



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

GABRIEL VITORELI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DO
USO DO SOLO DE ÁREAS INUNDADAS NO PANTANAL NORTE – MT, POR MEIO
DE IMAGENS ALOS-PALSAR

Cuiabá – MT

Nov/2013

GABRIEL VITORELI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DO
USO DO SOLO DE ÁREAS INUNDADAS NO PANTANAL NORTE – MT, POR MEIO
DE IMAGENS ALOS-PALSAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Ciências Humanas e Sociais da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Peter Zeilhofer

Cuiabá – MT

Nov/2013

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

V845a Vitoreli de Oliveira, Gabriel.
ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO E
CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO DE ÁREAS INUNDADAS NO
PANTANAL NORTE – MT, POR MEIO DE IMAGENS ALOS-PALSAR / Gabriel
Vitoreli de Oliveira. -- 2013
70 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Peter Zeilhofer.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de
Ciências Humanas e Sociais, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Cuiabá,
2013.

Inclui bibliografia.

1. áreas úmidas. 2. imagens de radar. 3. sensoriamento remoto. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

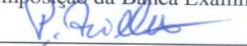




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
Avenida Fernando Corrêa da Costa, 2367 - Boa Esperança - Cep: 78060900 - CUIABÁ/MT
Tel : - Email :

ATA DE DEFESA PÚBLICA
Mestrando(a) Gabriel Vitoreli de Oliveira

Aos 5 dias do mês de Novembro do ano de 2013, à 14:00 horas, no(a) sala 13 da Pós Graduação de Geografia-ICHS, sob a presidência do(a) professor(a) Doutor(a) Peter Zeilhofer, orientador(a), reuniu-se em sessão pública a Banca Examinadora de defesa da Dissertação de Mestrado, o(a) discente Gabriel Vitoreli de Oliveira do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, visando a obtenção de título de MESTRE EM GEOGRAFIA. O Mestrando concluiu os créditos exigidos para obtenção do título de Mestre, na Área de Concentração AMBIENTE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, e foi aprovado no Exame de Qualificação no dia 22 de Agosto de 2013, de acordo com os registros constantes na Secretaria do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA. Esta foi a 0ª sessão pública de Defesa de Dissertação do Programa. Os trabalhos foram instalados às 14:00 horas pelo presidente da Banca Examinadora, constituída pelos professores Doutores Peter Zeilhofer (Presidente Banca / Orientador/69682143187), Gustavo Manzon Nunes (Examinador Interno/88970906053), Emerson Soares dos Santos (Examinador Interno/89433424115), Lunalva Moura Schwenk (Examinador Suplente/18138977191). O(A) pós-graduando(a) procedeu à apresentação de seu trabalho, cujo título é "ANÁLISE DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO DE ÁREAS INUNDADAS NO PANTANAL NORTE-MT, POR MEIO DE IMAGENS ALOS-PALSAR". E em seguida foi arguido(a) pelos integrantes da banca. Os trabalhos de arguição foram encerrados às 15:15 horas, e após reunião a Banca deliberou por sua aprovação. Proclamando o resultado final pelo(a) Presidente da Banca Examinadora foram concluídos os trabalhos. O título de Mestre será conferido sob condição de apresentação, na Secretaria do Programa, da versão final corrigida na(s) forma(s) e no prazo estabelecido(s) no Regimento Interno do Programa (45 dias) juntamente com o Termo de Aprovação do Orientador. Cumpridas as formalidades, às 16:23 horas, o(a) presidente da mesa encerrou a sessão de defesa, e para constar eu, Ercilia Verônica Barcelo Secretário(a) do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos integrantes da banca examinadora em 03 vias de igual teor.

Composição da Banca Examinadora:

1.  Doutor(a) Peter Zeilhofer (Presidente Banca / Orientador)
2.  Doutor(a) Gustavo Manzon Nunes (Examinador Interno)
3.  Doutor(a) Emerson Soares dos Santos (Examinador Interno)
4. _____ Doutor(a) Lunalva Moura Schwenk (Examinador Suplente)

Recomendações da Banca :

Ciência do(a) Discente: 

CUIABÁ, 05/11/2013.

* Este documento tem validade de 24 meses contados a partir da data de sua emissão.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida,

Aos meus pais pela educação e pelo amor,

A Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso – SEMA, pelo apoio e pelo
aprendizado,

Ao professor Peter Zeilhofer pela orientação,

Ao professor Gustavo Manzon Nunes pela grande colaboração neste trabalho,

Ao Prof. Dr. Shimon Wdowinski, da Division of Marine Geology and Geophysics Rosenstiel
School of Marine & Atmospheric Science, University of Miami, pelo fornecimento das
imagens Palsar e pelo apoio científico

ABSTRACT

Wetlands perform a vital ecological role in the maintenance of local and global ecosystems, also appear as one of the most fragile ecosystems on Earth, they are highly susceptible to human actions. Despite this susceptibility, there is a strong deficiency in monitoring these areas, which requires further study in this theme. Currently, remote sensing has become an indispensable tool in the natural resources monitoring. Depending on the imaging characteristics, radar is presented as an efficient alternative for mapping wetlands, since it uses wavelengths which penetrate vegetation and interact with soil and water depth. In this context, this work aims to assess the potential of ALOS/PALSAR (L-band, HH polarization) in the delineation of flood due to the soil different classes, and assess the potential of contextual classifier ICM-MAXVER in classification of land use of Pirizal region in Poconé-MT, Pantanal biome. Were extracted and analyzed backscattering coefficient values of ALOS/PALSAR in flooded and not flooded areas. We sought to develop a classification model from the backscatter coefficient values for identifying these areas, with data validation observed in the study area. Was performed a radar image classification with the contextual classifier MAXVER-ICM to attest the ALOS/PALSAR image's potential in discrimination of different land uses in the grid Pirizal. The results showed that the radar images in the L band are effective in identifying flooded and not flooded forests. The graphs and tables generated from the logistic regression indicated that this sensor presents limitations to separate flooded fields to fields during the dry season. The contextual classifier showed excellent results in delineation of the different land use classes in the study area, with a Kappa index of 0.977 and global accuracy of 98.30% .

Keywords: wetlands, radar images, remote sensing.

RESUMO

As áreas úmidas desempenham funções ecológicas imprescindíveis para a manutenção dos ecossistemas local e global, configuram-se também como um dos ecossistemas mais frágeis da Terra, pois são altamente susceptíveis às ações humanas. Apesar dessa elevada susceptibilidade, existe forte deficiência no monitoramento dessas áreas, necessitando de estudos mais aprofundados. Atualmente o sensoriamento remoto se tornou uma ferramenta indispensável no monitoramento dos recursos naturais. Em função das características de imageamento, o radar apresenta-se como uma alternativa eficaz para o mapeamento de áreas inundadas, uma vez que utiliza comprimentos de ondas que penetram na vegetação e interagem com solo e com a lâmina d'água. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial das imagens ALOS/PALSAR (banda L, polarização HH) na delimitação da inundação em função das diferentes classes do solo, bem como avaliar a potencialidade do classificador contextual ICM-MAXVER na classificação do uso do solo da região do Pirizal, em Poconé - MT, bioma Pantanal. Foram extraídos e analisados os valores do coeficiente de retroespalhamento das imagens ALOS/PALSAR de áreas inundadas e não inundadas. Buscou-se desenvolver um modelo de classificação, a partir dos valores do coeficiente de retroespalhamento para identificação dessas áreas, com validação de dados observados na área de estudo. Executou-se ainda uma classificação uso do solo com o classificador MAXVER-ICM para atestar a potencialidade das imagens ALOS/PALSAR na discriminação dos diferentes usos na grade do Pirizal. Os resultados apontaram que as imagens de radar na banda L são eficientes na separação de matas inundadas e não inundadas. As tabelas de classificação geradas a partir da regressão logística indicaram que este sensor apresenta limitações para separar campos inundados de campos no período de seca. O classificador contextual apresentou resultado excelente na delimitação das diferentes classes do uso do solo na área de estudo, com um índice Kappa de 0,977 e exatidão global de 98,30%.

Palavras-chave: áreas úmidas, imagens de radar, sensoriamento remoto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético e bandas da região de micro-ondas.	15
Figura. 2.2 - Geometria de aquisição de dados de um RADAR.	15
Figura 2.3 - Esquema conceitual da simulação de uma antena sintética.....	17
Figura 2.4 - Diferença da interação das bandas L e C.....	21
Figura 2.5 – Polarização de um sinal de radiação eletromagnética.	22
Figura 2.6 – Ângulo de incidência	24
Figura 2.7 - Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: a - superfície lisa; b – superfície intermediária e c – superfície rugosa	26
Figura 2.8. Reflexão double-bounce	28
Figura 2.9 - Modelo teórico de espalhamento na banda C em áreas com vegetação herbácea, seca e inundada.	29
Figura 3.1 – Localização da Área de Estudo.....	35
Figura 3.2 - Perfil esquemático da Savana (Cerrado)	37
Figura 3.3 Tipos ambientes encontrados na área da grade do Pirizal	39
Figura 3.4 Fluxograma das etapas do trabalho	45
Figura 3.5– Mapa de Uso do solo Pirizal – adaptado de Zerwes (2012).	48
Figura 3.6 – Mapa de uso do solo, pontos amostrais aleatórios e pontos de monitoramento com dados de inundação da grade do Pirizal	51
Figura 4.1 - Boxplots com os valores coeficiente de retroespalhamento obtidos nas imagens ALOS/PALSAR.....	54
Figura 4.2 – Imagem ALOS/PALSAR de 10/02/2007 da grade do Pirizal. destaque para o comportamento das diferentes classes de uso do solo.....	57
Figura 4.3 Ambientes secos na estação seca e inundados na estação das águas.....	58
Figura 4.4 - Valores de retroespalhamento identificados em diferentes tipos de uso do solo	63
Figura 4.5 – Mapas resultantes da classificação MAXVER e MAXVER/ICM na Grade do Pirizal – Imagem ALOS/PALSAR de 10/02/2007.	64
Figura 4.6 – Comparação entre a classificação MAXVER/ICM e o mapa de uso do solo de Zewers (2012).....	67

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 - Características dos Sistemas de RADAR	18
Quadro 2.2 - Principais bandas polarizações utilizadas por radares imageadores	20
Quadro 2.3 – Índice Kappa	33
Quadro 3.1 – Características dos subgrupos de Savana encontrados na Grade do Pirizal	37
Quadro 3.2 - Características do Satélite ALOS.....	41
Quadro 3.3. Características do sensor Palsar	43
Quadro 3.4 – Características das imagens PALSAR utilizadas	43
Tabela 3.1 – Descrição das classes.....	47
Tabela 4.1 - Valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão dos pontos observados com o coeficiente de retroespalhamento por classe do uso do solo	53
Tabela 4.2 – Variação dos valores médios do coeficiente de retroespalhamento dos períodos de seca e cheia de 2007 e 2008.....	56
Tabela 4.3 - Valores de média e desvio padrão do coeficiente de retroespalhamento extraídos das quatro imagens ALOS/PALSAR e os p-valores do Teste U com nível de significância de 5%.	59
Tabela 4.4 – Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento das classes mata, cordilheira, campo e campo de murundus nas situações de inundação e não inundação	60
Tabela 4.5 – Resumo do modelo de regressão resultante da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento das classes mata, cordilheira, campo e campo de murundus	60
Tabela 4.6 – Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe mata nas situações de inundação e não inundação	61
Tabela 4.7 - Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe campo nas situações de inundação e não inundação	61
Tabela 4.8 - Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe campo de murundus nas situações de inundação e não inundação	61
Tabela. 4.9 - Exatidão das classificações dos dados ALOS/PALSAR HH, em amplitude na banda L	64
Tabela 4. 10 - Matriz de confusão para a classificação ICM HH	65
Tabela 4. 11 - Matriz de confusão para a classificação MAXVER HH.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	11
1.2 Objetivo Geral.....	12
1.3. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. Características gerais do Sensoriamento Remoto por RADAR.....	14
2.2. Parâmetros de imageamento	19
2.2.1 Comprimento de onda	19
2.2.2 Polarização	22
2.2.3 Ângulo de Incidência	23
2.3. Características de reflexão dos alvos em imagens de RADAR	24
2.4. Características do retroespalhamento em áreas úmidas.....	27
2.5. Aplicações SAR no estudo de áreas alagadas do Brasil e no mundo	29
2.6 Classificação de imagens SAR	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3. 1. Área de estudo	35
3.2. Caracterização das fitofisionomias e unidades de paisagem da área de estudo.....	36
3.3 Materiais	41
3.3.1 Mapa de uso do solo.....	41
3.3.2 Satélite Avançado de Observação da Terra ALOS, sensor PALSAR.....	41
3.4 Metodologia	43
3.4.1 Mapa de uso do solo.....	47
3.4.2 Processamento das Imagens ALOS/PALSAR para extração dos valores do coeficiente de retroespalhamento	49
3.4.3 Classificação da imagem ALOS/PALSAR com o classificador MAXVER/ICM...	49
3.4.4 Geração de pontos amostrais e extração dos valores de coeficiente de retroespalhamento por classe de uso do solo.	50
3.4.5 Análise estatística.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos sistemas sensores de observação da Terra propiciou que nos últimos anos o sensoriamento remoto se tornasse uma ferramenta indispensável no mapeamento e monitoramento dos recursos naturais. Atualmente existem inúmeros sensores que operam nas mais variadas regiões do espectro eletromagnético (visível, infravermelho e micro-ondas) que vêm sendo amplamente aplicados nestes estudos.

Observa-se também que com o crescente aumento da disponibilidade de dados ambientais, adquiridos principalmente por plataformas orbitais, os estudos atuais que utilizam estes insumos têm ganhado em qualidade, apresentando maior riqueza nas informações obtidas com maior confiabilidade nos dados.

Neste contexto, nota-se que as de imagens de RADAR são cada vez mais ferramentas úteis aplicadas ao mapeamento e monitoramento de recursos naturais. O termo RADAR é o acrônimo de '*Radio detection and ranging*' (detecção e localização por meio das micro-ondas), caracteriza-se por ser um sistema ativo que gera sua própria radiação na faixa das micro-ondas, emitindo pulsos de energia que interagem com o alvo e retornam para o sistema sensor.

Um exemplo da aplicação destas imagens é o monitoramento e o mapeamento de áreas úmidas, que sazonalmente apresentam grandes extensões de áreas inundadas. Os dados ópticos de sensoriamento remoto não possibilitam o mapeamento correto da extensão total inundada, uma vez que este ambiente contém alvos que compreende áreas de águas abertas, áreas com inundações sob áreas de vegetação permanente ou temporária, como plantas aquáticas emersas, vegetação arbóreo-arbustiva e florestas. Em uma imagem óptica, áreas densas de vegetação inundada não permitem a identificação do sinal radiométrico da água, o que torna impossível o mapeamento da área total inundada.

Em função das características de imageamento, o radar apresenta-se como uma alternativa eficaz para o mapeamento de áreas inundadas, uma vez que utiliza comprimentos de ondas maiores que penetram parcialmente na vegetação e interagem com solo e com a lâmina d'água, dependendo da banda utilizada.

Some-se a isso a capacidade destes sensores de gerarem imagens independentemente da iluminação solar e condições climáticas, pois possuem fonte própria de radiação, permitindo a aquisição regular e recorrente de imagens durante todo o ano, incluindo nos períodos chuvosos.

Trabalhos publicados nos últimos anos mostram o potencial das imagens de radar em mapear as áreas inundadas, como os desenvolvidos por Costa, 2000, Hess et al, 2003; Novo 2006, Martinez e Toan 2007, Evans et. al 2010, Sartori et al, 2009, Teixeira 2011, Freitas 2012, Zani et al, 2013, Furtado et. al. 2013. Os trabalhos destes autores utilizaram dados de radar em variados comprimentos de onda para estudos de áreas alagadas na Amazônia brasileira, em áreas costeiras e no Pantanal, afirmando a potencialidade destes insumos na discriminação de alvos em ambientes tropicais úmidos.

1.1 Justificativa

A planície pantaneira situa-se na depressão do Alto Paraguai, delimitado a oeste pela Cordilheira dos Andes e a leste pelo Planalto Central Brasileiro e consiste em umas das maiores áreas úmidas do planeta.

As áreas úmidas, conhecidas mundialmente como “*wetlands*”, são regiões que oscilam periodicamente entre fases terrestres e aquáticas e compreendem cerca de 4 a 6% da superfície terrestre, ocorrendo em todos os climas e continentes (MITSCH e GOSELINK, 2000). As funções ecológicas das áreas úmidas são imprescindíveis para manter o ecossistema local e global, sendo responsáveis pelo armazenamento de água, transformações de nutrientes, crescimento de matéria viva, entre outras funções importantes (NOVITZKI et al, 1996).

As áreas úmidas tropicais são importantes no ciclo global do carbono, agindo como recicladores do dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e como uma das maiores fontes naturais de metano (MELACK et al, 2004).

Contudo, essas áreas representam um dos ecossistemas mais frágeis da Terra, pois são altamente susceptíveis às ações humanas (GOPAL e JUNK, 2000).

No caso do Pantanal, embora o referido bioma tenha sido declarado reserva da biosfera e patrimônio mundial natural pela UNESCO e possua várias unidades de conservação

em sua área, nos últimos anos vem sofrendo vários impactos ambientais. Dos mais de 6 (seis) milhões de hectares de Pantanal existentes em Mata Grosso, 24,2% já foram desmatados (SEMA-MT, 2012), causando sérios prejuízos à dinâmica ambiental da região.

Segundo Junk (2002), apesar dessa elevada susceptibilidade, existe forte deficiência no monitoramento dessas áreas, constatação que persiste atualmente. Assim, o Pantanal mato-grossense necessita de estudos mais aprofundados, visando melhorar o conhecimento científico. Nesse intuito, o uso de imagens de radar, devido a sua sensibilidade ao alagamento e umidade pode gerar insumos importantes para serem utilizados na preservação da natureza e apoiar o uso sustentável do bioma.

Atualmente existem no Pantanal duas grades de pesquisas instaladas, a grade do Pirizal (Pantanal Norte) e a de Nhumirim (Pantanal Sul). Além destas duas grades, há outros dois módulos, que são porções menores de uma grade, implantados no Pantanal de Cáceres e no Pantanal de Barão de Melgaço. O desenho amostral utilizado de grades foi criado com o objetivo de desenvolver um método que fosse apropriado para pesquisas ecológicas de longa duração (PELD), mas que também permitisse a realização de inventários rápidos (RAP). Este sistema de pesquisa foi adotado pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio), financiado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil (MCT) (SIGNOR et al, 2010).

Embora a região da grade do Pirizal, localizada no Pantanal norte, tenha estudos que foram desenvolvidos nesse local, como Nunes da Cunha et al, 2010; Fantin-Cruz, et al, 2010, nenhum deles utilizou dados de radar para a identificação de áreas alagadas levando em consideração a cobertura do uso do solo, ressaltando a importância deste estudo no entendimento do comportamento dos alvos da região, bem como fornecendo insumos para um maior conhecimento da dinâmica ambiental na área. Hipotetiza-se que o mapeamento do relevo e o monitoramento da inundação de alta resolução espaço-temporal realizados nesta área entre os anos 2006 e 2010 permitem nesse contexto uma validação sistemática de informações extraídas de imagens orbitais e assim uma contribuição de cunho metodológico sobre as potencialidades do sistema ALOS/PALSAR em uma das mais importantes áreas úmidas do planeta.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é avaliar o potencial das imagens ALOS/PALSAR (banda L, polarização HH) para mapeamento de inundação em função das diferentes classes

de cobertura e uso do solo representativas da região do Pirizal, em Poconé - MT, bioma Pantanal.

1.3. Objetivos Específicos

a) Extrair e analisar os valores do coeficiente de retroespalhamento das imagens ALOS/PALSAR de áreas inundadas e não inundadas em diferentes classes de cobertura do solo da grade PELD do Pirizal no Pantanal Mato-grossense.

b) Desenvolver um modelo de classificação, a partir dos valores do coeficiente de retroespalhamento para identificação das áreas inundadas, em diferentes classes de cobertura do solo da grade do Pirizal, com validação de dados observados na área de estudo.

c) Avaliar, por meio de classificador contextual, a potencialidade das imagens ALOS/PALSAR na discriminação dos diferentes usos do solo na grade do Pirizal.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Características gerais do Sensoriamento Remoto por RADAR

Nos últimos anos o sensoriamento remoto tem evoluído a passos largos, apresentando insumos qualificados para o mapeamento das alterações ambientais nas mais variadas escalas e objetivos.

Dentre os sensores utilizados para o monitoramento da dinâmica ambiental, técnicos e estudiosos têm à sua disposição uma vasta gama de sistemas sensores. Existem inúmeros trabalhos tratando da utilização de sensores passivos e ativos nos estudos relacionados á esta temática. Esta divisão entre os sensores relaciona-se à fonte de energia utilizada pelo equipamento, sendo que os sensores passivos são os que registram a energia eletromagnética emitida pelo Sol e refletida ou emitida pelos alvos, e os sensores ativos são os que geram sua própria energia, que é transmitida para o alvo, interage com o mesmo e é registrada pelo receptor (JENSEN, 2009).

Como exemplo de insumos gerados por sensores passivos, tem-se as fotografias aéreas e as imagens de satélites chamadas óticas ou as termais. Como exemplos de produtos obtidos por sensores ativos têm-se as imagens geradas por RADAR (micro-ondas ativo), LIDAR e SONAR.

O termo RADAR tem sua origem ligada aos sistemas de detecção de objetos e determinação de sua distância a partir de medidas tomadas na região das micro-ondas. Esses sistemas foram desenvolvidos em países de língua inglesa, e a palavra RADAR deriva-se da expressão Radio Detection and Ranging. (NOVO, 2006).

Para Sabins (1996) os radares são definidos como sistemas sensores ativos para a detecção e localização de alvos que geram sua própria radiação na faixa das micro-ondas e realizam detecção em faixas de rádio e medição de distância, cujos comprimentos de onda variam de 1 cm a 1,5 m (0.3 a 300 Ghz) (Figura 2.1).

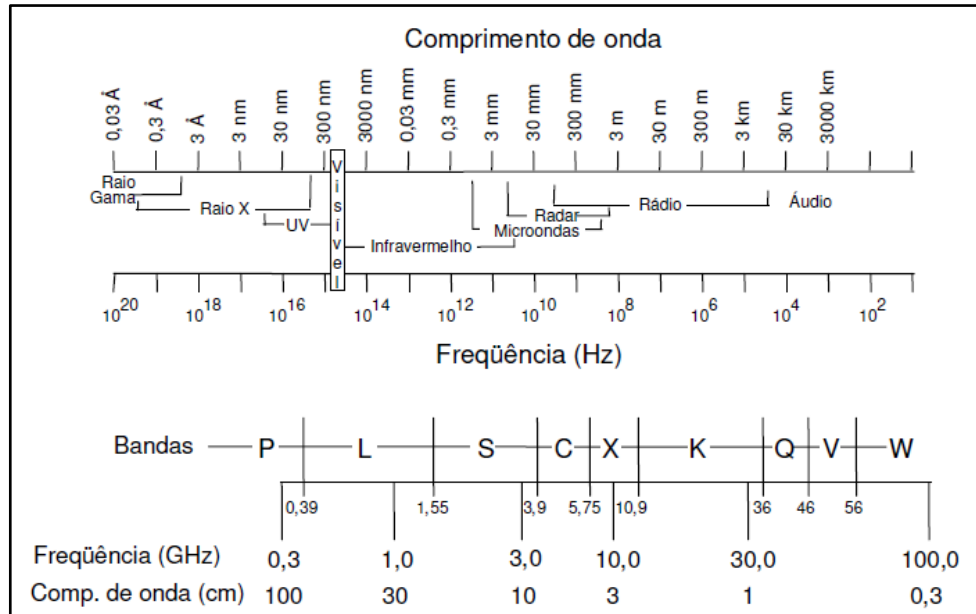


Figura 2.1 – Espectro eletromagnético e bandas da região de micro-ondas.
 Fonte: Adaptada de Dallemand et al (1993) apud Freitas (2007).

Berkowitz (1965) definiu um RADAR como uma alternativa para estender a percepção humana em determinar a presença e a localização de objetos pelo uso de ecos de ondas de rádio. O RADAR é, portanto, uma importante obra da revolução tecnológica que aconteceu no século XX e que aproveita da característica da energia eletromagnética se propagar pela atmosfera de uma maneira que possa ser controlada. Para aplicações de imageamento da superfície terrestre, o RADAR deve ser transportado por uma aeronave ou uma plataforma orbital e ter uma geometria de iluminação e visada laterais conforme esboçado na Figura 2.2.

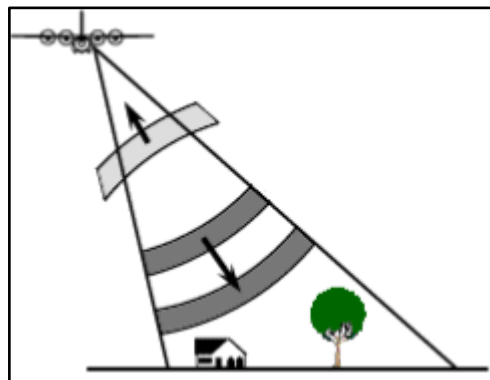


Figura. 2.2 - Geometria de aquisição de dados de um RADAR.
 FONTE: Adaptada de Canada Centre for Remote Sensing (2000).

O princípio de funcionamento de um RADAR baseia-se na medição do tempo de propagação que um sinal de radiação eletromagnética emitida pelo próprio radar leva para atingir um alvo e retornar. São denominados sensores ativos, pois emitem radiação eletromagnética e captam a porção dessa radiação que é espalhada pelos alvos na direção do sensor. A posição do alvo é determinada convertendo-se o tempo de propagação em distância radial e estabelecendo sua direção como a de apontamento da antena (VAN DER SANDEN, 1997).

Destaca-se aqui a utilização de dados de RADAR, mais especificamente de dados SAR - *Synthetic Aperture Radar* (radar de abertura sintética) que são produzidos por sistemas sensores ativos que operam na faixa de micro-ondas.

Um radar de abertura sintética (SAR) pode ser caracterizado como um sistema de radar em que os dados coletados pela antena são submetidos a um sofisticado processamento para simular ou “sintetizar” uma antena suficientemente grande para produzir um feixe estreito, e dessa forma melhorar a resolução espacial dos dados (NOVO, 2006).

Um esquema de como funciona um SAR pode ser observado na Figura 2.3, onde um ponto P começa a ser iluminado por um feixe de micro-ondas no instante t_i . De acordo com a velocidade da plataforma que carrega a antena, esse ponto fica dentro da área de iluminação até o instante t_f . O tamanho sintético da antena pode ser calculado multiplicando a velocidade da antena pela diferença entre t_f e t_i , isto é, $V \cdot (t_f - t_i)$. Com esse recurso cria-se uma antena virtual com dimensões maiores que a antena física, melhorando a resolução em azimute se comparado com o radar de abertura real. Desta forma pode-se conseguir uma resolução em azimute equivalente a metade do comprimento da antena, para qualquer comprimento de onda ou distância do alvo em relação à antena (PALME et al, 1996).

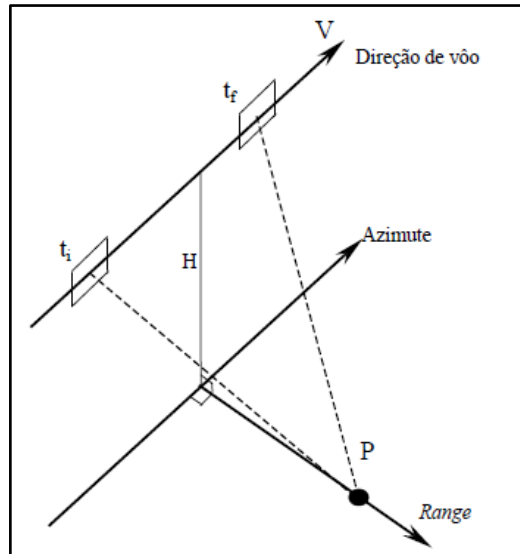


Figura 2.3 - Esquema conceitual da simulação de uma antena sintética.
 FONTE: Adaptada de Palme et al, (1996).

Segundo Novo (2006) a utilização de radiação de micro-ondas para o sensoriamento remoto da superfície terrestre é relativamente recente. Os primeiros sensores imageadores operando na região de micro-ondas só se tornaram operacionais no início da década de 1960. Embora a primeira demonstração do uso de radiação de micro-ondas para a detecção de navios surgisse em 1903, apenas em 1920 começaram a ser desenvolvidos os primeiros sistemas de radar para a detecção de navios e aviões.

A partir da década de 1960, o uso de sistemas de radares como sistemas imageadores de sensoriamento remoto começou a se tornar operacionais. O Brasil foi pioneiro na utilização de dados de RADAR aerotransportados para o levantamento de recursos naturais em extensas áreas com o Projeto RADAMBRASIL. Este projeto constituiu-se em um grande esforço do governo brasileiro para mapear os ecossistemas amazônicos utilizando um sistema de RADAR colocado a bordo de uma aeronave Caravelle e adquiria imagens analógicas da superfície terrestre em comprimento de onda de 3,12 cm e resolução espacial de 16 m (LIMA, 2008).

O RADAR, por ser um sistema ativo, pode obter imagens em qualquer hora do dia ou da noite. As micro-ondas podem facilmente atravessar nuvens e poluentes atmosféricos, pois a atenuação atmosférica dessas ondas é relativamente baixa (SOLER, 2000). A capacidade de gerar imagens em, praticamente, quaisquer condições de tempo é uma das

principais vantagens dos radares sobre os sistemas óticos (KUX, 1997). Novo (2006) elenca as três características principais dos sistemas de RADAR, conforme quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Características dos Sistemas de RADAR

Características dos Sistemas de RADAR		
Aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas	Maior capacidade de penetração na cobertura vegetal do terreno	Sinergia com os dados de outras regiões do espectro
Apesar de terem se desenvolvido mais recentemente, os sistemas de RADAR possuem várias características que contribuem para seu amplo uso. Uma das características mais importantes para o uso dos sensores ativos de micro-ondas é a de que a faixa de micro-ondas apresenta elevado coeficiente de transmissão através de nuvens permitindo a aquisição de dados independentemente das condições atmosféricas	Uma das características importantes dos sistemas de RADAR é o de permitirem a obtenção de informações do terreno através da cobertura vegetal. A radiação de micro-ondas tem maior poder de penetração nos dosséis de vegetação e no solo quando comparada à da radiação visível e infravermelho próximo. A capacidade de penetração da radiação de micro-ondas no dossel depende do comprimento de onda do sistema utilizado.	As variações de energia detectadas no visível e infravermelho são resultantes de processos de ressonância molecular nas camadas superficiais do solo e da vegetação, enquanto que as variações de energia detectadas na região de micro-ondas se devem às propriedades geométricas e dielétricas dos objetos.

Adaptado de Novo (2006). Fonte: Novo (2006).

As imagens de RADAR podem trazer benefícios quando comparadas com as imagens de sensores óticos. Como destacado no quadro 2.1, as imagens SAR podem ser geradas em qualquer condição climática, permitindo uma maior penetração na vegetação e uma interação com os demais alvos da superfície terrestre. Some-se a isso a capacidade de interação com os demais insumos detectados em outras regiões do espectro eletromagnético.

Devido o comprimento da onda eletromagnética de imagens de radar ser em escala centimétrica, a radiação eletromagnética pode penetrar em dosséis vegetais e alcançar o solo e geralmente mostram serem produtos mais interessantes de se avaliar, por exemplo, biomassa lenhosa do que sensores óticos (KASISCHKE et al, 1997).

Para Jensen (2009), o sensoriamento remoto por micro-ondas, continuará a crescer em importância. Segundo este autor, esses sensores são a única fonte de informações viável para as porções tropicais da Terra.

Contudo, em função do sistema sensor, as imagens de radar apresentam características distintas das imagens ópticas. A primeira refere-se à grandeza radiométrica correspondente aos níveis digitais. O sinal recebido pela antena de radar é amostrado e convertido numa imagem digital. O sinal registrado em cada pixel de uma imagem SAR depende do tipo de sistema utilizado. Nos sistemas mais simples, com uma única polarização, os dados medidos são apenas a amplitude e a intensidade do sinal. Nos sistemas SAR polarimétricos o sinal registrado é na realidade uma matriz de números complexos, da qual podem ser extraídas informações sobre amplitude, fase e intensidade de energia retroespalhada pela superfície.

Para que os valores de intensidade da energia retroespalhada possam se tornar equivalentes à refletividade dos objetos da superfície, a imagem SAR deve ser submetida a um processo de calibração radiométrica. Nesse processo, o valor digital – ND, de cada pixel é transformado em coeficiente de retroespalhamento expresso em decibéis (dB) (ULABY et al, 1986 apud NOVO, 2006).

2.2. Parâmetros de imageamento

Segundo Paradella et al, (2005), o comprimento de onda, a polarização e o ângulo de incidência são os parâmetros de imageamento mais importantes em RADAR.

Para Ford et al, (1998), os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento do RADAR estão relacionados ao sistema sensor (comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência, azimute de visada e resolução espacial) e aos alvos (rugosidade da superfície, constante dielétrica e orientação dos alvos).

Neste contexto, trataremos dos principais parâmetros que influem na aquisição dos dados SAR.

2.2.1 Comprimento de onda

Paradella (1996) relata que as bandas frequentemente utilizadas por radares imageadores são X, C, S, L e P, cujas características podem ser vistas no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Principais bandas polarizações utilizadas por radares imageadores

Banda	FREQUÊNCIA (GHz)	Comprimento de onda (cm)
P	0.4 - 1.0	30-75
L	1.0 - 2.0	15-30
S	2.0 - 4.0	7,5-15
C	4.0 - 8.0	3,7-7,5
X	8.0 - 12.0	2,5-3,7

As bandas mais aplicadas nos estudos de zonas úmidas são as bandas X, C e L. As bandas C e L também têm sido amplamente utilizadas, devido a uma maior disponibilidade de sensores orbitais com estas configurações, tais como o RADARSAT-1,2, ERS-1,2, ENVISAT, e SIR-C em banda C; e JERS-1 e ALOS-PALSAR em banda L.

Paradella (1996) ressalta que o comprimento de onda é uma variável importantíssima, pois controla o coeficiente de retroespalhamento e a profundidade de penetração. A capacidade de penetrar através da precipitação e em uma camada de superfície aumenta para comprimentos da onda maiores. Os radares que operam em comprimento de onda superior a 2 cm não são afetados de forma significativa pela cobertura de nuvens, no entanto, a chuva representa um fator importante em comprimentos de onda inferiores a 4 cm.

A figura 2.4 mostra a diferença da interação das bandas L e C em áreas com vegetação arbórea.

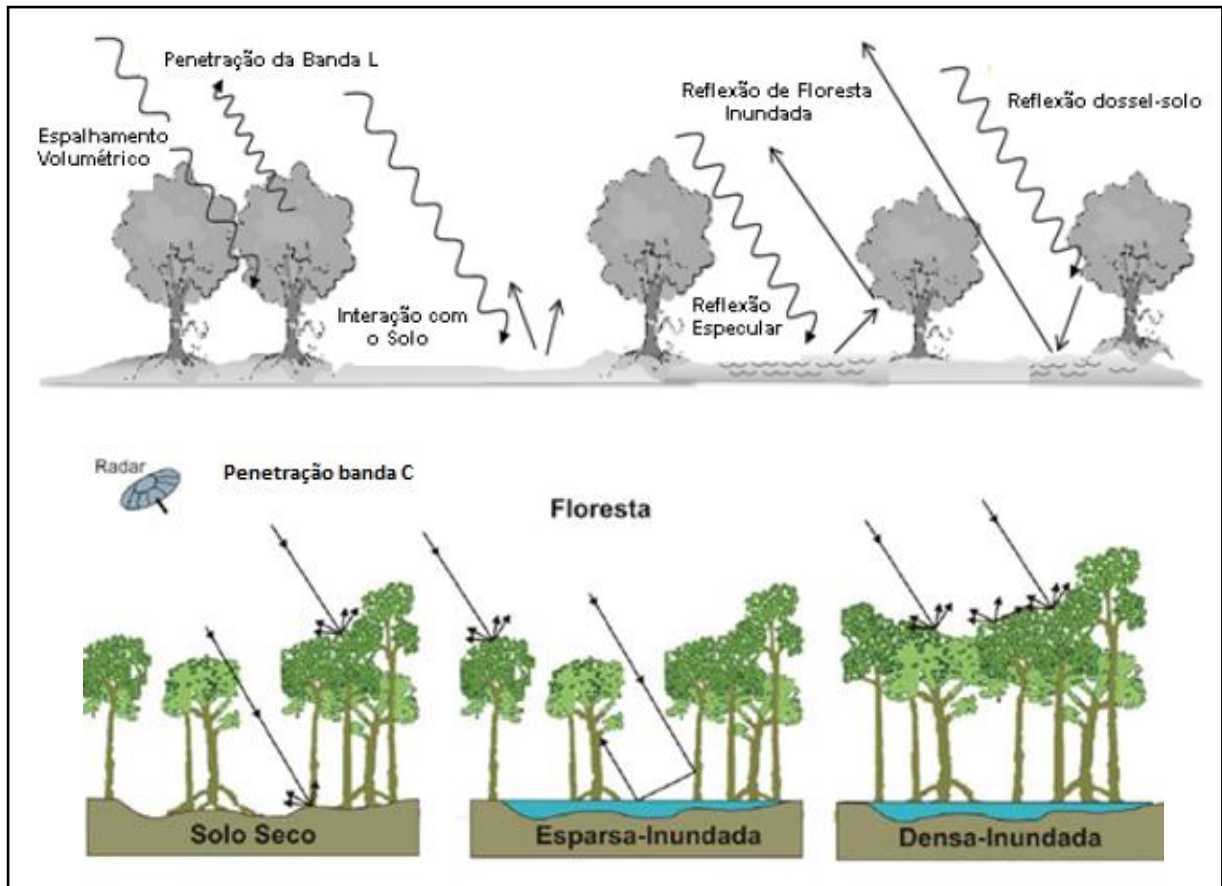


Figura 2.4 - Diferença da interação das bandas L e C
 Fonte: Adaptado de Freitas (2012) e Teixeira (2011)

Nesta mesma óptica, Lewis & Henderson (1998) relatam que a aparência da vegetação, superfície do solo e água, áreas abaixo dos dosséis das florestas e características de sub-superfície variam em função do comprimento de onda.

A penetração das micro-ondas na vegetação é maior para os maiores comprimento de onda (como observado na figura 2.4). Desta forma, os comprimentos de onda menores possibilitam obter informações acerca das camadas superiores da vegetação (dossel), pois interagem com as menores partes, como folhas e galhos, enquanto os maiores permitem obter informações das camadas inferiores (caules e troncos) e da superfície do terreno. Neste caso, porém, não é somente isso que influencia, mas também o grau de umidade existente, a densidade da vegetação e o ângulo de incidência da radiação eletromagnética (ULABY et al, 1986 apud TEIXEIRA, 2011).

2.2.2 Polarização

A polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado, sendo definida pela antena e podendo ser ajustada para ser diferenciada na transmissão e recepção do pulso de micro-ondas (WOODHOUSE, 2006).

Define-se como polarização paralela quando as energias transmitida e recebida são polarizadas na mesma direção. HH indica energias transmitida e recebida horizontalmente; VV energias transmitida e recebida verticalmente. A polarização cruzada é aquela onde as energias transmitidas e recebidas são polarizadas na direção ortogonal (HV, VH) (RANEY 1998) (Figura 2.5).

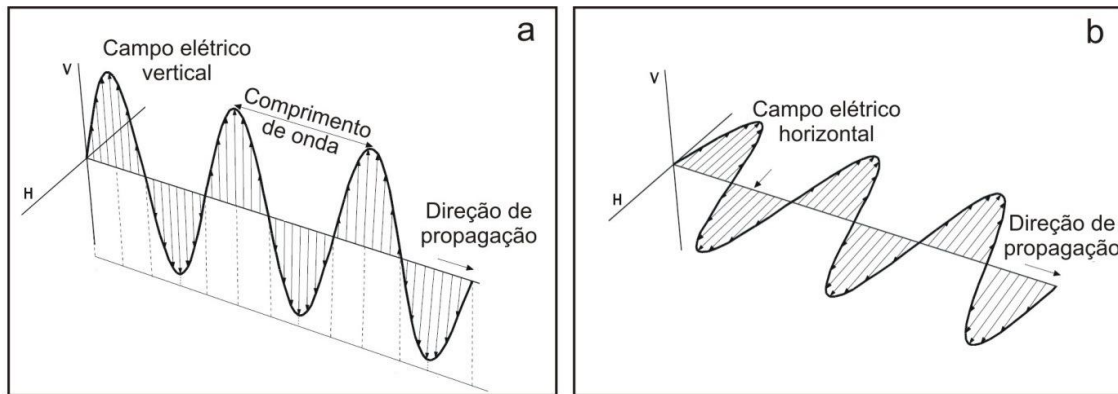


Figura 2.5 – Polarização de um sinal de radiação eletromagnética.

Ulaby et al, (1986) relatam que a profundidade de penetração da radiação também é influenciada pela polarização. Considerando um comprimento de onda fixo, no imageamento de uma área de floresta, quando as folhas se comportam como pequenos espalhadores verticais a onda polarizada horizontalmente tenderá a não interagir com o dossel, e apresentará uma maior profundidade de penetração podendo interagir com o substrato.

Na mesma lógica, a energia polarizada verticalmente é fortemente atenuada pela orientação vertical dos componentes do dossel (folhas, galhos, ramos e troncos), enquanto a energia polarizada horizontalmente não apresenta esse comportamento. Se um sinal de RADAR tiver um alto sinal de retorno, apresentando um intenso brilho na imagem nas polarizações paralelas (HH e VV), maior é a contribuição superficial; porém, se houver um elevado sinal de retorno nas polarizações cruzadas (HV, VH), é maior a tendência do espalhamento volumétrico (JENSEN, 2009).

Conforme discutido por Teixeira (2011), os trabalhos de Bourgeau-Chavez et al, (1996), Kasischke & Bourgeau-Chavez (1997) mostram que imagens da banda C e polarização VV são capazes de detectar e monitorar zonas úmidas, com vegetação herbácea e florestas espaçadas. Wang et al, (1995), Bourgeau-Chavez et al, (2001) mostraram que a banda L-HH é a melhor banda para separar florestas inundadas das não inundadas. Bourgeau-Chavez et al, (2001) concluíram que a banda L-HV é capaz de discriminar áreas de florestas de vegetação herbácea, e a banda C-HH para discriminar áreas de agricultura de áreas com vegetação herbácea no estágio inicial de crescimento. (TEIXEIRA, 2011)

2.2.3 Ângulo de Incidência

O ângulo de incidência pode ser definido como o ângulo entre a direção de iluminação do RADAR e à superfície terrestre, variando entre o alcance próximo e o alcance distante, dependendo da altura da trajetória do RADAR.

Este ângulo varia de acordo com o tipo de terreno imageado. A altitude do sistema exerce um efeito grande sobre a geometria de imageamento do SAR, pois altera o ângulo de incidência e, assim, a geometria do imageamento. Os sistemas orbitais operam entre 600-800 km, enquanto os sistemas aerotransportados operam entre 3-12 km. A maior altitude dos sistemas orbitais significa que os ângulos de incidência são geralmente mais agudos, ou seja, sistemas aerotransportados conseguem cobrir um intervalo maior de ângulos de incidência (15° - 60°) que os sistemas orbitais (37° - 40°) (ABOUD NETA, 2009). Em superfícies planas, o retroespalhamento e o ângulo de incidência são inversamente proporcionais. Em áreas com topografia acentuada, o decréscimo no retroespalhamento é menor com o aumento do ângulo de incidência (LEWIS & HENDERSON 1998, CCRS 2001) (Figura 2.6).

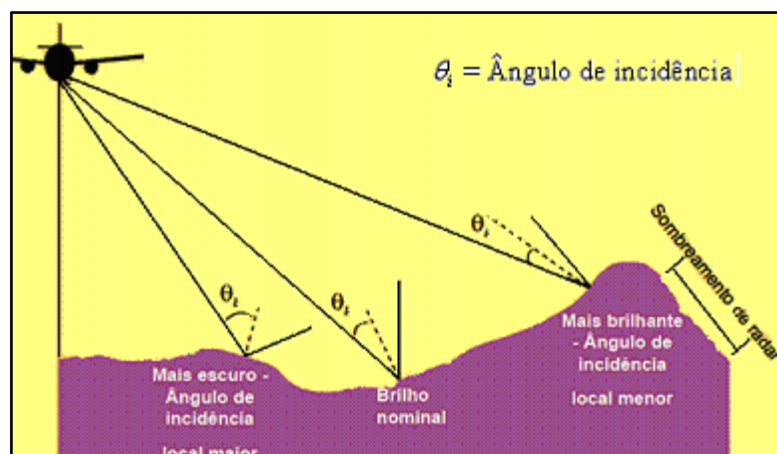


Figura 2.6 – Ângulo de incidência

Fonte: ABOUD NETA, 2009 - Adaptado de CCRS (2007).

O coeficiente de retroespalhamento é fortemente influenciado pelo ângulo de incidência. Diferentes superfícies podem ter seu sinal diferenciado em função do comportamento angular do retroespalhamento (Wang et al, 1995, Lang et al, 2008). No caso de florestas inundadas, a influência do ângulo de incidência no retroespalhamento varia de acordo com a estrutura da floresta (ex. área basal, altura do dossel, profundidade do dossel e qualidade dos galhos) e características do terreno, incluindo rugosidade da superfície, umidade do solo, e a presença ou ausência de água (TEIXEIRA, 2011).

A energia de micro-ondas transmitida em ângulos de incidência maiores determina uma menor capacidade de penetração, logo a energia é espalhada no interior do dossel, aumentando a habilidade do RADAR em estimar as características do dossel. No entanto, a energia transmitida em pequenos ângulos de incidência faz uma trajetória menor, através do dossel, aumentando a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície (LANG et al, 2008 apud TEIXEIRA, 2011).

2.3. Características de reflexão dos alvos em imagens de RADAR

As características dos alvos influenciam diretamente a aquisição de dados SAR, são, principalmente, a rugosidade da superfície e a constante dielétrica.

A forma dos objetos também pode alterar a quantidade de energia retroespalhada na faixa de micro-ondas. Entre as variáveis que descrevem a forma da cobertura vegetal se

destacam a altura, orientação e forma de galhos e folhas, porcentagem de recobrimento do substrato etc. (NOVO e COSTA, 2005).

A rugosidade da superfície terrestre é a propriedade da superfície que influencia grandemente a intensidade do retroespalhamento, normalmente definida em termos das variações estatísticas da altura e extensão das irregularidades da superfície. Lewis & Henderson (1998) afirmam que as características das diferentes escalas de rugosidade devem ser consideradas nos estudos com as imagens SAR.

Novo (2006) demonstra que em uma área com vegetação, os parâmetros das folhas (número, tamanho, área, etc.) são os principais controles dos tons da imagem. Se a área não é completamente coberta por vegetação, a rugosidade do terreno (rochas, solos, etc.) irá contribuir para a rugosidade de microescala. Para áreas vegetadas, esta é a rugosidade do dossel da vegetação, em uma escala maior que a resolução espacial da célula.

As superfícies lisas horizontais refletem praticamente toda energia incidente na direção oposta ao RADAR. Este fenômeno denomina-se reflexão especular, onde essencialmente nenhuma radiação é retroespalhada. Estas superfícies aparecem com tons de cinza mais escuros nas imagens (Figura 2.7 a).

A radiação que incide em superfícies de rugosidade intermediária é refletida de uma forma mais difusa, não homogênea e deve produzir uma resposta em um tom de cinza médio (Figura 2.7 b). Já a radiação de micro-ondas incidente em uma superfície rugosa apresenta um espalhamento em todas as direções, incluindo na direção do RADAR (retroespalhamento), recebendo o nome de reflexão difusa (Figura 2.7 c).

Lewis & Henderson (1998) relatam que superfícies rugosas aparecem com tons de cinza mais claros nas imagens de RADAR.

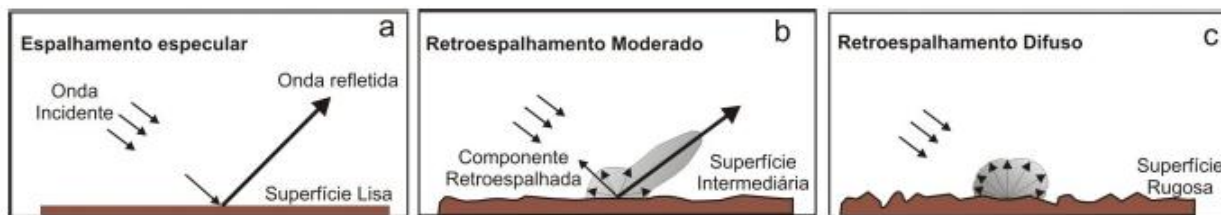


Figura 2.7 - Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: a - superfície lisa; b – superfície intermediária e c – superfície rugosa. Fonte: Modificado de Lewis & Henderson (1998) apud Texeira (2011).

Na figura 2.7 é possível observar o comportamento da energia emitida pelo RADAR em superfícies com diferentes tipos de rugosidade. Observa-se que quanto mais lisa a superfície menos sinal retornara para o sistema sensor, uma vez que a onda incidente ira refletir no sentido oposto ao RADAR, enquanto as ondas incidentes em áreas com mais rugosidade, o retroespalhamento em direção ao RADAR será maior.

Via de regra, a forma superficial do alvo determinará o tipo de espalhamento, sendo que o tamanho e a densidade dos elementos vegetais têm relação direta no tipo de interação com as micro-ondas incidentes e todos esses fatores são fortemente influenciados pelo comprimento de onda (KUPLICH, 2003). Nos maiores comprimentos de onda, como nas bandas L e P, dependendo da densidade, estrutura e umidade da vegetação, o pulso emitido pode penetrar o dossel e chegar ao solo.

Outro fator que interfere na detecção de dados por RADAR é a constante dielétrica. A constante dielétrica pode ser definida com a medida das propriedades elétricas dos materiais, incluindo a capacidade de absorver, refletir e transmitir a radiação das micro-ondas em resposta a um sinal incidente.

Na região das micro-ondas, a constante dielétrica varia de 3 a 8 na maioria dos materiais naturais, quando secos; e a água tem uma constante dielétrica de aproximadamente 80. Assim, a presença de umidade aumenta a constante dielétrica do material, afetando o modo como esse material aparece numa imagem de RADAR.

Teixeira (2011) relata que materiais idênticos podem variar na aparência em momentos ou locais diferentes, de acordo com o teor de umidade. O retroespalhamento e, conseqüentemente, o brilho da imagem, em áreas com vegetação e superfícies naturais, aumenta com o aumento do seu teor de umidade, pois em terrenos que apresentam um teor de

umidade maior há uma redução da penetração das micro-ondas abaixo da superfície e através do dossel da vegetação (LEWIS & HENDERSON 1998).

Conclui-se que o imageamento SAR é um produto da interação do alvo com a energia emitida e captada, sofrendo influencia direta das características do alvo e da conformação do sistema sensor.

2.4.Características do retroespalhamento em áreas úmidas

Nas áreas inundáveis, predominam três mecanismos de espalhamento decorrentes da interação com a radiação eletromagnética, são eles: reflexão de canto, ou *double bounce*; espalhamento volumétrico, e espalhamento de superfície (HESS et al, 1990). O *double bounce* ocorre quando a radiação eletromagnética incide no lado interno de duas superfícies planas ligadas a aproximadamente 90° (tronco e superfície d'água, por exemplo) e retorna ao RADAR pelo mesmo trajeto da onda incidente (Figura 2.8 a) (WOODHOUSE, 2006)

Em florestas inundadas o espalhamento “*double-bounce*” ou espalhamento de canto e pelas múltiplas reflexões podem ter um efeito considerável no valor total do coeficiente de retroespalhamento, quando a transmissividade do dossel e dos troncos é suficientemente alta. Esta situação pode ocorrer quando a energia incidente possui um comprimento de onda maior como é o caso da banda L, que é capaz de atravessar a estrutura do dossel (ORMSBY et al, 1985). E também, a energia transmitida em pequenos ângulos de incidência faz uma rota menor, através do dossel, aumentando a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície (LANG et al, 2008).

Além disso, a inundação também elimina o espalhamento de superfície. Devido ao aumento do coeficiente de retroespalhamento total, causado pela inundação, florestas inundadas geralmente tem um coeficiente de retroespalhamento total maior do que as florestas não inundadas. Nas florestas não inundadas, uma elevação na umidade do solo aumenta o coeficiente de retroespalhamento de superfície e o de múltiplas reflexões. Entretanto, o aumento no espalhamento *double-bounce* e nas múltiplas reflexões que a inundação causa é muito maior que o aumento causado pela umidade do solo (WANG et al, 1995).

Jensen (2009) apud Ford et al, (1986), demonstra que

... a superfície lisa formada pela água estagnada reflete quase toda a radiação de micro-ondas incidentes para fora do alcance do sensor (a menos que haja um vento forte com a formação de ondas, que poderão alterar as respostas), resultando em um retroespalhamento menor do que o causado por uma superfície seca. Quando água parada está presente sob a vegetação, o retroespalhamento é caracterizado por uma única interação (*corner-reflection*) entre a superfície da água e os galhos das árvores resultando em um retroespalhamento muito alto, que permite a clara identificação das áreas inundadas.

Novo e Costa (2005) também colocam que, em uma área de vegetação inundada, a radiação de micro-ondas da banda L que atinge a superfície da água é refletida especularmente por ela, atinge os troncos das árvores e retorna à antena, no chamado espalhamento *double-bounce*. Os comprimentos de onda mais curtos da banda C ao contrário, são espalhados pelo dossel, o que provoca o chamado espalhamento de superfície, que não permite a detecção da água abaixo do dossel da vegetação. Esta afirmação destaca mais uma vez a diferença de interações com aos alvos nos diferentes comprimentos de onda na detecção de alvos por RADAR.

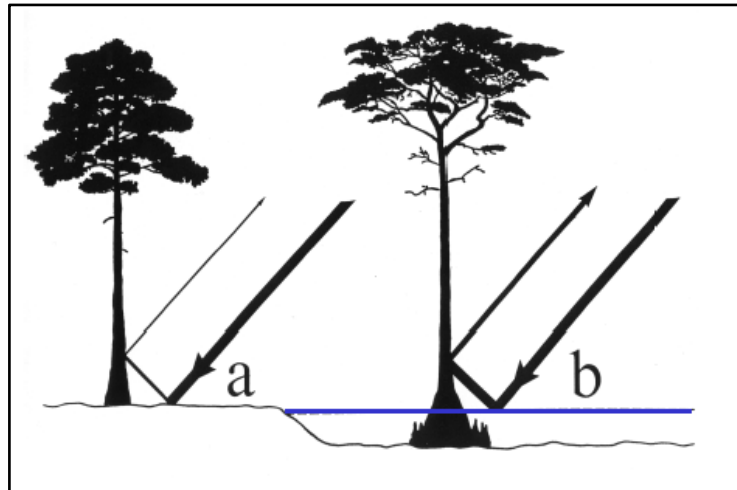


Figura 2.8. Reflexão double-bounce(a) O sinal reflete no solo, reflete novamente no obstáculo (árvore) e retorna para o sensor; (b) O sinal reflete na água (espalhamento especular), reflete novamente no obstáculo e retorna ao sensor, com intensidade maior do que em (a).

Fonte: Adaptada de Hess et al (1990).

A interação da energia de micro-ondas com vegetação herbácea, em solo seco, gera espalhamentos múltiplos, a partir das interações da energia com a vegetação e a superfície do

terreno, causando um baixo retorno de sinal. Com o aumento da umidade do solo ocorre o realce do retroespalhamento devido a um incremento na constante dielétrica e um possível espalhamento *double-bounce*, em função da interação da vegetação herbácea com o terreno.

No caso da superfície do terreno com vegetação inundada, toda energia incidente é refletida na direção oposta ao sensor (espalhamento especular) e o retroespalhamento é tipicamente menor do que no caso de solo seco (BOURGEAU-CHAVEZ et al, 2005), como apontado na figura 2.9.

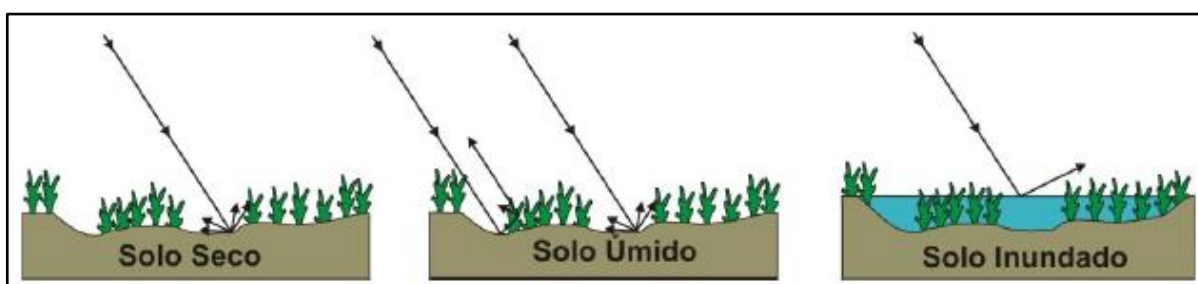


Figura 2.9 - Modelo teórico de espalhamento na banda C em áreas com vegetação herbácea, seca e inundada. Adaptado de Teixeira (2011).

2.5. Aplicações SAR no estudo de áreas alagadas do Brasil e no mundo

Novo (2006) ao relatar os principais estudos desta temática desenvolvidos no Brasil, coloca que existem vários exemplos de aplicações de dados SAR ao estudo de áreas alagadas. A autora destaca que a grande maioria deles se concentra na região Amazônica, mas a abordagem adotada pode ser facilmente aplicada no estudo dos ambientes alagáveis do Pantanal. Dentre os trabalhos realizados cabe destacar os estudos realizados por Costa (2000) e Hess et al,(2003).

Nesta ótica, Costa (2000) estimou a produtividade primária de plantas aquáticas do Lago Grande de Monte Alegre utilizando uma serie temporal de imagens JERS -1 e RADARSAT. Essas estimativas se basearam em modelos empíricos que permitiram determinar a variação da biomassa da vegetação a partir de dados de retroespalhamento.

Hess et al (2003) mapearam pela primeira vez o limite das áreas alagadas ao longo da calha do rio Amazonas e de seus principais afluentes a partir do uso de mosaicos de imagens

do satélite JERS-1. Usaram também as imagens para gerar um mapa de estado da cobertura vegetal, identificando várias classes dentre as quais florestas inundadas, florestas não inundadas, chavascas, campos, entre outras classes.

Martinez e Toan (2007), ao executarem uma análise temporal de 21 cenas do JERS, entre 1993 e 1997, para mapear a dinâmica de inundação na Amazônia, analisaram os valores de retroespalhamento nas classes floresta, floresta inundada, pastagem, corpos d'água, relacionando-os com a altura da lâmina d'água, demonstrando resultados satisfatórios na diferenciação das classes, principalmente de florestas inundadas de florestas sem inundação. Os autores ainda citaram que a análise da variação temporal do coeficiente de retroespalhamento reduz a confusão observada entre superfícies lisas (por exemplo, corpos d'água abertas, solos nus) inerentes ao comportamento desses alvos na banda L.

Evans et. al (2010), ao utilizar dados ALOS/PALSAR e Radarsat para mapear a inundação na região da Nhecolândia no Pantanal concluíram

... Os mapas gerados apresentaram boa separabilidade entre floresta inundada e floresta de terra firme. No entanto, como esperado, devido aos valores de retroespalhamento semelhantes nesta resolução espacial, a banda L-HH não foi ideal para a separação de campos/agricultura inundados de campos/agricultura não inundados.(tradução nossa).

Observou-se que as florestas inundadas tiveram os maiores valores nos meses de cheia, tendo boa separabilidade das demais classes neste período (EVANS et. al 2010).

Sartori et al, (2010), ao comparar as bandas P e L na discriminação de tipos de cobertura vegetal em áreas alagáveis, concluiu que, em relação à resposta radiométrica, a banda L discriminou os três diferentes tipos de alvos (água, vegetação aquática e floresta alagada) enquanto que para a banda P, a resposta das plantas aquáticas foi semelhante à resposta da água. Isto significa que a banda P não interage tanto com as plantas aquáticas como a banda L.

Note-se ainda, mais recentemente, a utilização de dados SAR no mapeamento de áreas costeiras, incluindo áreas como manguezais e campos inundáveis, conforme o trabalho desenvolvido por Teixeira (2011), onde a autora avaliou potencialidade do uso de imagens SAR, na identificação de ecossistemas costeiros alagáveis, sob diferentes configurações de aquisição e diferentes condições ambientais na região da Baixada Maranhense e do Golfão Maranhense, no extremo norte do Estado do Maranhão, concluindo que é possível a separação

entre os manguezais e os campos inundáveis, tanto na estação chuvosa, como na seca, utilizando imagens RADARSAT.

Freitas (2012) avaliou o potencial das imagens ALOS/PALSAR (polarizações HH, HV e VV) para discriminar as diferentes classes de cobertura vegetal representativas da região do Médio Taquari - MS, bioma Pantanal, concluindo que foi possível verificar uma relação entre os tipos de cobertura vegetal (fitofisionomias) e os valores do coeficiente de retroespalhamento, mostrando uma boa discriminação entre elas e assim demonstrando a possibilidade de utilização do RADAR como ferramenta de detecção de diferentes fitofisionomias na região do Médio Taquari, bioma Pantanal. Relatou ainda o grande potencial das três polarizações na discriminação das classes Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, Savana Florestada e Savana Arborizada,

Zani et. al (2013) utilizou imagens ALOS/PALSAR no mapeamento geomorfológico de áreas alagáveis tropicais, relatando que este insumo possibilitou categorizar terraços, canais temporários e planícies de inundação associados a vales fluviais que limitam o megaleque, bem como barras fluviais e áreas alagáveis sobre ele. Além de fornecer dados em locais com cobertura de nuvens constante, as imagens PALSAR revelaram informações que não puderam ser observadas com outros sensores.

Furtado et. al. (2013) ao analisar os valores de retroespalhamento de imagens Radarsat-2 e TerraSAR-X, em diferentes tipos de cobertura do solo na região do Lago Grande do Curuai, na Amazônia brasileira, apontaram a necessidade de otimizar a configuração de imagem de acordo com o tipo de estudo. Relataram ainda que, entre todos os modos de imagem utilizados, a melhor discriminação dos alvos foi observada para Radarsat-2 imagens S1, adquiridos com duas polarizações.

2.6 Classificação de imagens SAR

Jensen (1996) afirma que a classificação automática é um dos procedimentos de extração de informação de imagens digitais mais utilizados em sensoriamento remoto. Este procedimento consiste em atribuir classes do mundo real aos pixels das imagens segundo uma regra de decisão (JENSEN, 1996).

A classificação digital de imagens consiste em um processo de decisão, que pode ser solucionado por diferentes métodos e algoritmos (MATHER, 1999; SCHOWENGERDT, 1997 apud NUNES, 2008).

Grande parte dos classificadores de imagens digitais disponíveis foram desenvolvidos para classificação de imagens óticas multiespectrais, sendo, na sua maioria, classificadores do tipo por pixel, onde cada pixel é atribuído a uma determinada classe pertencente ao mundo real (MATHER, 1999 apud NUNES, 2008).

Estes classificadores possuem limitações para aplicações em dados SAR e apresentam baixo desempenho devido à ampla variância introduzida pelo ruído speckle (AHERN, 1995 apud NUNES, 2008)

Nesta ótica, a classificação de dados SAR deve abranger as especificidades deste tipo de imagem. Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver abordagens de classificação exclusivas para estes dados.

Vieira (1996) e Correia (1999) apresentam abordagens de classificação estatística específicas para dados SAR e PolSAR, consistindo na aplicação combinada dos algoritmos MAXVER (Máxima Verossimilhança), com múltiplas fontes de evidências estatísticas, e ICM (*Iterated Conditional Modes*).

Os classificadores MAXVER/ICM propostos por Vieira (1996) e por Correia (1999) permitem o uso das distribuições mais adequadas aos dados SAR em amplitude e intensidade. A seleção das funções de densidade de probabilidade mais apropriadas aos conjuntos de amostras de cada classe de interesse é realizada a partir da aplicação de um teste qui-quadrado de ajuste (GUERRA, 2009).

Nunes (2008) ao discorrer sobre o classificador ICM aponta que a incorporação das informações contextuais aos algoritmos classificadores, que consideram as informações no domínio espacial, surge então como uma alternativa promissora para classificação de imagens de RADAR.

O classificador MAXVER/ICM executa primeiramente uma classificação MAXVER de dados SAR monopolarizados em amplitude *multilook*, onde são testadas as distribuições derivadas do modelo multiplicativo (Γ , K e G), a Normal Restrita e outras distribuições *ad*

hoc (Normal, LogNormal, Beta e Weibull) que também podem obter bom ajuste em determinadas condições (FRERY et al, 2007 apud GUERRA, 2009).

Após a classificação MAXVER é aplicado o algoritmo baseado na teoria de campos Markovianos ICM (*Iterated Conditional Modes*) (VIEIRA, 1996). O algoritmo ICM é um método de refinamento iterativo de uma classificação inicial que consiste em substituir a classe atual associada a cada *pixel* por aquela que maximiza a distribuição *a posteriori* da classe, dados o nível de cinza (componente MAXVER) e as classes vizinhas (componente contextual) (VIEIRA, 1996).

Os estudos realizados por Vieira (1996) e por Correia (1999) apresentam informações mais detalhadas sobre o classificador MAXVER/ICM.

A avaliação da acurácia do mapa temático resultante de classificações consiste na análise de concordância com um dado de referência. Conforme Congalton e Green (1999), esta análise pode ser realizada por meio da matriz de confusão e das estatísticas derivadas, como índice Kappa, erros de omissão e inclusão.

Landis e Koch (1977) apresentaram uma conceituação para o resultado da classificação em função do valor de Kappa obtido, que pode ser observado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Índice Kappa

KAPPA	CONCEITO
< 0	Péssima
$0 < k \leq 0,2$	Má
$0,2 < k \leq 0,4$	Razoável
$0,4 < k \leq 0,6$	Boa
$0,6 < k \leq 0,8$	Muito Boa
$0,8 < k \leq 1,0$	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

O algoritmo de classificação estatístico polarimétrico desenvolvido por Vieira (1996) e posteriormente aperfeiçoado por Correia (1999) foi implementado no software ENVI (RSI, 2005) em linguagem IDL (Interactive Development Language) e vários trabalhos apresentaram resultados positivos ao utilizar esse classificador em imagens SAR.

Pereira et. al. (2011) ao comparar os classificadores SVM (Support Vector Machine) e MAXVER-ICM, concluíram que o MAXVER-ICM apresentou resultados mais satisfatórios

que o primeiro em imagens ALOS/PALSAR. Guerra (2009) também concluiu que classificador MAXVER-ICM apresentou melhor desempenho na classificação dos dados SAR em amplitude que o algoritmo ISOSEG. Nunes (2008) alcançou resultados satisfatórios utilizando o classificador MAXVER-ICM, comparado com o MAXVER em classificações de imagens na banda L.

Neste trabalho utilizaremos o classificador MAXVER/ICM na classificação de imagens ALOS/PALSAR para identificar diferentes classes de uso do solo na grade de pesquisa do Pirizal.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo localiza-se no Pantanal Norte, no município de Poconé-MT, nas coordenadas $56^{\circ}21'23,779''\text{W}$, $16^{\circ}19'26,659''\text{S}$ e $56^{\circ}18'17,36''\text{W}$, $16^{\circ}22'34,32''\text{S}$. Trata-se de uma grade experimental de 5x5 Km, instalada em 2005 em três propriedades particulares, na região do Pirizal (Figura 3.1). A grade do Pirizal é caracterizada como uma área para pesquisas ecológicas de longa duração (PELD), que também permite a realização de inventários rápidos. Este sistema de pesquisa foi adotado pelo Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio), financiado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil (MCT) (SIGNOR et al, 2010).

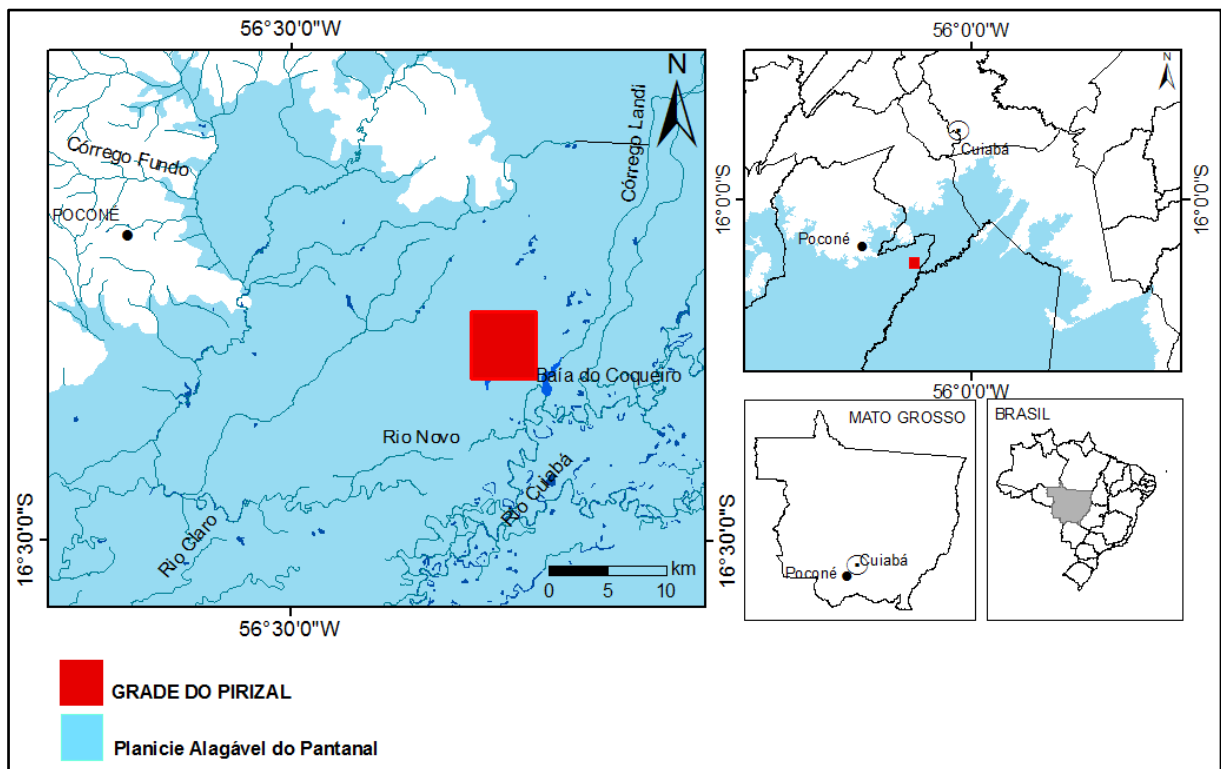


Figura 3.1 – Localização da Área de Estudo

Segundo estudos realizados por Fantin-Cruz et. al. (2010), a grade apresenta uma superfície inclinada em direção ao sul com irregularidades locais. A menor cota topográfica medida foi de 112,52 m e a maior de 116,56 m, possuindo uma amplitude de 4,04m. A maior parte da área apresenta declividades variando de 10 a 100 cm/km, o que pode ser considerada alta quando comparada à declividade do rio Cuiabá dentro da planície pantaneira, que varia de

5,6 a 10,2 cm/km.

Com a utilização de um sistema de grade com 30 réguas distribuídas na malha principal mais as 10 réguas estrategicamente distribuídas em forma de X dentro da grade de estudo, Fantin-Cruz et. al. (2010) quantificaram a estrutura espacial da topografia e da inundação, especializando essas informações.

Segundo Fantin-Cruz et. al. (2010), ao analisar a inundação do ano 2006/2007 na grade, observou-se que esta teve início entre os dias 14 e 18/12/2006 e terminou entre os dias 08 e 12/06/2007. De dezembro a março a inundação ocorreu espacialmente de maneira contínua, sendo que em abril, com a redução das chuvas e do nível do rio Cuiabá, houve perda da continuidade espacial dentro dos compartimentos, formando poças de água isoladas. Os autores também relataram que as maiores amplitudes da profundidade de água foram medidas no dia 23/02/2007 com variação de zero a 63 cm, as parcelas que não inundaram se localizam em cordilheiras.

A escolha desta área deve-se à localização dentro da Planície alagável do Pantanal, aos estudos já realizados na região por diversos pesquisadores de diferentes áreas, bem como a disponibilidade de dados de inundação, topografia e solos dentre outros, que foram coletados em campo e auxiliaram na validação do trabalho.

3.2. Caracterização das fitofisionomias e unidades de paisagem da área de estudo

Pode-se definir unidade de paisagem como uma porção geograficamente distinta na paisagem e que tem uma característica visual particular. Fitofisionomia inclui a estrutura, formas de vida dominantes das plantas de um dado lugar. Tipo de vegetação entende-se a fisionomia, flora e ambiente (NUNES DA CUNHA et. al, 2010).

Segundo o Manual Técnico da vegetação Brasileira do IBGE (2012), a área da grade do Pirizal apresenta cobertura vegetal com formações típicas de Savana, apresentando os subgrupos Savana Gramíneo-Lenhosa (Campo-Limpo-de-Cerrado), Savana Parque (Campo-Sujo-de-Cerrado, Cerrado-de-Pantanal, Campo- de-Murundus ou Covoal e Campo Rupestre) e em alguns pontos Savana Florestada (Cerradão).

O quadro 3.1 retrata as principais características dos subgrupos de Savana encontrados na grade do Pirizal.

Quadro 3.1 – Características dos subgrupos de Savana encontrados na Grade do Pirizal

Savana Gramíneo-Lenhosa (Campo-Limpo-de-Cerrado)	Savana Florestada (Cerradão)	Savana Parque (Campo-Sujo-de-Cerrado, Cerrado-de-Pantanal, Campo-de-Murundus ou Covoal e Campo Rupestre)
<p>Prevalecem nesta fisionomia, quando natural, os gramados entremeados por plantas lenhosas raquíticas, que ocupam extensas áreas dominadas por hemocriptófitos e que, aos poucos, quando manejados através do fogo ou pastoreio, vão sendo substituídos por geófitos que se distinguem por apresentar colmos subterrâneos, portanto mais resistentes ao pisoteio do gado e ao fogo. A composição florística é bastante diversificada, sendo suas espécies mais representativas as plantas lenhosas: <i>Andira humilis</i> Mart. ex Benth. (Fabaceae Papilionoideae – angelim-do-cerrado); <i>Chamaecrista spp.</i> (Fabaceae Caes. – fedegoso-do-cerrado); <i>Byrsonima spp.</i> (Malpighiaceae – murici-rasteiro); <i>Bauhinia spp.</i> (Fabaceae Caesalpinioideae – unha-de-vaca); <i>Attalea spp.</i> (Arecaceae – palmeirinha-do-cerrado); <i>Allagoptera campestris</i> (Mart.) Kuntze (Arecaceae – coco-de-raposa); e <i>Orbignya eichleri</i> (Palmae – coco-de-guriú). Entre as plantas gramínoideas (Poaceae): <i>Axonopus spp.</i> (grama-do-cerrado); <i>Andropogon spp.</i> (capim-do-cerrado); <i>Aristida pallens</i> Cav. (capim-barba-de-bode); <i>Echinolaena inflexa</i> (Poir) Chase; <i>Paspalum spp.</i>; <i>Trachypogon spicatus</i> (L. f.) Kuntze (capim-redondo); <i>Schizachyrium spp.</i>; e <i>Tristachya spp.</i> (capim-flechinha).</p>	<p>Subgrupo de formação com fisionomia típica e característica restrita a áreas areníticas lixiviadas com solos profundos, ocorrendo em um clima tropical eminentemente estacional. Apresenta sinúsias lenhosas de micro e nanofanerófitos, tortuosos com ramificação irregular, providos de macrófitos esclerófitos perenes ou semidecíduos, ritidoma esfoliado corticoso rígido ou córtex maciamente suberoso, com órgãos de reserva subterrâneos ou xilopódios, cujas alturas variam de 6 a 8 m. Em alguns locais, apresenta sinúsias lenhosas de meso e microfanerófitos com altura média superior aos 10 m, sendo muito semelhante, fisionomicamente, a Florestas Estacionais, apenas diferindo destas na sua composição florística. Não apresenta sinúsia nítida de caméfitos, mas sim relvado hemocriptófito, de permeio com plantas lenhosas raquíticas e palmeiras anãs. Extremamente repetitiva, a sua composição florística reflete-se de norte a sul em uma fisionomia caracterizada por dominantes fanerófitos típicos, como: <i>Caryocar brasiliav.</i> (capim-barba-de-bode); <i>Echinolaena inflexa</i> (Poir) Chase; <i>Paspalum spp.</i>; <i>Trachypogon spicatus</i> (L. f.) Kuntze (capim-redondo); <i>Schizachyrium spp.</i>; e <i>Tristachya spp.</i> (capim-flechinha).reta); <i>Dimorphandra mollis</i> Benth. (Fabaceae Mimosoideae –</p>	<p>Subgrupo de formação constituído essencialmente por um estrato gramínoide, integrado por hemocriptófitos e geófitos de florística natural ou antropizada, entremeados por nanofanerófitos isolados, com conotação típica de um “Parque Inglês” (<i>Parkland</i>). A Savana Parque de natureza antrópica é encontrada em todo o País, enquanto a natural ocorre algumas vezes com feição de campos litossólicos e/ou rupestres. Em áreas encharcadas de depressões periodicamente inundadas, ocorrem as tipologias naturais de Cerrado-de-Pantanal, com denominações regionais diversas, caracterizadas pela presença de “covoais”, “monções” ou “murundus”.</p>

Fonte: IBGE, Manual Técnico da vegetação Brasileira, 2012.

A Figura 3.2 retrata um perfil esquemático da distribuição dos subgrupos de savana apresentados.

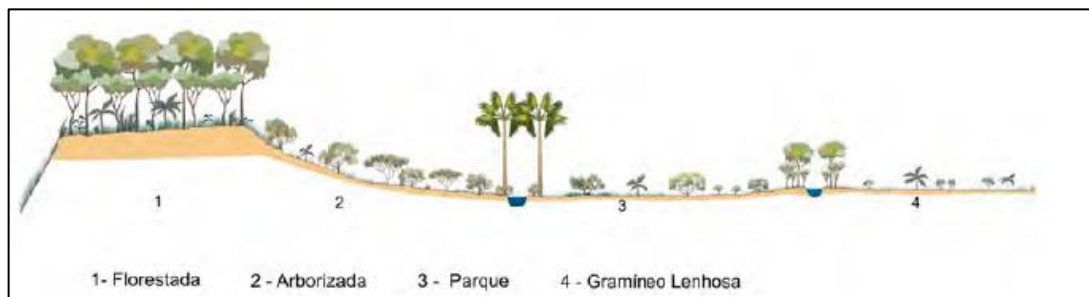


Figura 3.2 - Perfil esquemático da Savana (Cerrado)

Fonte: Veloso; Rangel Filho; Lima, (1991)

Nunes da Cunha et. al (2010) ao caracterizar a vegetação e a flora na grade do Pirizal, destacaram quatro tipos de unidades de paisagens características do Pantanal: Cordilheira: paleo-diques muito arenosos que alcançam, aproximadamente, 1 a 5 metros acima do nível da inundação, tendo a predominância da erva *Bromelia balansae* (gravatá) sobre o solo, o que indica condições permanentes de não alagamento; Campo de inundação: áreas planas inundáveis e dominadas por gramíneas; Campo de inundação com murundus: áreas planas inundáveis, dominadas por gramíneas e com elevações do terreno chamadas de “murundus”, “cocurutos” ou “monchões”, sobre os quais ocorrem pequenos agrupamentos arbóreos não inundáveis, compostos por espécies que ocorrem no Cerrado (Ponce & Cunha 1993); Canais de drenagem: Canal de drenagem, com deposição de sedimentos rasos e temporários, podendo ser cobertos por gramíneas ou apresentar uma vegetação arbórea, que neste caso é denominado Landi.

Segundo Nunes da Cunha et. al, (2010), a associação da heterogeneidade ambiental e tipo de manejo resultou em seis diferentes fitofisionomias que ocorreram nestas quatro unidades de paisagens, variando desde fisionomias florestadas abertas, florestadas densas, campos limpos, campos de murundus, campos em diferentes estágios de sucessão e pastagens exóticas; algumas apresentam designações típicas da região com aceitação científica, conforme a figura 3.3.

Segundo esses autores os Landis ocorrem em forma de manchas isoladas ou conectadas entre si nos locais mais baixos do terreno, funcionando como canais de escoamento da água durante a inundação (Figura 3.3A). Essa formação é caracterizada como Floresta semi-sempre verde sazonalmente inundável, com presença de pimenteira (*Licania parvifolia*) e guanandi (*Calophyllum brasiliense*).

O Cambarazal consiste em formações florestadas dominadas pelo cambará *Vochysia divergens* (Vochysiaceae), que é uma espécie invasora dos campos naturais do Pantanal. Consiste em áreas de Savana sazonalmente inundáveis (Figura 3.3 B).

As Cordilheiras, por sua vez, correspondem a antigos diques fluviais, ou seja, locais de deposição de sedimentos na borda de leitos fósseis de rios da região. Em alguns pontos são caracterizadas por Savana arbórea aberta ou Savana Arbórea densa (Figura 3.3 C) e são as partes mais altas encontradas dentro da planície. Em geral são faixas contínuas, alongadas e sinuosas, que podem estar conectadas a outros tipos de habitats, como Campos de Murundus e Landis.

Os Campos de Murundus, Savanas de térmitas sazonalmente inundável com *Curatella americana* (lixeira): apresentam vegetação predominantemente campestre com alguns arbustos e árvores esparsos sobre elevações formadas por cupinzeiros (murundus). A estacionalidade da vegetação é semi-decídua. Estrato herbáceo bastante denso, tendo as espécies regionalmente denominadas de fura-bucho (*Paspalum lineare*) e mimosinho (*Axonopus purpusii*). Consistem em pequenas formações arbóreas com formato circular e relevo positivo (pequenas “ilhas” que não inundam) em meio a áreas abertas inundáveis com predomínio de gramíneas (Figura 3.3 D).

Os Campos Limpos apresentam vegetação predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores (Figura 3.3 E).



Figura 3.3 Tipos ambientes encontrados na área da grade do Pirizal: Landi (A), Cambarazal ao fundo (B), Cordilheira (C) Campo de Murundus (D), Campo Limpo (E) e Pastagem

introduzida (F). *Fotos: Mônica Aragona (A, B, C) e Izaias M. Fernandes (D, E, F).*Fonte : (NUNES DA CUNHA et al, 2010):

A modificação da paisagem natural, através da retirada da vegetação nativa, e a introdução de espécies de gramíneas exóticas têm criado novas unidades de paisagem na região, que são os campos com pastagem exótica. Áreas com vegetação de estrato herbáceo denso com predominância de gramínea exótica, *Brachiaria humidicola* (mindícola), com cobertura do estrato arbóreo-arbustivo ausente. (Figura 3.3 F).

Conclui-se que a grade experimental do Pirizal, apresenta ambientes variados com a presença de áreas florestadas, campos nativos integrados com pastagens plantadas, campos de murundus, sendo um sítio que fornece variados alvos para avaliação da potencialidade de imagens de RADAR na detecção de ocorrência de inundação.

3.3 Materiais

Os materiais utilizados foram: mapa de uso do solo, Imagens ALOS/PALSAR e dados de inundação coletados em campo. Os softwares utilizados foram o Envi 4.7, ArGis 9.3 e Statistica.

3.3.1 Mapa de uso do solo

O mapa de uso do solo utilizado é uma adaptação do mapeamento executado por Zerwes et al, (2012). O mapeamento realizado pelos autores utilizou imagens do satélite SPOT 5, com resolução espacial de 2,5 m, do ano de 2007, bem como dados coletados em campo para validação. Este mapa foi realizado por meio de interpretação visual e possui seis classes: Mata, Cordilheira, Campo, Uso, Água/Canal e Vazante. Este mapa foi editado de modo a adaptar as classes ao objetivo deste trabalho.

3.3.2 Satélite Avançado de Observação da Terra ALOS, sensor PALSAR

O satélite japonês ALOS (*Advanced Land Observing System*) foi lançado pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA) em janeiro de 2006, com início de distribuição dos dados para o Brasil em outubro de 2007. O ALOS descreve uma órbita circular heliossíncrona a 692 km de altitude, com um período de revisita a um mesmo ponto do planeta de 46 dias (IBGE, 2008). O ALOS possui três sensores de imageamento de sensoriamento remoto: o AVNIR-2, o PRISM e o PALSAR, conforme quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Características do Satélite ALOS

Missão Advanced Land Observing Satellite (ALOS)	
Instituições Responsáveis	Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA
Órbita	heliossíncrona
Altitude	691,65 km
Inclinação	98,16°
Instrumentos Sensores	PRISM, AVNIR-2 e PALSAR

Fonte: EMBRAPA, 2009

O AVNIR-2 é um sensor óptico com 4 bandas espectrais com resolução espacial de 10m. Este sensor é capaz de variar a inclinação da visada lateralmente, tornando possível imagear rapidamente situações de desastres naturais.

O sensor PRISM opera na faixa da luz visível, com uma banda pancromática e resolução espacial de 2,5 m. Este deverá recobrir completamente o globo no modo *triplet* coletando imagens estereoscópicas.

3.3.2.1 PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) - Satélite ALOS

O PALSAR é um RADAR de abertura sintética que opera na Banda L (23 cm – 1,3 GHz), capaz de obter imagens diurnas ou noturnas e em quaisquer condições atmosféricas. Foi desenvolvido pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) em parceria com a Japan Resources Observation System Organization (JAROS) e derivou-se da tecnologia que esteve a bordo do satélite JERS-1. O sensor não consegue obter imagens em áreas localizadas acima de 87,8° de latitude Norte e 75,9° de latitude Sul.

O RADAR possui três modos de imageamento: fino, ScanSAR e polarimétrico. O modo fino adquire dados em uma única polarização (HH) ou em duas polarizações (HH e HV) e as suas imagens são identificadas como FBS (*fine beam single*) e FBD (*fine beam dual*), respectivamente, nos catálogos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Alasca Satellite Facility (ASF), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), European Space Agency (ESA), Geoscience Australia e JAXA. O modo ScanSAR adquire imagens na polarização HH e a sua faixa de imageamento pode atingir 350 km. O modo polarimétrico adquire imagens em quatro polarizações (HH, HV, VH e VV), porém, a sua faixa de imageamento é a mais restrita, variando de 20 km a 65 km (JAXA 2007).

Quadro 3.3. Características do sensor Palsar

Sensor	Canais/Bandas Espectrais	Frequência	Ângulo de Visada	Polarização	Resolução Espacial	Área Imageada
PALSAR	Fine - single	1270 MHz (Banda L)	8° - 60°	HH ou VV	7 - 44 m	40 - 70 km
	Fine - dual			HH+HV ou VV+VH	14 - 88 m	
	ScanSAR		18° - 43°	HH ou VV	100 m	250 - 350 km
	Polarimetric		8° - 30°	HH+HV+	24 - 89 m	20 - 65 km
	VH+VV					

Fonte: JAXA (2007).

Foram adquiridas quatro imagens ALOS/PALSAR, conforme características apontadas no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Características das imagens PALSAR utilizadas

Data	Resolução(m)	Polarização	Nível processamento	Ângulo incidência	Órbita
10/fev/07	6,25	HH	1.5	38	Ascendente
28/set/07	12,5	HH	1.5	38	Ascendente
13/fev/08	6,25	HH	1.5	38	Ascendente
30/set/08	12,5	HH	1.5	38	Ascendente

As imagens ALOS/PALSAR foram fornecidas pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Shimon Wdowinski, da Division of Marine Geology and Geophysics Rosenstiel School of Marine & Atmospheric Science, University of Miami.

3.4 Metodologia

Pode-se dividir a metodologia deste trabalho em três etapas. A primeira refere-se à adequação do mapa de uso do solo confeccionado por Zerwes et al, (2012). A segunda trata da preparação das imagens ALOS/PALSAR para extração dos valores do coeficiente de retroespalhamento nos pontos aleatórios por classe de uso do solo e posterior análises

estatísticas. A terceira etapa refere-se á classificação de uma cena ALOS/PALSAR de fevereiro de 2007, utilizando o classificador MAXVER-ICM.

A figura 3.4 apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas neste trabalho.

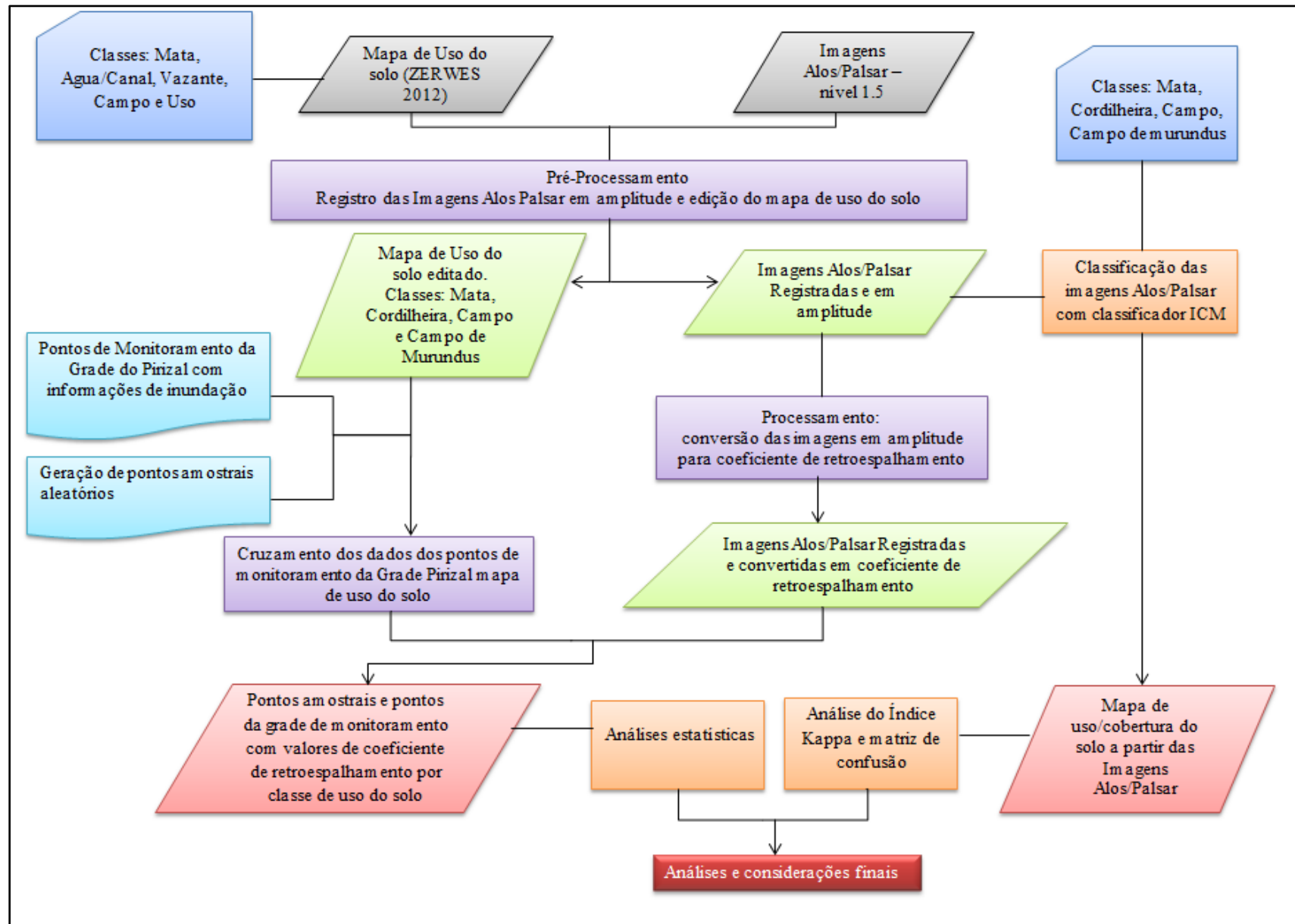


Figura 3.4 Fluxograma das etapas do trabalho.

3.4.1 Mapa de uso do solo

Optou-se neste trabalho pela readequação do mapa do uso do solo confeccionado por Zerwes et al, (2012). Esta adequação consistiu em transformar as seis classes originais em quatro classes: Mata, Cordilheira, Campo e Campo de murundus. As classes Água/canal e Vazantes foram agregadas na classe Campo, em função das características fitofisionômicas, também foi separada a área de campo de murundus da classe campo. A tabela 3.1 apresenta a descrição de cada classe utilizada neste trabalho.

Tabela 3.1 – Descrição das classes

CLASSE	DESCRIÇÃO
Mata	Predomínio de indivíduos arbóreos – Landizal, Cambarazal (Savana Florestada/Arborizada).
Cordilheira	Área com indivíduos arbóreos e arbustivos, de 1 a 5 m acima do nível de inundação Savana Parque (Campo-Sujo-de-Cerrado, Cerrado-de-Pantanal, Campo- de-Murundus ou Covoal e Campo Rupestre).
Campo	Áreas planas inundáveis com predomínio de vegetação rasteira e ou/arbustiva, composta também por campos naturais e áreas desmatadas (Savana Gramíneo-Lenhosa)
Campo de Murundus	Áreas planas inundáveis, dominadas por gramíneas e com elevações do terreno chamadas de murundus, sobre os quais ocorrem pequenos agrupamentos arbóreos não inundáveis. Savana Parque (Campo-Sujo-de-Cerrado, Cerrado-de-Pantanal, Campo- de-Murundus ou Covoal e Campo Rupestre)

Na figura 3.5 pode-se observar a espacialização das classes de uso/cobertura mapeadas na Grade do Pirizal.

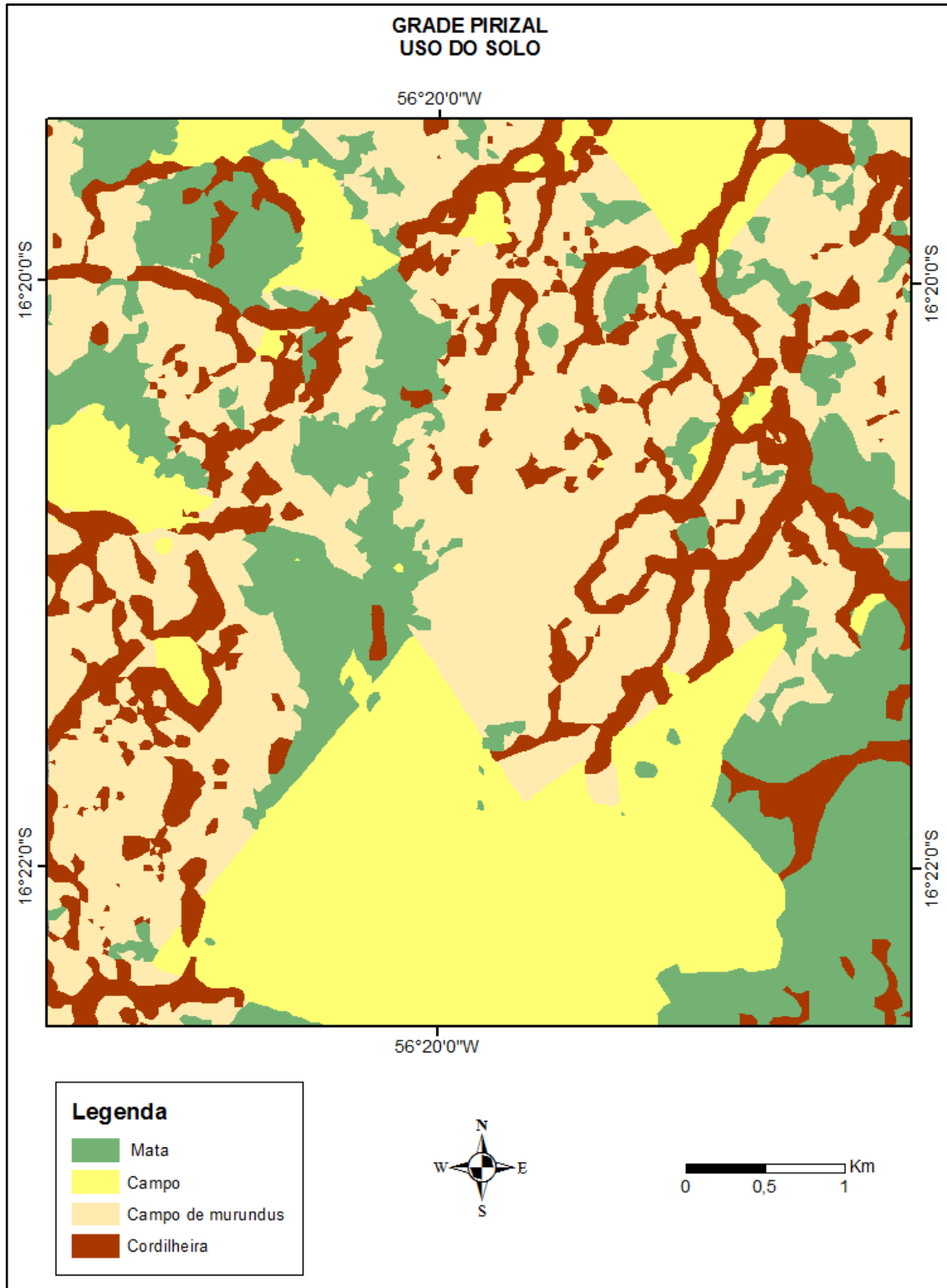


Figura 3.5– Mapa de Uso do solo Pirizal – adaptado de Zerwes (2012).

O mapa de uso do solo servirá para cruzarmos os pontos amostrais extraídos das imagens de RADAR com os valores do coeficiente de retroespalhamento, obtendo assim informações do coeficiente de retroespalhamento por classe de uso.

3.4.2 Processamento das Imagens ALOS/PALSAR para extração dos valores do coeficiente de retroespalhamento

As imagens ALOS/PALSAR foram convertidas para coeficientes de retroespalhamento [σ^0 ; unidade em decibéis (dB)], conforme proposto por SHIMADA (2009)(Equação 1):

$$\sigma_{1.5 \text{ product}}^0 = 10 \cdot \log_{10} \langle DN^2 \rangle + CF \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: CF representa o fator de conversão (-83,0) e DN é o valor digital da imagem amplitude.

Essa conversão foi feita por meio do aplicativo Envi 4.7, utilizando a ferramenta *Band Math*. Considerando que as imagens usadas neste estudo possuem diferentes resoluções e tamanho de pixel, adotou-se, na correção geométrica, a reamostragem das imagens PALSAR para 12,5 m. As imagens foram registradas tendo como base a imagem SPOT 5, do ano de 2007, de 2,5 m de resolução ortorretificada com pontos de controle distribuídos por toda a área coberta pelas imagens do PALSAR. O erro do registro foi inferior a 1 pixel.

3.4.3 Classificação da imagem ALOS/PALSAR com o classificador MAXVER/ICM

Para a classificação foi utilizada a imagem ALOS/PALSAR de fevereiro de 2007, polarização HH, com resolução espacial de 6,25 m, em amplitude. A classificação teve por objetivo de avaliar a potencialidade deste insumo na discriminação dos diferentes usos na grade do Pirizal.

Neste trabalho, foi utilizado o classificador estatístico com informação contextual MAXVER-ICM (VIEIRA, 1996; CORREIA, 1999).

As classes utilizadas foram: mata, cordilheira, campo, campo de murundus, oriundas da adaptação do mapa de uso do solo de Zerwes (2012). A seleção das amostras de cada classe foi baseada no mapa de uso do solo e nos trabalhos de Nunes Da Cunha et. al, (2010), que descreveram as fitofisionomias existentes na grade do Pirizal. O tamanho das amostras variou entre 900 a 1200 *pixels*.

Os critérios utilizados nas classificações ICM foram: mínimo de 0,1% de trocas de classe do *pixel* e máximo de 20 interações, o que significa que o classificador ICM realizou mudanças de classes dos *pixels* até que o percentual de mudança fosse menor que 0,1% entre uma interação e outra ou até que o número de interações alcançasse 20. Para o classificador de MAXVER utilizou-se o limiar de aceitação de 100%, assumindo-se que todos os *pixels* das amostras de treinamento fossem atribuídos à uma determinada classe.

A análise dos resultados foi baseada na matriz de confusão, no valor do Kappa e na variância do Kappa. A matriz de confusão foi construída através da informação de verdade das amostras de teste, supondo-se que todos os pixels das amostras de teste pertencem às classes a que foram atribuídos. A avaliação da classificação utilizando a matriz de confusão foi feita pela proporção de amostras corretamente classificadas, denominada Exatidão Global, que corresponde à razão entre a soma da diagonal da matriz de confusão (amostras corretamente classificadas) e a soma de todos os elementos desta matriz (número total de amostras).

3.4.4 Geração de pontos amostrais e extração dos valores de coeficiente de retroespalhamento por classe de uso do solo.

Utilizando o aplicativo ArcGIS 9.3, foram gerados 50 pontos aleatórios em cada classe de uso do solo. Estes pontos foram ajustados para não se situarem nas bordas das classes, evitando assim possíveis erros na extração dos valores.

Os dados tabulares relativos à inundação dos anos de 2007 e 2008 da grade do Pirizal foram inseridos no software ArcGIS 9.3 e transformados em um *shapefile* de pontos. Estes pontos foram utilizados na averiguação da ocorrência ou não de inundação, servindo de base para traçar um modelo de regressão entre os valores de retroespalhamento obtidos nesses pontos e a ocorrência de inundação.

A figura 3.6 apresenta o mapa de uso do solo com os pontos amostrais e o com a espacialização dos pontos de monitoramento com dados de inundação da grade do Pirizal.

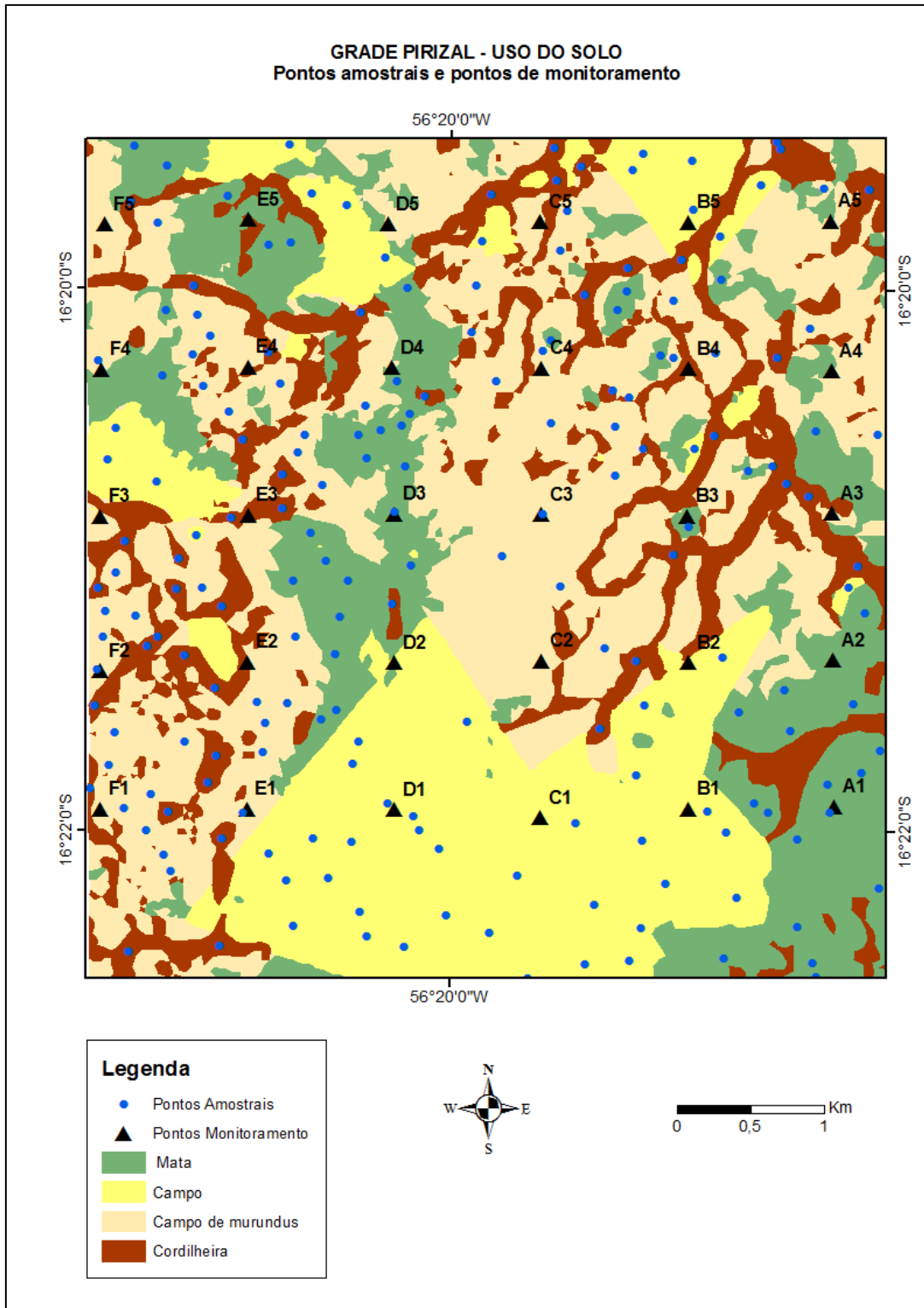


Figura 3.6 – Mapa de uso do solo, pontos amostrais aleatórios e pontos de monitoramento com dados de inundação da grade do Pirizal

De posse destes dados, as imagens em coeficiente de retroespalhamento foram importadas para o software ArcGIS 9.3, onde, por meio da ferramenta *Extract Multi Values to Points*, foram extraídos os valores de coeficiente de retroespalhamento das imagens ALOS/PALSAR nos pontos amostrais, contendo ainda informações de uso do solo.

3.4.5 Análise estatística

A análise estatística dividiu-se em duas etapas. A primeira avaliou as diferenças entre os valores do coeficiente de retroespalhamento por classe, com o objetivo de verificar a capacidade do sensor ALOS/PALSAR em separar as diferentes coberturas/ usos que ocorrem na grade do Pirizal.

Neste contexto foi realizado o teste de Mann-Whitney (teste U). Um teste não paramétrico que tem por objetivo averiguar se são iguais as medianas 1X e 1Y de duas populações contínuas e independentes, X e Y. Os valores de U calculados pelo teste avaliam o grau de entrelaçamento dos dados dos dois grupos após a ordenação. A maior separação dos dados em conjunto indica que as amostras são distintas, rejeitando-se a hipótese de igualdade das medianas.

A segunda etapa da análise estatística baseou-se na aplicação de técnicas de regressão logística com o objetivo de encontrar um modelo para descrever a relação entre variável de saída (variável dependente) e variáveis independentes (preditoras ou explanatórias), no caso específico a ocorrência de inundação e os valores do coeficiente de retroespalhamento por classe de uso.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos cruzamentos dos dados de uso do solo, imagens ALOS/PALSAR com os pontos amostrais, obteve-se os valores do coeficiente de retroespalhamento por classe de uso do solo. A tabela 4.1 apresenta os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão dos pontos observados com o coeficiente de retroespalhamento por classe do uso do solo extraídos das imagens ALOS/PALSAR do período de cheia e de seca de 2007 e 2008.

Tabela 4.1 - Valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão dos pontos observados com o coeficiente de retroespalhamento por classe do uso do solo.

Classe		10/fev/07	28/set/07	13/fev/08	30/set/08
Mata	Média	-4,580	-7,560	-4,840	-8,540
	Desvio Padrão	3,143	1,809	2,895	2,384
	Mínimo	-12,000	-12,000	-10,000	-17,000
	Máximo	-1,035	-3,000	-2,347	-3,000
Campo de murundus	Média	-12,060	-13,620	-11,600	-14,340
	Desvio Padrão	4,172	3,070	5,253	2,647
	Mínimo	-21,000	-19,000	-22,000	-21,000
	Máximo	-3,000	-5,000	-2,000	-10,000
Campo	Média	-17,530	-17,089	-17,400	-18,530
	Desvio Padrão	4,296	2,947	3,893	2,429
	Mínimo	-25,000	-22,000	-24,000	-22,000
	Máximo	-6,000	-6,000	-8,000	-13,000
Cordilheira	Média	-7,740	-8,660	-8,420	-8,820
	Desvio Padrão	3,135	1,902	3,441	1,903
	Mínimo	-17,000	-14,000	-17,000	-13,000
	Máximo	-1,000	-5,000	-3,000	-5,000

A figura 4.1 apresenta os *boxplots* dos valores do coeficiente de retroespalhamento obtidos nas imagens ALOS/PALSAR para as classes de uso do solo, nas imagens adquiridas em 10/02/2007, 28/09/2007, 13/02/2008 e 30/09/2008.

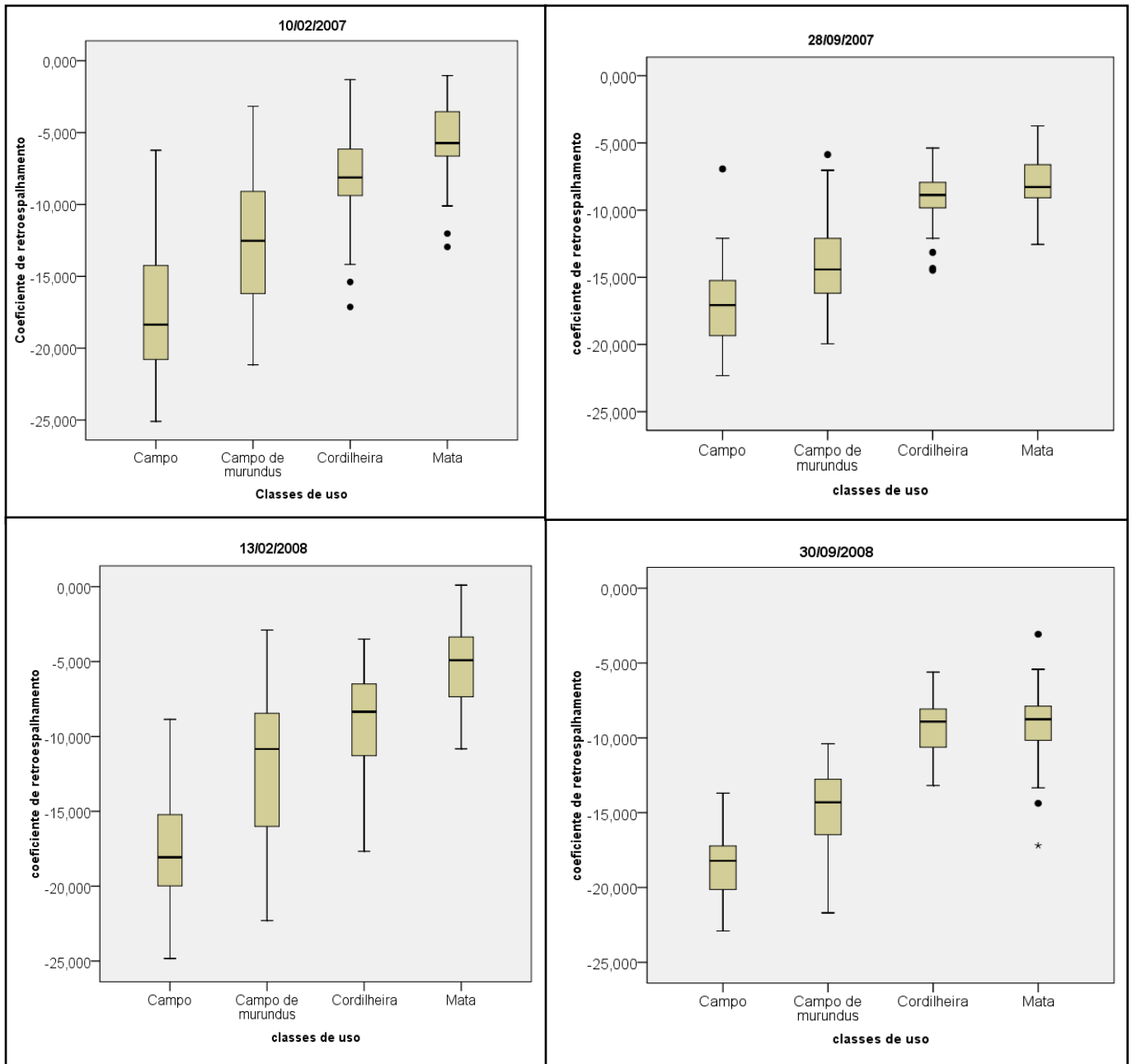


Figura 4.1 - Boxplots com os valores coeficiente de retroespalhamento obtidos nas imagens ALOS/PALSAR para as classes de uso do solo, nas imagens adquiridas em: 10/02/2007, 28/09/2007, 13/02/2008 e 30/09/2008. Eixo Y: coeficiente de retroespalhamento. Eixo X: Classe de uso do solo. A caixa concentra o range de 50% dos valores da amostra, a linha central na horizontal indica a posição da mediana.

A partir da tabela 4.1 e da figura 4.1 observa-se que as classes com os valores mais elevados do coeficiente de retroespalhamento foram mata e cordilheira. Essas áreas são formadas principalmente por indivíduos arbóreos, com a presença de galhos e troncos e, em alguns casos, existência de sub-bosques, resultando num intenso espalhamento volumétrico,

fazendo que essas áreas apareçam com tonalidades mais claras nas imagens de RADAR (JENSEN, 2009).

Já as classes que não possuem predominância de indivíduos arbóreos apresentaram valores médios de retroespalhamento, em geral, menores que as classes de mata e cordilheira.

Os valores médios do coeficiente de retroespalhamento para a classe mata foi de -4,710 na cheia e -8,05 na seca. Para a classe cordilheira os valores foram -8,080 e -8,740, respectivamente na cheia e na seca.

As áreas com a presença de cordilheiras são caracterizadas por paleo-diques ou paleo-dunas (KLAMMER, 1982) muito arenosas que alcançam, aproximadamente, 1 a 5 metros acima do nível da inundação, tendo a predominância da erva *Bromelia balansae* (gravatá) sobre o solo, o que indica condições permanentes de não alagamento (NUNES DA CUNHA, 1990), fato que explica a pouca variação dos valores do coeficiente de retroespalhamento nas imagens de seca e cheia.

Nas classes mata e cordilheira os valores médios obtidos na imagem do período de cheia foram mais altos do que os observados no período de seca, principalmente na classe mata. No caso desta classe, a presença de água no substrato da cobertura florestal propicia o aumento do espalhamento de canto (*double-bounce*) e conseqüentemente o aumento dos valores do coeficiente de retroespalhamento.

A diferenciação de valores no período de cheia e seca é visível quando observamos a variação desses valores na classe mata, comparados com os da classe cordilheira (tabela 4.2). Ambas as classes apresentam indivíduos arbóreos, contudo, as cordilheiras são áreas que não alagam. A classe mata que se encontra inundada no mês de fevereiro obteve a maior variação de valores comparando os dados de cheia e seca, ressaltando a influência da lâmina d'água no comportamento do alvo.

Tabela 4.2 – Variação dos valores médios do coeficiente de retroespalhamento dos períodos de seca e cheia de 2007 e 2008.

	Mata	Campo	Cordilheira	Campo Murundus
Média fev 2007/08	-4,710	-17,465	-8,080	-11,830
Média set 2007/08	-8,050	-17,8095	-8,740	-13,980
Variação	3,340	0,344	0,660	2,150

A classe campo apresenta formações inundadas, na maioria após desmatamento com estrato herbáceo denso com predominância de gramínea exótica, apresentando textura lisa comprada às outras classes, o que propicia, na banda L, um espalhamento na direção oposta ao sensor, retornando valores baixos de retroespalhamento, tanto no período de cheia quanto de seca, sendo caracterizadas nas imagens com tons de cinza mais escuros, evidenciando-se em relação às demais classes de uso. O valor médio do coeficiente de retroespalhamento no período de cheia e seca foi respectivamente -17,465 e -17,809. Foi a classe que teve menos variação comparando os períodos analisados.

A classe campo de murundus é formada por áreas planas de curta e rasa inundação, dominadas por gramíneas de pequeno a médio porte e intercaladas com elevações do terreno de alguns metros de diâmetro, chamadas de murundus, sobre os quais ocorrem pequenos agrupamentos arbóreos não inundáveis, compostos por espécies que ocorrem no Cerrado (PONCE & CUNHA, 1993). O valor médio do coeficiente de retroespalhamento no período de cheia e seca foi, respectivamente, - 11,83 e -13,98.

Nas classes com maior nível de biomassa vegetal (mata e cordilheiras), aparecem padrões mais rugosos e bem definidos na superfície, possivelmente devido a interação de maior intensidade do dossel com as ondas da banda L, conforme a Figura 4.2.

As áreas de campo caracterizam-se pela baixa biomassa e no período de cheia apresentam-se inundadas com lamina d' água de aproximadamente 0,6 m, conforme dados de campo, resultando numa reflexão especular da água, retornando baixos níveis de sinal para o sensor e evidenciando os campos inundados. (Figura 4.2).

As áreas com vegetação inundada foram realçadas devido ao efeito de reflexão de canto (*double-bounce*), como por exemplo as áreas de mata, ocorrendo um aumento na magnitude do sinal registrado pela antena, caracterizado pela existência de níveis de cinza mais claros na imagem.

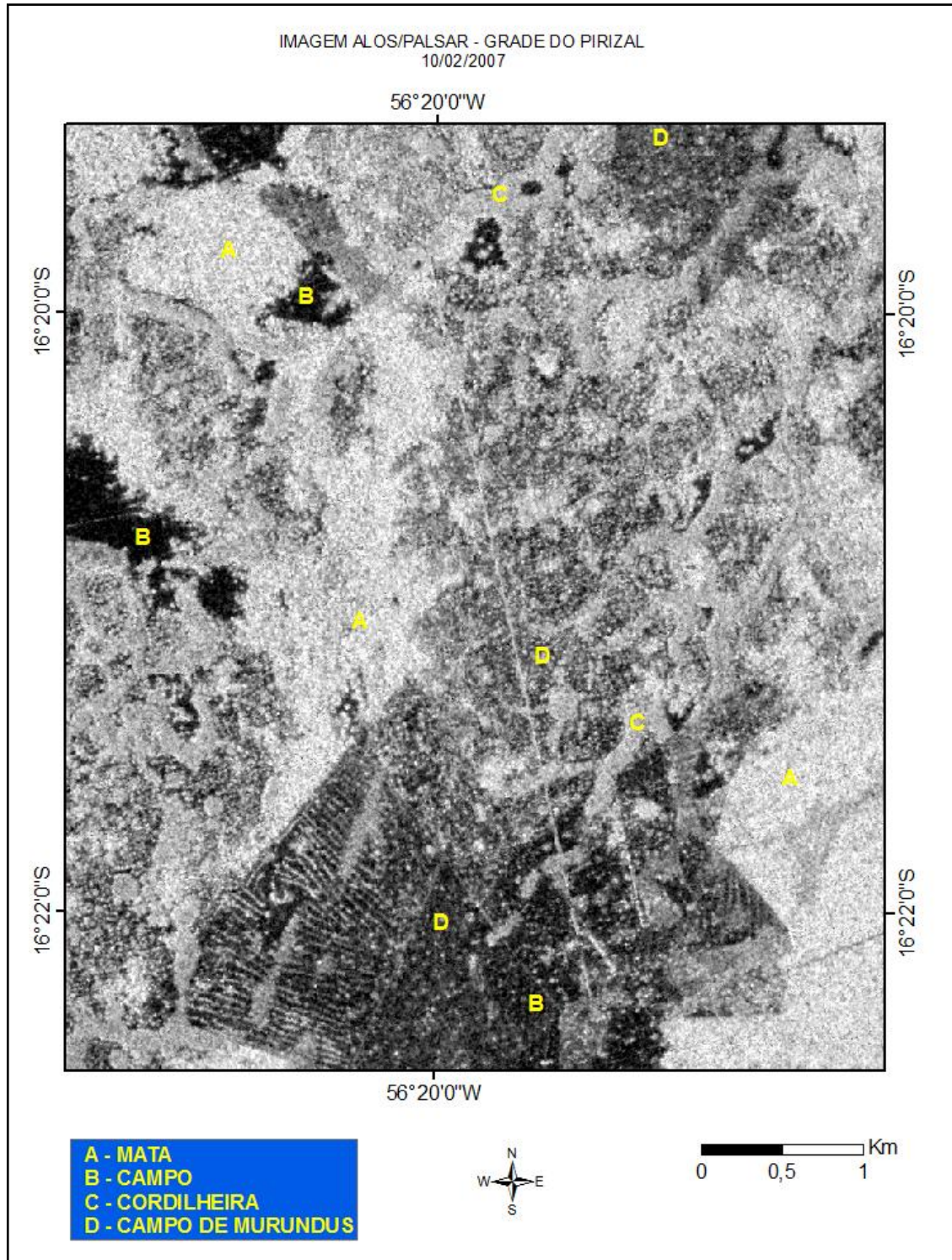


Figura 4.2 – Imagem ALOS/PALSAR de 10/02/2007 da grade do Pirizal. destaque para o comportamento das diferentes classes de uso do solo.

Segundo Hess et al. (1990), a banda L de sensores SAR geralmente provê boa separação entre florestas alagadas e não alagadas. A reflexão *double-bounce* em florestas inundadas possibilita a discriminação destas áreas, que sazonalmente fazem parte do Pantanal.

No caso, a onda eletromagnética penetra através do dossel, sofre um primeiro espalhamento quase especular na água, sendo direcionada para os troncos das árvores e retornando para o sensor como resposta do alvo.

Observa-se que os *boxplots* indicaram uma boa separabilidade entre as classes, principalmente nas imagens de fevereiro de 2007 e 2008. A figura 4.3 apresenta as fotografias obtidas nos ambientes de estudo, mostrando a diferença dos alvos em diferentes condições de inundação.

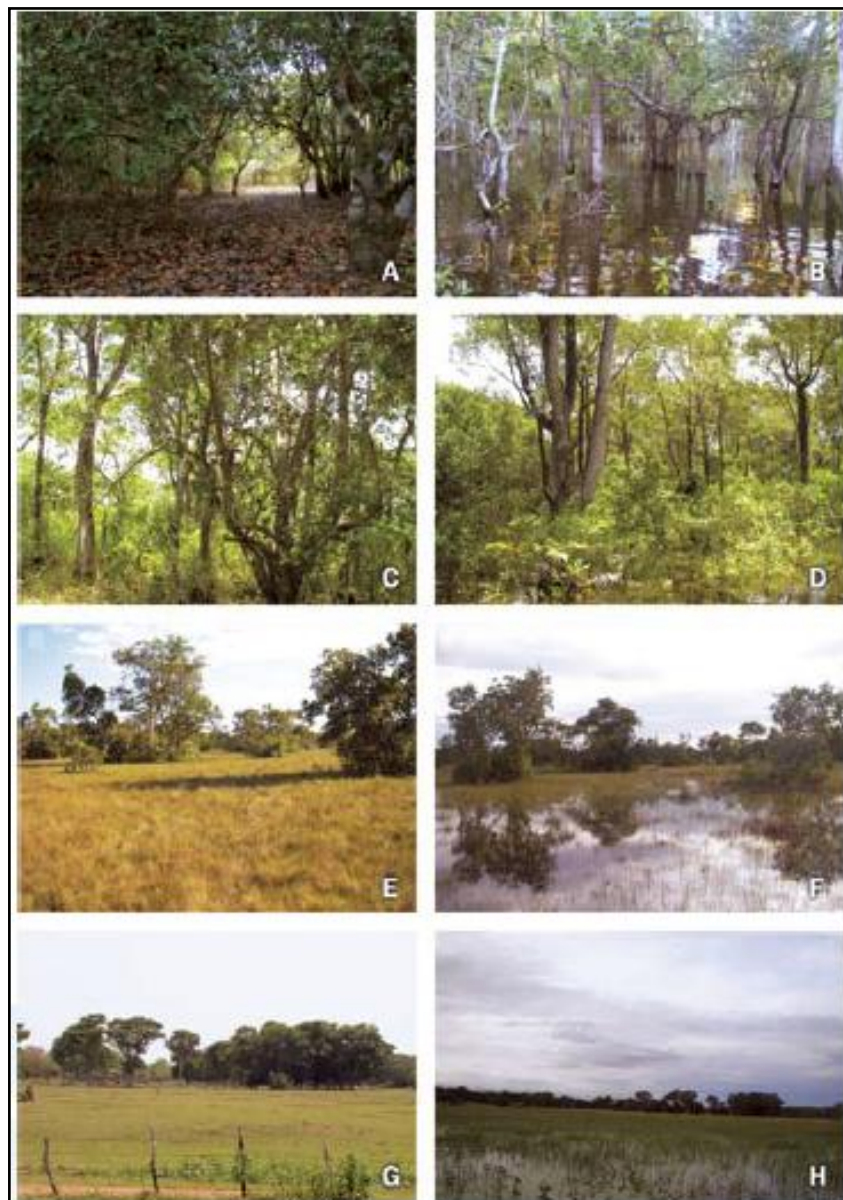


Figura 4.3 Ambientes secos na estação seca e inundados na estação das águas. A e B Landizal, C e D Cambarazal (classe mata), E e F Campos de Murundus e G e H Campos Limpos. Fonte: NUNES DA CUNHA, C.; REBELLATO, L.; COSTA, C. P. . 2010.

Após o cruzamento e extração dos valores de retroespalhamento por classe do uso do solo, executou-se o teste de *Mann-Whitney (U)* para verificar a similaridade dos valores de retroespalhamento. Nos casos em que os p-valores sejam maiores que o nível de significância, estes serão similares. A escolha deste método se deu em função dos dados não apresentarem uma distribuição normal.

Tabela 4.3 - Valores de média e desvio padrão do coeficiente de retroespalhamento extraídos das quatro imagens ALOS/PALSAR e os p-valores do Teste U com nível de significância de 5%.

		Mata	Campo	Cordilheira	Campo Murundus
10/02/2007	Média	-4,580	-17,530	-7,740	-12,060
	Std.Dev.	3,143	4,296	3,135	4,172
	p-valor teste U Mata	-	0,0000	0,0000	0,0000
	p-valor teste U Campo Murundus	0,0000	0,0000	0,0000	-
28/09/2007	Média	-7,5600	-17,0890	-8,6600	-13,6200
	Std.Dev.	1,8088	2,9469	1,9018	3,0699
	p-valor teste U Mata	-	0,0000	0,0147	0,0000
	p-valor teste U Campo Murundus	0,0000	0,0000	0,0000	-
13/02/2008	Média	-4,8400	-17,4000	-8,4200	-11,6000
	Std.Dev.	2,8952	3,8927	3,4410	5,2528
	p-valor teste U Mata	-	0,0000	0,4360	0,0000
	p-valor teste U Campo Murundus	0,0000	0,0000	0,0017	-
30/09/2008	Média	-8,5400	-18,5300	-8,8200	-14,3400
	Std.Dev.	2,3837	2,4291	1,9026	2,6466
	p-valor teste U Mata	-	0,0000	0,0000	0,0000
	p-valor teste U Campo Murundus	0,0000	0,0000	0,0000	-

O resultado do teste U mostrou similaridade estatística apenas entre as classes Mata e Cordilheira numa única data analisada (13/02/2008), atestando que existem diferenças significativas entre os valores do coeficiente de retroespalhamento das quatro classes de vegetação/uso do solo mapeadas na grade do Pirizal, tanto nas imagens ALOS/PALSAR do período de cheia quanto de seca.

Em seguida, utilizando os dados das réguas de inundação nos pontos de monitoramento da grade do Pirizal, tentou-se desenvolver um modelo de regressão logística considerando os dados de inundação e os valores de retroespalhamento, onde, a partir das tabelas de classificação geradas no modelo, avaliou-se a separabilidade ou não dos valores de retroespalhamento em diferentes condições de inundação.

Na utilização das observações em um único modelo, desenvolvido independentemente da cobertura do solo, nota-se um desempenho não satisfatório. A tabela de classificação, nesse caso, indicou um acerto geral de 65,6% (tabela 4.4) na discriminação das áreas inundadas e não inundadas. Enquanto o modelo consegue prever de forma confiável os não casos (94,7%), são subestimados fortemente locais com inundação (24,2%).

Tabela 4.4 – Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento das classes mata, cordilheira, campo e campo de murundus nas situações de inundação e não inundação.

Observado		Previsto		Percentagem de acerto
		inundação		
		0	1	
inundação	0	89	5	94,7
	1	50	16	24,2
Percentual Geral				65,6

0 não inundado e 1 inundado

A análise do resumo do modelo (Tabela 4.5) indicou que neste teste a proporção de variação da variável dependente explicada pelo modelo é de apenas 3,9%, os valores de 2 Log likelihood também estão elevados, comprovando a pouca eficiência do modelo de regressão.

Tabela 4.5 – Resumo do modelo de regressão resultante da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento das classes mata, cordilheira, campo e campo de murundus.

2 Log likelihood	Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
212,188 ^a	0,029	0,039

Contudo, ao analisar os valores separados por classe, observa-se que a classe mata foi a que apresentou o melhor desempenho na separação entre diferentes situações de inundação, obtendo 80,6% de acerto (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe mata nas situações de inundação e não inundação

Observado		Previsto		Percentagem de acerto
		inundação		
		0	1	
inundação	0	15	3	83,3
	1	4	14	77,8
Percentual Geral				80,6

0 não inundado e 1 inundado

As classes campo e campo de murundus foram as que obtiveram os menores valores de separabilidade entre a cheia e a seca, sendo 58% e 64 %, respectivamente. Os resultados gerados mostraram-se pouco efetivos na de diferenciação dessas classes no período seco comparando com a época da inundação. Para as duas classes, os casos de inundação são fortemente subestimados.

Tabela 4.7 - Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe campo nas situações de inundação e não inundação

Observado		Previsto		Percentagem de acerto
		inundação		
		0	1	
inundação	0	14	0	100
	1	10	0	0
Percentual Geral				58,3

0 não inundado e 1 inundado

Tabela 4.8 - Resultados da regressão logística utilizando os valores de coeficiente de retroespalhamento da classe campo de murundus nas situações de inundação e não inundação

Observado		Previsto		Percentagem de acerto
		inundação		
		0	1	
inundação	0	44	2	95,7
	1	25	5	16,7
Percentual Geral				64,5

0 não inundado e 1 inundado

A classe cordilheira não foi analisada, uma vez que não apresenta nos pontos amostrais, presença de inundação.

Os resultados observados nas classes de cobertura vegetal estão ligados diretamente às características dessas áreas, como composição vegetal, presença de indivíduos arbóreos, umidade, rugosidade, bem como dependem diretamente das características do sensor utilizado.

Ao compararmos os resultados obtidos nesse trabalho com alguns já publicados sobre o tema, observa-se um alinhamento em relação aos valores obtidos.

Martinez e Toan (2007), ao mapear a dinâmica de inundação na Amazônia, com 21 cenas do JERS, entre 1993 e 1997, apresentaram valores médios retroespalhamento de -9 para florestas não inundadas, de -6,5 para florestas inundadas e acima de -14 para campos inundados. Este estudo indica que quanto mais elevado a altura da lâmina d'água mais alto o coeficiente de retroespalhamento na classe de floresta e mais baixo em áreas com pouca vegetação, em função do espalhamento *double-bounce* e especular, respectivamente.

Os autores ainda citaram que a análise da variação temporal do coeficiente de retroespalhamento reduz a confusão observada entre superfícies lisas (por exemplo, corpos d'água abertas, solos nus) inerentes ao comportamento desses alvos na banda L.

Evans et. al (2010), ao utilizar dados ALOS/PALSAR e Radarsat para mapear a inundação na região da Nhecolândia no Pantanal chegaram a resultados parecidos com os deste trabalho. Os autores concluíram que a partir que os mapas gerados apresentaram boa separabilidade entre floresta inundada e floresta de terra firme. No entanto, a banda L-HH não foi ideal para a separação de campos/agricultura inundados de campos/agricultura não inundados. Os valores das florestas inundadas tiveram os maiores valores nos meses de cheia, tendo boa separabilidade das demais classes neste período.

A figura 4.4 apresenta os valores de retroespalhamento identificados pelos autores em diferentes tipos de uso do solo.

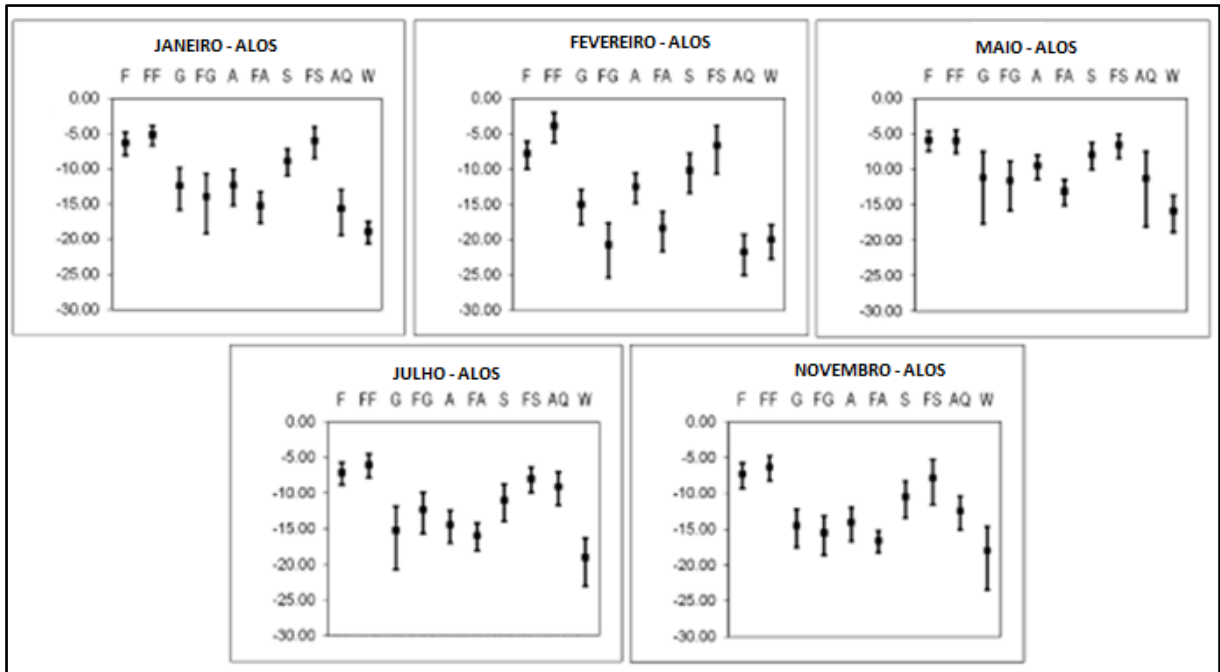


Figura 4.4 - Valores de retroespalhamento identificados em diferentes tipos de uso do solo F = Floresta, FF = Floresta inundadas, G = campos, FG = campos inundados, A = Agricultura, FA = Agricultura inundada, S = Savana, FS = Savana inundada, AQ = Vegetação Aquática, W = Águas abertas. Fonte Evans et. al (2010). Eixo Y: coeficiente de retroespalhamento. Eixo X: Classe de uso do solo.

Freitas (2012) ao utilizar imagens ALOS/PALSAR (polarizações HH, HV e VV) para discriminar as diferentes classes de cobertura vegetal representativas da região do Médio Taquari - MS, bioma Pantanal, concluiu que os valores do coeficiente de retroespalhamento foram úteis para discriminar as classes Floresta Estacional Semidecidual Aluvial, Savana Florestada e Savana Arborizada.

Por conseguinte, para atestar o potencial da imagem ALOS/PALSAR, em diferenciar os diferentes tipos de cobertura e uso do solo na grade do Pirizal executou-se uma classificação, utilizando o classificador contextual polarimétrico na imagem de fevereiro de 2007. Os resultados dessa classificação é uma classificação MAXVER e outra MAXVER/ICM.

A escolha da imagem de fevereiro de 2007 para o processo de classificação se deu em função de que nesta data a grade do Pirizal apresenta inundações praticamente em toda sua área, sendo que somente as áreas de cordilheiras não se encontravam inundadas e também por essa imagem ter apresentado boa separabilidade entre as classes, conforme os *boxplots* apresentados.

A figura 4.5 apresenta os mapas resultantes da classificação executada.

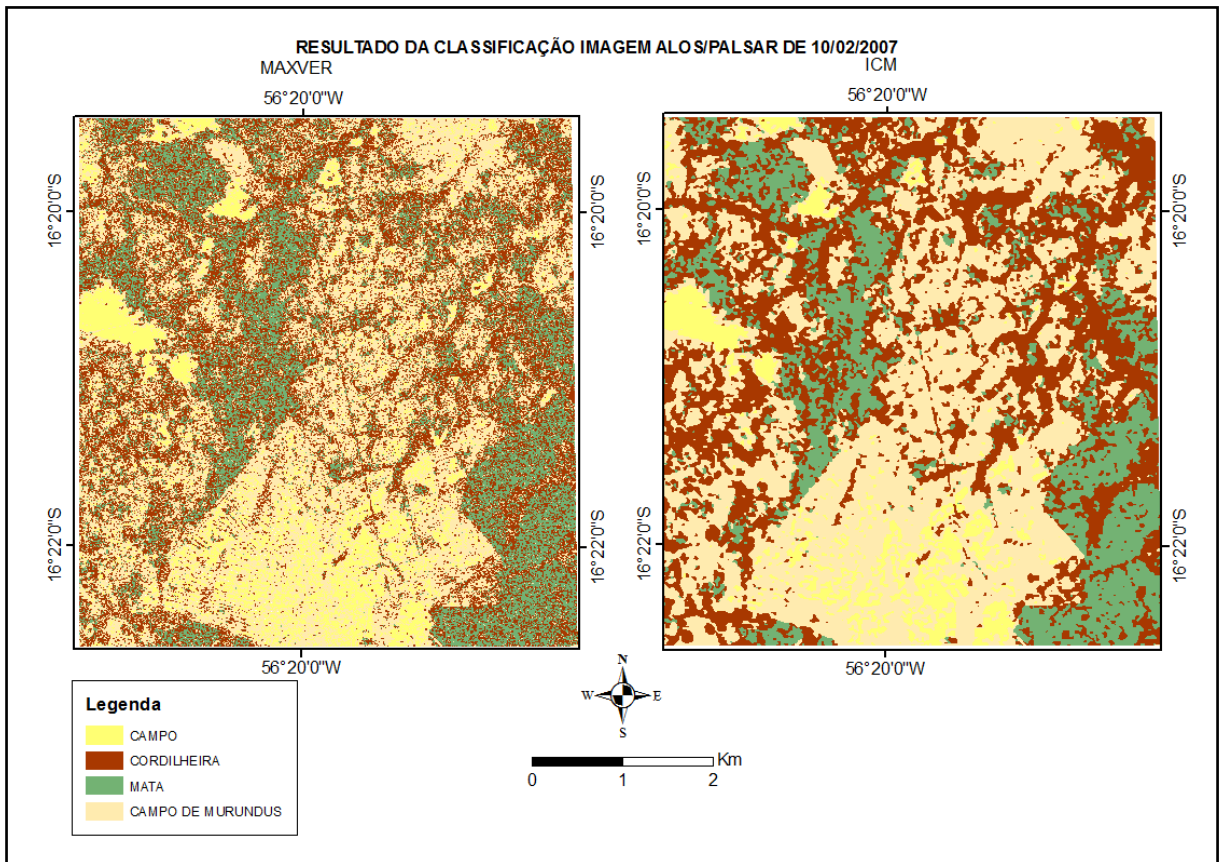


Figura 4.5 – Mapas resultantes da classificação MAXVER e MAXVER/ICM na Grade do Pirizal – Imagem ALOS/PALSAR de 10/02/2007.

A tabela 4.9 apresenta o índice Kappa das classificações MAXVER e ICM na grade do Pirizal. As tabelas 4.10 e 4.11 apresentam a matriz de confusão e o índice de exatidão global para os resultados da classificação ICM e MAXVER, respectivamente.

Tabela. 4.9 - Exatidão das classificações dos dados ALOS/PALSAR HH, em amplitude na banda L

CLASSIFICAÇÃO	KAPPA	CONCEITO
MAXVER	0,653	Muito Boa
ICM	0,977	Excelente

Tabela 4. 10 - Matriz de confusão para a classificação ICM HH

Classif.\Refer.	campo	cordilheira	mata	campo de murundus	Soma das Linhas
campo	1075	0	0	37	1112
cordilheira	0	613	28	0	641
mata	0	0	925	0	925
campo de murundus	0	0	0	1161	1161
Soma das colunas	1075	613	953	1198	3839
Kappa = 0,977059					
Exatidão global (%) = 98,30					
Erro Global (%) = 1,70					

Tabela 4. 11 - Matriz de confusão para a classificação MAXVER HH

Classif.\Refer.	campo	cordilheira	mata	campo de murundus	Soma das Linhas
campo	1035	0	0	191	1226
cordilheira	0	425	322	165	912
mata	0	73	589	45	707
campo de murundus	40	115	42	797	994
Soma das colunas	1075	613	953	1198	3839
Kappa = 0,65					
Exatidão global (%) = 74,13					
Erro Global (%) = 25,87					

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que:

A) Comparativamente às matrizes de confusão das classificações ICM, as matrizes de confusão das classificações MAXVER apresentaram bons resultados, tanto no índice de concordância Kappa, quanto em relação aos valores de Exatidão Global;

B) A classificação MAXVER HH, atingiu o conceito “Muito Boa”, segundo os intervalos de índice Kappa estabelecidos por Landis e Koch (1977);

C) A melhor classificação foi obtida pelo método contextual ICM, obtendo-se um índice Kappa de 0,977 e Exatidão Global da classificação de 98,30 %; considerada excelente;

D) Comparando-se os dados da matriz de confusão da melhor classificação com os dados univariados (ICM HH) (Tabela 4.11), verifica-se que ocorreu pouca confusão do classificador entre as classes mata e cordilheira, possivelmente devido a existência de

indivíduos arbóreos em ambas as classes. Nas classes campo e campo de murundus também observa-se um pouca confusão.

Comparando o mapa de uso/cobertura gerado pela classificação da imagem ALOS de fevereiro com o mapa gerado por Zerwes (2012), com imagem SPOT de 2,5 m de resolução, percebe-se que parte das áreas mapeadas como campo por Zerwes (2012), foram classificadas na imagem ALOS, em parte, como campo de murundus. Isso deve-se ao fato de que uma parte das áreas de campo era anteriormente ocupada por campo de murundus, existindo ainda pequenos murundus que são evidenciados na imagem ALOS/PALSAR, conforme figura 4.6.

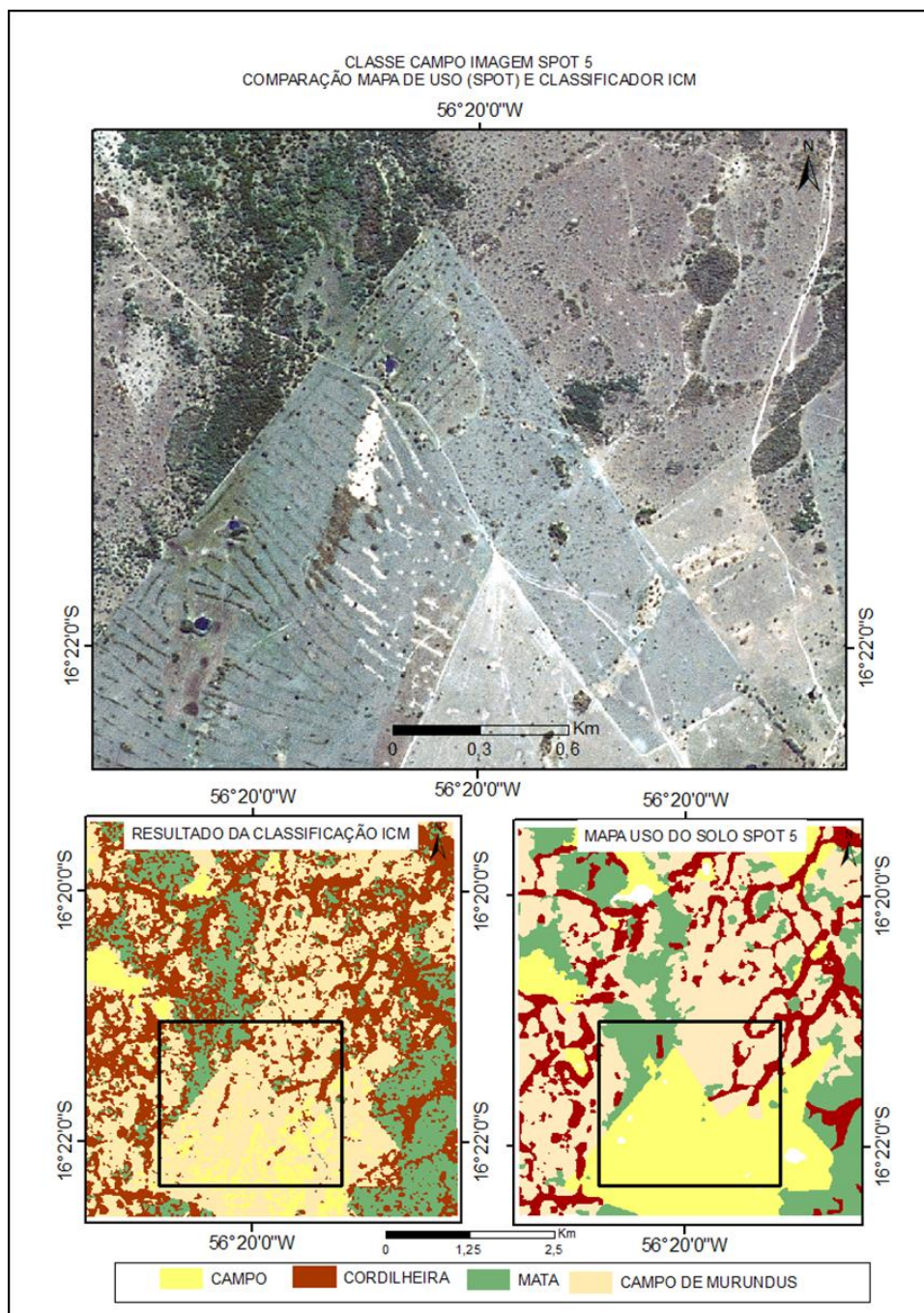


Figura 4.6 – Comparação entre a classificação MAXVER/ICM e o mapa de uso do solo de Zerwes (2012).

Observa-se ainda no resultado da classificação ICM da imagem ALOS/PALSAR, comparando com o mapa gerado por Zerwes (2012), o mapeamento das bordas das áreas de mata como cordilheiras. Isso pode ter ocorrido em função de que nas bordas dessas áreas a vegetação é menos densa, diminuindo o efeito da reflexão double-bounce e, conseqüentemente, retornando menos sinal para o sensor, fazendo com que essas áreas apresentassem um tom de cinza mais escuro. Deve-se levar em conta também a resolução espacial da imagem ALOS em relação à imagem SPOT, 6,25 e 2,50 m respectivamente.

Ao compararmos os resultados da classificação da imagem ALOS/PALSAR com outros trabalhos publicados observa-se que o classificador ICM apresenta resultados excelentes na classificação de imagens SAR, principalmente na diferenciação de classes florestais e de uso do solo na Amazônia, existindo um número menor de trabalhos executados com essa ferramenta na área do Pantanal em relação ao Bioma Amazônico.

Pereira et. al. (2011) ao comparar os classificadores SVM (Support Vector Machine) e MAXVER-ICM na identificação do uso do solo na região de Belterra na Amazônia, concluíram que o MAXVER-ICM apresentou resultados mais satisfatórios que o SVM em imagens ALOS/PALSAR.

Guerra (2009), ao utilizar classificação digital para o mapeamento de desmatamento na Amazônia concluiu que classificador MAXVER-ICM apresentou melhor desempenho na classificação dos dados SAR em amplitude que o algoritmo ISOSEG.

Nunes (2008) ao utilizar o classificador MAXVER-ICM em imagens na banda L para identificar fitofisionomias de Floresta de Várzea alcançou resultados satisfatórios com o classificador MAXVER-ICM, comparado com o MAXVER .

Gomes et al (2006) ao utilizar as classificações Supervisionada por Distância Mínima, MAXVER e MAXVER-ICM, concluiu que estatisticamente, o melhor algoritmo utilizado para o mapeamento de lagoas na época de cheia foi o MAXVER-ICM.

Os resultados observados neste trabalho e por diversos autores apontam a aplicação excelente do classificador contextual MAXVER/ICM em imagens SAR. Isso deve-se ao fato desse classificador considerar as propriedades estatísticas inerentes das imagens SAR, como o

ruído *speckle*, e também ao fato de levar em consideração as informações contextuais das imagens de RADAR.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi em parte alcançado; demonstrando-se o potencial das imagens ALOS/PALSAR (banda L, polarização HH) na detecção de áreas inundadas no Pantanal, levando em consideração as diferentes classes de uso do solo na grade do Pirizal

Observou-se a relação entre os tipos de cobertura do solo e os valores do coeficiente de retroespalhamento, indicando uma boa separabilidade das classes e demonstrando a capacidade de utilização de imagens de RADAR na detecção de diferentes alvos na grade do Pirizal, Pantanal Mato-grossense.

A análise estatística dos valores do coeficiente de retroespalhamento das classes mapeadas comprovou a capacidade de diferenciação dessas classes por meio da utilização de das imagens SAR na banda L. Apenas a classe mata e cordilheira apresentaram diferença não significativa entre si apenas na imagem de fevereiro de 2008.

As imagens de RADAR na banda L mostraram-se eficientes na separação de matas inundadas e não inundadas. As tabelas de classificação geradas a partir da regressão logística indicaram que este sensor apresenta limitações para separar campos inundados de campos no período de seca, não sendo possível traçarmos um modelo de classificação para todas as classes.

O classificador contextual ICM mostrou-se eficiente para a discriminação dos alvos das classes de uso/cobertura na grade do Pirizal no período de cheia, tendo um índice Kappa de 0,977, considerado excelente.

As imagens ALOS/PALSAR, os mapas de classificação e as análises estatísticas geradas, mostraram-se uteis para um melhor entendimento da dinâmica de inundação nessa porção do Pantanal.

Sugere-se o desenvolvimento de trabalhos futuros utilizando as imagens de RADAR integradas com dados óticos para obter melhores resultados na separação de períodos inundados e não inundados nas classes campo e campo de murundus, bem como que sejam avaliadas outras bandas e polarizações para discriminar a presença de inundação nas áreas de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUD NETA, S. R. **Uso de imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia**. 2009. 264 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2009.

BERKOWITZ, R. S. **Modern radar**. Analysis, evaluation, and system design. New York: John Wiley & Sons, 1965.

BOURGEAU-CHAVEZ, L. L., KASISCHKE, E. S., BRUNZELL, S. M., MUDD, J.P., SMITH, K. B., FRICK, A.L. Analysis of space-borne SAR data wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. **International Journal of Remote Sensing**, **22**(18): 3665–3687, 2001.

BOURGEAU-CHAVEZ, L. L., SMITH, K. B., BRUNZELL, S. M., KASISCHKE, E. S., ROMANOWICZ, E. A., RICHARDSON, C. J. Remote sensing of regional inundation patterns and hydroperiod in the greater Everglades using synthetic aperture radar. **Wetlands**, **25**:176–191, 2005.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. G. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Boca Raton, FL, 1999.

COSTA, M. P. F. **Net Primary Productivity of Aquatic Vegetation of the Amazon Floodplain: a Multi-SAR Satellite Approach**. 2000. 233 f. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Victoria, Victoria, Canada, 2000.

CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas**. 1999, 271 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 set. 2012.

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, n. 4, p. 560-575, 2010.

FANTIN-CRUZ, I. ; GIRARD, P.; ZEILHOFER, P. ; COLLISCHONN, W. . Dinâmica de inundação. In: FERNANDES, I. M; SIGNOR, C. A; PENHA. (Org.). **Biodiversidade no Pantanal de Poconé**. Cuiabá: Attema, 2010. P. 25 – 36

FREITAS, C. C. et al. **Utilização de imagens de radar de abertura sintética na classificação do uso e ocupação do solo**. 2007. Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17%4080/2007/08.10.18.20/doc/v1.pdf>. Acesso em 10/12/2012.

FREITAS, D M de. **Potencial das imagens multipolarizadas do satélite ALOS/PALSAR na discriminação de cobertura vegetal do bioma pantanal : estudo de caso na região do Médio Taquari, MS.** 2012. 78 f.. Dissertação (Mestrado em Geociências)—Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

FORD, J. P.; BLOM, R. G.; COLEMAN, J. R.; FARR, J. J.; PLAUT, H. A.; POHN, F. F.; SABINS, J. R. Radar Geology. In: HENDERSON, P.M.; LEWIS, A. J. (ed.). **Manual of remote sensing: Principles & Applications of Imaging Radar.** New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. p. 511-565.

FURTADO, L. F. A.; SILVA, T. S. F; NOVO. E. M. L. M. Backscattering response of different land cover types in the Lago Grande de Curuai floodplain (Amazon, Brazil) determined from Radarsat-2 and TerraSAR-X data. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8475-8482.

GOMES, A. R. et al. **Classificação digital de imagem JERS-1 para identificação de lagoas na baixa Nhecolândia-MS.** In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. 1, 2006, Campo Grande-MS. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2006. p. 192 -199.

GOPAL, B.; JUNK, W. J. Biodiversity in wetlands: an introduction. In: GOPAL, B.; JUNK, W. J.; DAVIS, J. A. (eds.), **Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation**, v. 1, Leiden: Backhuys Publishers, 2000. p.1–10.

GUERRA, J B. **Análise metodológica do tratamento de dados SAR R99B para discriminar incremento de desflorestamento no sudoeste da Amazônia brasileira.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2009.

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

HESS, L.L., MELACK, J., NOVO, E. M. L. M., BARBOSA, C. C. F., GASTIL, MARY. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the Central Amazon Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 404-428. 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Imagens ALOS/PALSAR.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/>>. Acessado em: 18dez.2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2 ed.** Rio de Janeiro: IBGE (Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 1). 2012.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing - a remote sensing perspective.** Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente** – Uma Perspectiva em Recursos Terrestre. Tradução: EPIPHANIO, J.C.N.(Coordenador). São José dos Campos, SP: Parêntese, New Jersey: Prentice Hall, 2009.

JUNK, W. J. Long-term environmental trends and the future of tropical wetlands. **Environmental Conservation**, v. 29, p. 414–435, 2002.

KASISCHKE, E. S., BOURGEOU-CHAVEZ, L. L. Monitoring south Florida wetlands using ERS-1SAR imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, **63**. 1997. 281-291.

KLAMMER G. Die Paläovüste des Pantanal von Mato Grosso und die pleistozäne Klimageschichte der brasilianischen Randtropen. **Zeitschrift für Geomorphologie**. 26: p. 393-416. 1982.

KUPLICH, T. M. Estudos florestais com imagens de radar. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p.71-96, 2003.

KUX, H. J. H. **Imágenes de radar: teoría e interpretación**. São José dos Campos: INPE, 1997.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.

LANG, M.W., TOWNSEND, P.A., KASISCHKE, E. S. Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **46**. 535-546. 2008:

LEWIS, A. J., HENDERSON, F.M. Radar fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F.M. HENDERSON & A.J. LEWIS (eds.). **Principles & Applications of Imaging Radar: manual of remote sensing**. 3rd ed., .2. New York: John Willey. p.131 - 181. 1998.

LIMA, M. I. C. **Projeto RADAM**. Uma Saga Amazônica. Belém: Ed. Paka-Tatu, 2008.

MARTINEZ, Jean-Michel; TOAN, Thuy Le, Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. **Remote Sensing of Environment**, Volume 108, Issue 3. p. 209-223. 15 June 2007.

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

MITSCH, W.J., GOSSELINK, J.G. **Wetlands**. 3 ed. New York: Wiley, 2000.

NOVITZKI, R.; SMITH, R.; FRETWELL, J. Wetland functions, values and assessment. In: FRETWELL, J.; WILLIAMS, J.; REDMAN, P. (org.). **National Water Summary on Wetland Resources**. Washington: U.S.Geological Survey, 1996. p.79-86.

NOVO, E. M. L. M.; COSTA, M. P. F. Fundamentos e aplicações de RADAR no estudo de áreas alagáveis. In: SOUZA, R.B. **Oceanografia por Satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 236-258.

NOVO, E. M. L. M. Bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1, 2006. Campo Grande. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2006. p. 883-894

NUNES, G M. **Sensoriamento Remoto Aplicado na Análise da Cobertura Vegetal das Reservas de Desenvolvimento Sustentável Amanã e Mamirauá**. 2008. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2008.

NUNES DA CUNHA, C. **Estudo florístico e fitossociológico das principais formações arbóreas do Pantanal de Poconé, MT**. 1990. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

NUNES DA CUNHA, C.; REBELLATO, L.; COSTA, C. P. . Vegetação e flora: experiência pantaneira no sistema de grades. In: FERNANDES, I. M; SIGNOR, C. A; PENHA. (Org.). **Biodiversidade no Pantanal de Poconé**. Cuiabá: Attema, 2010, p 37-57.

ORMSBY, J.P., BLANCHARD, J.P., BLANCHARD, A.J. Detection of Lowland Flooding Using Active Microwave Systems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(3):317 – 328. 1985

PALME, U. W.; MURA, J. C.; NOVO, E. M. L. M; SOARES, J. V.; KUX, H. J. H. Sensoriamento remoto por radares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., Salvador, BA. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996, p. 247-329.

PARADELLA, W.R. A Tecnologia de RADAR Imageador em Aplicação na Amazônia: Fundamentação, O Experimento SAREX e o Programa ADRO. **Fator Gis**, 14 (Junho-Julho):40-43, 1996.

PARADELLA W. R., CECARELLI, I. C.F., LUIZ, S., OLIVEIRA, C.G., OKIDA, R. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região amazônica (Serra dos Carajás, Pará). **Revista Brasileira de Geologia**, 35(3):323-332. 2005,

PEREIRA, L. O.; SILVA, A. E. P.; NEGRI, R. G.; SANT'ANNA, S. J. S.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C.; ERTHAL, G. J. Análise comparativa dos métodos de classificação SVM e Maxver-ICM Polarimétrico em imagem de radar ALOS PALSAR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.8223-8230

PONCE, V.; CUNHA, C. N. Vegetated earthmouns in tropical savanas of Central Brazil: synteseis. **Journal of Biogeography**, v. 20. p. 219-235. 1993

RANNEY, K. Radar fundamentals: technical perspectives In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (Ed.). **Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar**. New York: American Society for Photogrametry and Remote Sensing, 1998, cap. 2, p. 9-130.

SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 3d Ed . San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1996.

SARTORI, L. R. et al. Discriminação de tipos de cobertura vegetal em áreas alagáveis utilizando imagens de radar bandas L e C polarimétricas. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009, p. 7449-7456.

SEMA-MT. Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Mato Grosso. **Dinâmica de Desmatamento do Estado de Mato Grosso**. Cuiabá-MT: Não publicado. 2012.

SHIMADA, M., I.; O., TADONO, T., ISONO, K. PALSAR radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 47 (12): 3915 – 3932. 2009

SIGNOR, C. A; FERNANDES, I. M; PENHA, J.O Pantanal e o sistema de Pesquisa. In: FERNANDES, I. M; SIGNOR, C. A; PENHA. (Org.). **Biodiversidade no Pantanal de Poconé**. Cuiabá: Attema, 2010. p 13 – 24

SOLER, R. S. **Detecção de manchas de óleo na superfície do mar por meio de técnicas de classificação textural de imagens de radar de abertura sintética**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2000.

TEIXEIRA, S. G. **Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras**. 2011. 105 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading: Addison- Wesley, 1986.

VAN DER SANDEN. **Radar Remote Sensing to Support Tropical Forest Management**. Tropenbos-Guyana,, 1997.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/colecao_digital_publicacoes.php>. Acesso em: out. 2012.

VIEIRA, P. R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**, 1996, 251 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 1996.

WANG, Y., HESS, L.L., FOLOSO, S., MELACK, J. M. Understanding the Radar Backscattering from flooded and nonflooded amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. **Remote Sensing of Environment**, 54: 324–332. 1995.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to Microwave Remote Sensing**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.

ZANI, H.; ROSSETTI, D. F.; CREMON, E. H. Mapeamento geomorfológico de áreas alagáveis tropicais com imagens ALOS PALSAR . In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p.8453-8460.

ZERWES, L. C, ARAUJO, V. S, SCHWENK, L. Moura. Mapeamento da dinâmica do uso e ocupação da terra na área PELD , situada no Pantanal de Mato Grosso, com a utilização de imagens de satélite (Landsat/SPOT). In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL. 4, 2012, Bonito-MS. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: INPE, 2012. p. 262 -270