na **Tabela 11**, pode-se constatar que a imagem SAR que representa a maior representatividade de inundação (Cena 02) apresenta uma porcentagem de 24,07 % de área úmida em relação à área total das imagens SAR. A variação entre cheia e vazante é bem expressiva se considerar que houve um aumento de 10 % de área úmida em relação a Cena que apresenta a menor porcentagem de alagamento (Cena 01).

## 7 – DISCUSSÃO

Diversas pesquisas comprovam a eficácia da aplicação de imagens de radar para a detecção de áreas inundáveis, especialmente em regiões com alta incidência de nuvens (Dellepiane & Angiati, 2012; Arnesen et al. 2013; Zhao et al. 2014; Hess, 2015). Embora não exista uma forma única para tratamento e classificação de imagens SAR (White, 2015).

A presente pesquisa adotou a recente técnica ACPD-MNF, que transforma uma imagem SAR em multicomponentes e proporciona uma melhora significativa na relação sinal-ruído das imagens. A transformação MNF (Green et al., 1988) é um procedimento amplamente utilizado no processamento digital de imagens ópticas e ainda pouco explorada para imagens de radar. De forma pioneira, o ACPD-MNF foi utilizado para identificação de áreas de inundação. A primeira componente da ACPD-MNF evidencia a informação da água, tornando este método bastante útil para extração desse alvo nas imagens SAR. Neste trabalho, os resultados da classificação SVM de uso e cobertura da terra sobre os dados temporais ACPD-MNF demonstraram maior acurácia do que o filtro Gamma, corroborando com outras pesquisas realizadas (Maciel 2012; Carvalho Júnior et al., 2014). No entanto, deve-se ressaltar que estudos futuros devem testar outros parâmetros do ACPD com vistas a possibilitar uma melhor extração das áreas inundáveis nas imagens SAR.

O constante aperfeiçoamento e desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto de séries temporais permitem aperfeiçoar a detecção de alvos dentro de um processo contínuo ao longo do tempo. O emprego de séries temporais de imagens radar permite duas abordagens complementares no estudo de áreas úmidas: (a) utilizar todo o conjunto de informações temporais para classificar um determinado alvo, e (b) avaliar a evolução de um fenômeno temporal a partir da classificação da imagem de cada tempo individualmente.

A classificação SVM das séries temporais permitiu uma maior acurácia na distinção dos alvos como as áreas agrícolas que evidenciaram mudanças abruptas ao longo do tempo e os pequenos cursos d'água meandantes que apresentam assinaturas temporais semelhantes a classe Savana Parque (Campos úmidos). Portanto, a classificação de toda série temporal favorece a identificação dos tipos de vegetação e atividades agropecuárias, obtendo melhores resultados do que uma imagem individual no tempo (Bruzzone et al. 2004). Outras pesquisas constataam o aumento da acurácia da classificação com o emprego de imagens multitemporais de radar (Bargiel & Herrmann, 2011; Betbeder et al. 2014; Blaes et al. 2005; Brisco & Brown, 1995, Chust et al. 2004, Waske & Braun, 2009)

Além disso, as imagens SAR permitiram avaliar a dinâmica sazonal das áreas saturadas da ilha do Bananal considerando uma classificação independente por data (Marechal et al., 2012). Embora esta pesquisa tenha usado apenas quatro datas de imagens SAR, os resultados evidenciam a dinâmica das áreas inundáveis. Pesquisas futuras contendo uma série temporal mais contínua poderão detalhar mais esse processo. Os resultados aqui obtidos demonstraram que a dinâmica de alagamento do Rio Araguaia, nessa área de estudo, inicia-se pelo “encharcamento” das áreas marginais que num segundo momento se integra à elevação do leito do canal do rio principal e de seus tributários, a configurar no seu ápice a área alagável do Rio Araguaia propriamente dita.

Esse trabalho evidencia a peculiaridade geoambiental da região da ilha do Bananal, pois os ambientes de inundação se manifesta de maneira bem expressiva, no aspecto da conservação ambiental com importância estratégica, reservatório de água do rio Araguaia, e na questão fundiária com uma enorme área sob jurisdição da União. Este trabalho contribui para o desenvolvimento constante de metodologias específicas quanto à delimitação de áreas sob domínio da União, na qual estão vinculadas aos rios federais como é o caso da definição da LMEO, assim como dos Terrenos Marginais.

A proposta metodológica de delimitação de ambientes de inundação apresentada poderá contribuir com futuros trabalhos envolvendo a gestão territorial de áreas sob jurisdição da União ao longo dos rios federais, aperfeiçoando e complementando trabalhos já realizados sobre o mesmo tema (Dias, 2014; Campagnoli et al., 2016). Este trabalho evidencia a necessidade de continuidade de desenvolvimento e aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto para identificação de áreas úmidas.

Com base na resolução espacial que as imagens PALSAR-2/ALOS 2, pode-se afirmar que os produtos gerados correspondem a uma escala cartográfica na ordem de 1:35.000, evidenciando a importância destas imagens SAR no âmbito de trabalhos envolvendo cartografia automatizada para fins de monitoramento e gestão ambiental e fundiário.

## 8 – CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a aplicação da transformação ACDP-MNF para o mapeamento de áreas de inundação a partir de séries temporais de imagens SAR. Foi realizado um estudo da série histórica de inundação com base nos dados das estações fluviométricas da ANA que possibilitou ter uma estimativa da dinâmica de inundação do rio Araguaia. Os resultados obtidos no tratamento de ruído evidenciaram a importância da aplicação ACDP-MNF no estabelecimento de multicomponentes e sua respectiva eliminação de ruídos, os dados foram comparados com o filtro adaptativo Gamma.

O estudo da série temporal é essencial quando o objetivo é detectar feições ao longo do tempo, como é o caso da dinâmica de inundação. O uso do SVM apresentou bons resultados e a diferenciação da classe “Savana Parque (Campos úmidos)” com a classe “Uso agropecuário” só foi possível a partir de uma análise temporal.

Nesta pesquisa, o classificador SVM / CDP-MNF para o uso e cobertura do solo apresentou um coeficiente Kappa de 0,62 e uma acurácia geral de 73,77%, enquanto o classificador SVM / Gamma teve um coeficiente Kappa de 0,57 e uma acurácia geral de 70,14%. As classes “Água”, “Floresta” e “Savana Parque” apresentaram melhores acertos em termos gerais, enquanto a classe “Uso Agropecuário” apresentou uma confusão bem expressiva com a classe “Savana Parque”, esta condição ocorre devido à similaridade das assinaturas de pixels entre estas classes, o que só é possível identificar a partir do estudo da série temporal. A classe “Savana Arbórea” apresentou um resultado regular, pois ocorreram alguns erros com as classes “Floresta” e “Uso Agropecuário”.

Quanto à dinâmica de inundação foi possível identificar a variação durante os registros das imagens disponibilizadas, no qual ocorre um aumento de aproximadamente 10% de áreas úmidas entre a imagem com menor nível de inundação com o que apresenta maior nível de inundação. Isto possibilita afirmar que existe uma expressiva variação de inundação, devido à morfologia da planície de inundação.

A importância de realizar um monitoramento adequado das áreas úmidas ao longo dos principais rios brasileiros é uma ação significativa, tendo em vista que grande parte destas áreas apresentam peculiaridades ambiental e fundiário, principalmente aqueles que estão vinculados aos Terrenos Marginais, disciplinados pela Lei nº 9.760/1946.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Alsdorf D.E.; Melack J. M.; Dunne T.; Mertes L.A.; Hess L.L.; Smith L.C. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain. **Nature** v.404(6774), p. 174-177, 2000. doi: 10.1038/35004560.

Alsdorf D.; Han S.; Bates P.; Melack J. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. **Remote Sensing of Environment** v. 144, p. 2448-2456, 2010. doi: 10.1016/j.rse.2010.05.020.

Alsdorf D.; Bates P.; Melack J.; Wilson M.; Dunne T. Spatial and temporal complexity of the Amazon flood measured from space. **Geophysical Research Letters** L08402, p. 1-5, 2007. doi: 10.1029/2007GL029447.

Aquino S.; Stevaux J.C.; Latrubesse E.M. Regime Hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do Rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 6, n.2, p. 29-41. 2005.

Aquino S.; Stevaux J.C.; Latrubesse E.M. Regime Hidrológico e aspecto do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 6, n 2, p. 29-41, 2005.

Arnesen, A.S. **Monitoramento da área inundada na planície de inundação do lago grande de Curuai (PA) por meio de imagens ScanSAR/ALOS e dados auxiliares**. 2012. 115 f. Dissertação ( Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 2012.

Arnesen A.S.; Silva T.S.F.; Hess L.L.; Novo E.M.L.M.; Rudorff C.M.; Chapman B.D.; McDonald K.C. Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. **Remote Sensing of Environment** v. 130, p. 51-61, 2013. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.035.

Ayres, J.M. **As matas de várzea do Mamirauá**. MCT – CNPq, Tefé, 1995.

Bargiel D.; Herrmann S. Multi-temporal land-cover classification of agricultural areas in two European regions with high resolution spotlight TerraSAR-X data. **Remote sensing**, v. 3(5), p. 859-877, 2011.

Bates P.D.; Wilson M.D.; Horritt M.S.; Mason D.C.; Holden N.; Currie A. Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modelling. **Journal of hydrology** v. 328, p. 306-318, 2006. doi:

10.1016/j.jhydrol.12.028.

Benatti, J.H. **A questão fundiária e o manejo dos recursos naturais da várzea**: análise para a elaboração de novos modelos jurídicos, Manaus: Edições Ibama / ProVárzea, 2005.

Benatti, J.H. Várzea e as populações tradicionais: a tentativa de implementar políticas públicas em uma região ecologicamente instável. In: Alves F (org). **A função socioambiental do patrimônio da União na Amazônia**. Brasília: Ipea, 2016. p. 17-29.

Betbeder J.; Rapinel S.; Corpetti T.; Pottier, E.; Corgne, S.; Hubert-Moy, L. Multitemporal classification of TerraSAR-X data for wetland vegetation mapping. **Journal of applied remote sensing**, v. 8(1), p. 083648-083648, 2014.

Blaes, X.; Vanhalle L.; Defourny, P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. **Remote Sensing of Environment**. v. 96, p. 352-365, 2005. doi: 10.1016/j.rse.2005.03.010.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, 1988.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 9.760**, Dispõe sobre bens imóveis da União e dá outras providências. Brasília, 5 de setembro de 1946.

BRASIL. **Lei nº 12.651**, Código Florestal Brasileiro. Brasília, 25 de maio de 2012.

Brisco, B.; Brown, R.J. Multidate SAR/TM synergism for crop classification in Western Canada. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 61 (8), p. 1009-1014, 1995.

Bruzzone, L.; Marconcini, M.; Wegmuller, U.; Wiesmann, A. An advanced system for the automatic classification of multitemporal SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42(6), p. 1321-1334, 2004.

Campagnoli, F.; Aquino, H.H.V.; Marques, J.B.; Carvalho, M.C.M. Desafios da regularização fundiária para as comunidades ribeirinhas na Amazônia. In: Alves F (org). **A função socioambiental do patrimônio da União na Amazônia**. Brasília: Ipea, 2016. p. 315-322.

Cánovas-García, F.; Alonso-Sarría, F. Optimal combination of classification algorithms and feature ranking methods for object-based classification of submeter resolution Z/I-Imaging DMC Imagery. **Remote Sensing**, v. 7, p. 4651-4677, 2015. doi: 10.3390/rs70404651.

Carvalho Júnior, O.A.; De Carvalho, A.P.F.; Meneses, P.R.; Guimarães, R.F. Classificação e Eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20 (1), 2002.

Carvalho Júnior, O.A.; Maciel, L.M.M.; De Carvalho, A.P.F.; Guimarães, R.F.; Silva, C.R.; Gomes, R.A.T; Silva, N.C. Probability Density Componentes Analysis: A New Approach to Treatment and Classification on SAR Images. **Remote Sensing**, v. 6, p. 2989-3019, 2014. doi: 10.3390/rs6042989.

Chust, G.; Ducrot, D.; Pretus, J.L.L. Land cover discrimination potential of radar multitemporal series and optical multispectral images in a Mediterranean cultural landscape. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25 (17), p. 3513-3528, 2004.

Costa, L.M.M.; Zeilhofer, P.; Rodrigues, W.S. Avaliação do classificador SVM (Support Vector Machine) no mapeamento de queimadas no Pantanal Mato-Grossense. **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE: p. 001-005, 2010.

Costa, M.P.F.; Telmer, K.H. Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetlands. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, p. 204-213, 2006. doi: 10.1016/j.rse.2006.06.014.

Deák, B.; Valkó, O.; Török, P.; Kelemen, A.; Tóth, K.; Migléc, T.; Tóthmérész, B. Reed cut, habitat diversity and productivity in wetlands. **Ecological Complexity** v. 22, p. 121-125, 2015. doi: 10.1016/j.ecocom.2015.02.010.

Dellepiane, S.G.; Angiati, E. A new method for cross-Normalization and multitemporal visualization of SAR Images for the detection of flooded areas. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, p. 2765-2779, 2012. doi: 10.1109/TGRS.2011.2174999.

Dias, A.P. **Análise Espacial aplicada na delimitação de Áreas Úmidas da Planície de Inundação do Médio Araguaia**. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Mato Grosso-UFMT, Cuiabá, 2014.

Domingues, M.S.; Bermann, C. O arco do desmatamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & Sociedade**, v. XV, p. 1-22, 2012.

Duffy, W.G.; Kahara, S.N. Wetland ecosystem services in California's Central Valley and implications for the Wetland Reserve Program. **Ecological Applications**, v. 21(3), p. S18-S30, 2011.

Evans, T.L.; Costa, M.; Telmer, K.; Silva, T.S.F. Using ALOS/PALSAR and RADARSAT-2 to Map Land Cover and Seasonal Inundation in the Brazilian Pantanal. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. (3), p. 560-575, 2010. doi: 10.1109/JSTARS.2010.2089042.

Fearnside, P.M.; Graça, P.M.L.A. BR-319: Brazil's Manaus-Porto Velho Highway and the Potential Impact of linking the Arc of Deforestation to Central Amazonia. **Environmental Management**, v. 38, p. 705-716, 2006. doi: 10.1007/s00267-005-0295-y.

Frappart, F. ; Seyler, F.; Martinez, J.; León, J. ; Cazenave, A. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 387-399, 2005. doi: 10.1016/j.rse.2005.08.016.

Fu, B.; Wang, Y.; Campbell, A.; Li, Y.; Zhang, B.; Yin, S.; Xing, Z.; Jin, X. Comparison of object-based and pixel-based Random Forest algorithm for wetland vegetation mapping using high spatial resolution GF-1 and SAR data. **Ecological Indicators**, v. 73, p. 105-117, 2017. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.09.029.

Furtado, L.F.A.; Silva, T.S.F.; Novo, E.M.L.M. Dual-season and full-polarimetric C band SAR assessment for vegetation mapping in the Amazon várzea wetlands. **Remote Sensing of Environment**, v. 174, p. 212-222, 2016. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.013.

Green, A.A.; Berman, M.; Switzer, P.; Craig, M.D. A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 26 n. 1, 1988.

Guerra, A.T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8º ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993, p.446.

Giustarini, L.; Hostache, R.; Matgen, P.; Shumann, G.J.P. A change detection approach to Flood Mapping in urban áreas using TerraSAR-X. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 51, p. 2417-2430, 2013. doi: 10.1109/TGRS.2012.2210901.

Gutzwiller, K.J.; Flather, C.H. Wetland features and landscape context predict the risk of wetland habitat loss. **Ecological Applications**, v. 21(3), p. 968-982, 2011.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Filoso, S.; Wang, Y. Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, p. 896-904, 1995.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Novo, E.M.L.M.; Barbosa, C.C.F.; Gastil, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428, 2003. doi: 10.1016/j.rse.2003.04.001.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Affonso, A.G.; Barbosa, C.; Gastil-Buhl, M.; Novo, E.M.L.M. Wetlands of the Lowland Amazon Basin: Extent, Vegetative Cover, and Dual-season Inundated Area as Mapped with JERS-1 Synthetic Aperture Radar. **Wetlands**, v. 35, p. 745-756, 2015. doi: 10.1007/s13157-015-0666-y.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

Irion, G.; Nunes, G.M.; Nunes-da-Cunha, C.; Arruda, E.C.; Santos-Tambelini, M.; Dias, A.P.; Morais, J.O.; Junk, W.J. Araguaia River Floodplain: Size, Age, and Mineral Composition of a Large Tropical Savanna Wetland. **Wetlands**, 2016. doi: 10.1007/s13157-016-0807-y.

Iriondo, M. Geomorfologia da planície Amazônica. **SBG, Simpósio do Quaternário do Brasil**, v. 4, p. 323-348, 1982.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). **ALOS-2/PALSAR-2 Level 1.1/1.5/2.1/3.1 CEOS SAR Product Format Description**. Disponível em: <[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/doc/fdata/PALSAR-2\\_xx\\_Format\\_CEOS\\_E\\_r.pdf](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/doc/fdata/PALSAR-2_xx_Format_CEOS_E_r.pdf)>. Acesso em 01 julho 2016.

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). **Satellites and Spacecraft: Advanced Land Observing Satellite-2 “DAICHI-2” (ALOS-2)**. Disponível em: <<http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/>>. Acesso em 01 julho 2016.

Jensen, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos, SP, 2009.

Junk, W.J.; Bayley, P.B.; Sparks, R.E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *In*: DODGE, D. P [ed.]. **Proceedings of the international Large River Symposium**, p. 110-127, 1989.

Junk, W.J.; Piedade, M.T.F.; Schöngart, J.; Cohn-Haft, M.; Adeney, J.M.; Wittmann. A Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands. **Wetlands**, v. 31, p. 623-640, 2011. doi: 10.1007/s13157-011-0190-7.

Junk, W.J.; Piedade, M.T.F. Status of knowledge, ongoing research, and research needs in Amazonian wetlands. **Wetlands Ecology and Management**, v. 12, p. 597-609, 2004.

Kasischke, E.S.; Melack, J.M.; Dobson, M.C. The use of Imaging Radar for Ecological applications – A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 141-156, 1997.

Landis, J.R.; & Koch, G.G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **International Biometric Society**, v. 33, p. 159-174, 1977. doi: 10.2307/2529310.

Latrubesse, E.M.; Setaux, J.C. Características físico-bióticas e problemas ambientais associados à planície aluvial do rio Araguaia, Brasil Central. **Geociências**, v. 5, p. 65-73, 2006.

Maciel, L.M.M. **Processamento de imagens ALOS/PALSAR aplicado à regularização fundiária na Amazônia**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília-UnB, Brasília, 2012.

Marechal, C.; Pottier, E.; Hubert-Moy, L.; Rapinel, S. One year wetland survey investigations from quad-pol RADARSAT-2 time-series SAR images. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 38(03), p. 240-252, 2012.

Martins, A.K.E.; Schaefer, C.E.G.R. Mapeamento de unidades geomorfológicas na Fazenda Lago Verde, planície do Araguaia, município da Lagoa da Confusão, estado do Tocantins. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16-21, p. 1831-1838, 2005.

Martins, F.S.R.V.; Santos, J.R.; Galvão, L.S.; Xaud, H.A.M. Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in northern Amazon. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 46, p. 163-174, 2016. doi: 10.1016/j.jag.2016.02.009.

Melack, J.M.; Hess, L.L. Remote sensing of the distribution and extent of wetlands in the Amazon basin. In: Junk, W.J.; Piedade, M.T.F.; Wittmann, F.; Schöngart, J.; Parolin, P. (eds). **Amazon floodplain forests: Ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. Springer, Ecological Studies, p. 43-59, 2010.

Ministério do Meio Ambiente (MMA/ANA). **Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia**: Relatório Síntese. Brasília: ANA, 2009, p.256.

Ministério do Meio Ambiente (MMA/IBAMA). **Plano de Manejo do Parque Nacional do Araguaia – TO**. Brasília, 2001, p. 103.

Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG/SPU). **Orientação Normativa que**

**disciplina a demarcação de terrenos marginais e seus acrescidos** (ON-GEADE-003). Brasília, 2001, p 37.

Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG/SPU). **Plano Nacional de Caracterização** (PNC). Brasília, 2014, p. 73.

Morais, R.P.; Aquino, S.; Latrubesse, E.M. Controles hidrogeomorfológicos nas unidades vegetacionais da planície aluvial do rio Araguaia, Brasil. **Acta Scientiarum - Biological Sciences**, v. 30, p. 411-421, 2008. doi: 10.4025/actascibiols.v30i4.5871.

Okada, Y.; Hamasaki, T.; Tsuji, M.; Iwamoto, M.; Hariu, K.; Kankaku, Y.; Suzuki, S.; Osawa, Y. Hardware performance of L-Band SAR system onboard ALOS-2. **IEEE**, p. 894-897, 2011. doi: 978-1-4577-1005-6/11.

Prance, G.T. A terminologia dos tipos de florestas amazônicas sujeitas a inundação. **ACTA Amazônica**, v. 10(3), p. 495-504, 1980.

Rajendran, S.; Al-Sayigh, A.R.; Al-Awadhi, T. Vegetation analysis study in and around Sultan Qaboos University, Oman, using Geoeye-1 satellite data. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 19, p. 297-311, 2016. doi: 10.1016/j.ejrs.2016.03.005.

RAMSAR CONVENTION. Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat (Iran), 2 February 1971. UN Treaty Series nº 14583. As amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987, 1971.

Rosenqvist, A.; Shimada, M.; Suzuki, S.; Ohgushi, F.; Tadono, T.; Watanabe, M.; Tsuzuku, K.; Watanabe, T.; Kamijo, S.; Aoki, E. Operational performance of the ALOS global systematic acquisition strategy and observation plans for ALOS-2 PALSAR-2. **Remote Sensing of Environment**, v. 155, p. 3-12, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2014.04.011.

Santos, M.T. Aprendizados do projeto de manejo dos recursos naturais da várzea – ProVárzea. **Série Estudos**, 4. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 53, 2005.

Schlögel, R.; Doubre, C.; Malet, J.; Masson, F. Landslide deformation monitoring with ALOS/PALSAR imagery: A D-InSAR geomorphological interpretation method. **Geomorphology**, v. 231, p. 314-330, 2015. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.11.031.

Shi, Z.; Fung, K.B. A comparison of Digital Speckle Filters. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, p. 2129-2133, 1994. doi: 0-7803-1497-2/94.

Shimada, M.; Tadono, T.; Rosenqvist, A. Advanced Land Observing Satellite (ALOS) and Monitoring Global Environmental Change. **Proceedings of the IEEE**, v. 98, p. 780-799, 2010. doi: 10.1109/JPROC.2009.2033724.

Silva, M.J.; Sato, M.T. Territórios em tensão: o mapeamento dos conflitos socioambientais do Estado de Mato Grosso-Brasil. **Ambiente & Sociedade**, 2012.

Sioli, H. Studies in amazon waters. **Atas do Simpósio sobre a biota amazônica**, v. 9-50, 1967.

Souza-Filho, P.W.M.; Paradella, W.R.; Rodrigues, S.W.P.; Costa, F.R.; Mura, J.C.; Gonçalves, F.D. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multi-polarized L-band airborne Synthetic Aperture Radar imagery. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 95, p. 88-98, 2011. doi: 10.1016/j.eccs.2011.08.011.

Szuster, B.W.; Chen, Q.; Borger, M. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. **Applied Geography**, v. 31, p. 525-532, 2011. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.11.007.

Urbazaev, M.; Thiel, C.; Mathieu, R.; Naidoo, L.; Levick, S.R.; Smit, I.P.J.; Asner, G.P.; Scmullius, C. Assessment of the mapping of fractional woody cover in southern African savannas using multi-temporal and polarimetric ALOS PALSAR L-band images. **Remote Sensing of Environment**, v. 166, p. 138-153, 2015. doi: 10.1016/j.rse.2015.06.013.

Viana, S.N. **Análise de Imagens do Satélite ALOS PALSAR para discriminar fitofisionomias do Bioma Cerrado**: Estudo de caso no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Geociência) – Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2012.

Waske, B. & Braun, M. Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64(5), p. 450-457, 2009.

Watson, K. B.; Ricketts, T.; Galford, G.; Polasky, S.; O’Niel-Dunne, J. Quantifying flood mitigation services: The economic value of Otter Creek wetlands and floodplains to Middlebury, VT. **Ecological Economics**, v. 130, p. 16-24, 2016. doi: 10.1016/j.ecolecon.2016.05.015.

White, L.; Brisco, B.; Dabboor, M.; Schmitt, A.; Pratt, A. A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands. **Remote Sensing**, v. 7, p. 7615-7645, 2015. doi: 10.3390/rs70607615.

Zedler, J.B.; Kercher, S. Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and

Restorability. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, v. 30, p. 39-74, 2005. doi: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144248.

Zhang, H. ; Lin, H. ; Li, Y. ; Zhang, Y. ; Fang, C. Mapping urban impervious surface with dual-polarimetric SAR data: An improved method. *Landscape and Urban Planning*, v. 151, p. 55-63, 2016. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.03.009.

Zhao, L.; Yang, J.; Li, P.; Zhang, L. Seasonal inundation monitoring and vegetation pattern mapping of the Erguna floodplain by means of a RADARSAT-2 fully polarimetric times series. *Remote Sensing of Environment*, v. 152, p. 426-440, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2014.06.026.

Zuhlke, M.; Fomferra, N.; Brockmann, C.; Peters, M.; Veci, L.; Malik, J.; Regner, P. SNAP (Sentinel Application Platform) and the ESA Sentinel 3 Toolbox. In: *Sentinel-3 for Science Workshop*, v. 734, p. 21, 2015.