



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

**SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO NO  
MONITORAMENTO DO DESMATAMENTO DO CERRADO E  
DAS CATEGORIAS TERRITORIAIS DA AMAZÔNIA**

**RALPH TRANCOSO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Nº 41**

**Brasília - DF  
Fevereiro de 2013**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

**SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO NO  
MONITORAMENTO DO DESMATAMENTO DO CERRADO E  
DAS CATEGORIAS TERRITORIAIS DA AMAZÔNIA**

**RALPH TRANCOSO**

Dissertação de mestrado submetida ao Instituto de Geociências, Departamento de Geologia Geral e Aplicada da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Geociências Aplicadas.

**Banca Examinadora:**

Dr. Paulo Roberto Meneses

\_\_\_\_\_  
Orientador

Dr. Edson Eyji Sano

\_\_\_\_\_  
Membro Interno

Dr. Carlos Augusto Klink

\_\_\_\_\_  
MMA/SMCQ - Membro Externo

**Brasília - DF  
Fevereiro de 2013**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Trancoso, Ralph

Sensoriamento remoto da vegetação no monitoramento do desmatamento do Cerrado e das categorias territoriais da Amazônia. / Ralph Trancoso; orientação de Paulo Roberto Meneses. Brasília, 2013

62p.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília / Instituto de Geociências, 2013

1. Sensoriamento remoto da vegetação; 2. Reflectância dos alvos naturais; 3. Índices de vegetação; 4. Análise espacial

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Trancoso, R. Sensoriamento remoto da vegetação no monitoramento do desmatamento do Cerrado e das categorias territoriais da Amazônia. Brasília, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2013, 62p. Dissertação de Mestrado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ralph Trancoso

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Sensoriamento remoto da vegetação no monitoramento do desmatamento do Cerrado e das categorias territoriais da Amazônia.

GRAU: Mestre ANO: 2013

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

---

Ralph Trancoso  
091.838.647-09  
ralphtrancoso@gmail.com

*Dedico este trabalho à  
Ingrid Sardinha Trancoso:  
minha esposa, minha família,  
minha maior conquista.*

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Ingrid Sardinha Trancoso pela segurança emocional, amor, carinho, dedicação incondicional e por fazer a minha vida melhor a cada dia.

À minha família, particularmente à minha avó Adelaide Trancoso, fonte de inspiração na superação dos obstáculos e pelo material genético da minha determinação.

Ao Instituto de Geociências - IG da Universidade de Brasília - UNB pela oportunidade que me foi dada de encarar mais uma empreitada científica e obtenção do título de Mestre em Geociências Aplicadas.

Ao Dr. Paulo Roberto Meneses pela orientação do trabalho e conhecimento compartilhado sobre sensoriamento remoto.

Ao Dr. Edson Eijy Sano pelo convite para trabalhar com os dados de desmatamento no Cerrado (PMDBBS) e pelas ricas discussões sobre sensoriamento remoto da vegetação do Cerrado.

Ao Ministério Meio Ambiente - MMA, particularmente ao Mauro Pires, Juliana Simões e Francisco Oliveira, meus gestores, pela flexibilidade na minha agenda de trabalho, que me possibilitou cumprir os créditos e desenvolver este trabalho de pesquisa.

Ao Centro de Sensoriamento Remoto - CSR do IBAMA pela oportunidade de trabalhar com os dados do PMDBBS e pelo espaço compartilhado.

Ao projeto Demarcação e Proteção de Terras Indígenas da Deutsche Gesellschaft fuer Internationale Zusammenarbeit (GIZ), que apoiou o terceiro capítulo deste estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, por me proporcionarem ótima formação acadêmica e maturidade científica que me possibilitam enxergar o mundo de outra forma.

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO I: Apresentação, objetivos e estrutura da dissertação.**

1.1. Apresentação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
1.4 Referências bibliográficas.....	4

### **CAPÍTULO II: Desmatamento no Cerrado e mudanças espectrais: uma análise dos dados do Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite - PMDBBS**

2.1. Introdução.....	5
2.2. Metodologia.....	8
2.2.1 Área de estudo.....	8
2.2.2 Processamento das imagens.....	9
2.2.3 Amostragem.....	11
2.2.4 Dados adicionais.....	12
2.2.5 Análise estatística.....	13
2.3. Resultados.....	14
2.3.1 Mudanças espectrais após o desmatamento do Cerrado.....	14
2.3.2 Mudanças espectrais regionais após o desmatamento no Cerrado.....	17
2.4. Discussão.....	24
2.4.1 Influência da precipitação na variabilidade regional das mudanças espectrais após o desmatamento no Cerrado.....	24
2.4.2 Influência da biomassa na variabilidade regional das mudanças espectrais após o desmatamento no Cerrado.....	26
2.5 Conclusões e recomendações.....	30
2.6 Referências bibliográficas.....	32

### **CAPÍTULO III: Análise comparativa de propriedades espectrais da vegetação por categoria territorial nos estados do Pará e do Mato Grosso**

3.1 Introdução.....	37
3.2 Metodologia.....	40
3.2.1 Área de estudo.....	40
3.2.2 Obtenção das imagens índices de vegetação e reflectância no infravermelho médio.....	40
3.2.3 Amostragem por categoria territorial.....	42
3.2.4 Análise estatística.....	45
3.3. Resultados.....	45
3.3.1 NDVI, EVI e MIR nas categorias territoriais do Mato Grosso.....	45
3.3.2 NDVI, EVI e MIR nas categorias territoriais do Pará.....	47
3.4 Discussão.....	49
3.4.1 Diferenças na resposta espectral das categorias territoriais por estado.....	49
3.4.2 Influência da biomassa na resposta espectral.....	53
3.5 Conclusões.....	55
3.6 Referências bibliográficas.....	56

### **CAPÍTULO VI: Considerações finais**

4.1 Considerações finais.....	60
4.2 Referências bibliográficas.....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Imagens Landsat TM selecionadas para o estudo. ....	10
<b>Tabela 2.2.</b> Amostragem do desmatamento por região. ....	12
<b>Tabela 2.3.</b> Estações pluviométricas selecionadas para cada região estudada. ....	13
<b>Tabela 2.4.</b> Teste t pareado para comparação das propriedades espectrais entre vegetação nativa e desmatamento no bioma Cerrado. GL=grau de liberdade .....	17
<b>Tabela 3.1.</b> Amostragem das categorias territoriais consideradas no estudo para os estados do Pará e Mato Grosso. ....	44
<b>Tabela 3.2.</b> Valores de significância (p) do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado de Mato Grosso. Valores menores que 0,05 significam que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das categorias territoriais comparadas. ....	47
<b>Tabela 3.3.</b> Valores de significância (p) do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado do Pará. Valores menores que 0,05 significam que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das categorias territoriais comparadas. ....	49

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1.** Energia eletromagnética (A) e classificação dos comprimentos de onda dentro do espectro eletromagnético (B) (adaptado de Moreira, 2008). ..... 1
- Figura 1.2.** Assinatura espectral da vegetação em relação a outros alvos naturais e bandas espectrais do Landsat TM e MODIS utilizadas nos estudos do Cerrado e da Amazônia respectivamente (adaptado de Zhou, 1999). ..... 2
- Figura 2.1.** Localização da área de estudo nos estados da Bahia, Mato Grosso e Minas Gerais (órbitas-pontos 220-68, 226-70 e 219-72, respectivamente). ..... 9
- Figura 2.2.** Diagrama de dispersão tridimensional relacionando as reflectâncias nos comprimentos de onda vermelho (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (banda 5) das unidades amostrais (vegetação nativa e desmatamento) em 2008 (A) e 2009 (B). ..... 15
- Figura 2.3.** Boxplots e curvas de distribuição de frequência comparando as propriedades espectrais entre vegetação nativa e desmatamento no bioma Cerrado. .... 16
- Figura 2.4.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado da Bahia. .... 19
- Figura 2.5.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado de Minas Gerais. .... 21
- Figura 2.6.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado de Mato Grosso. .... 23
- Figura 2.7.** Influência da precipitação diária e acumulada na data de aquisição das imagens Landsat TM na Bahia, Minas Gerais e Mato Grosso. A seta amarela indica a data da imagem anterior ao desmatamento, enquanto a seta laranja corresponde a data em que os polígonos de desmatamento foram detectados. .... 25
- Figura 2.8.** Modelos matemáticos logarítmicos e exponenciais da relação entre a biomassa das amostras de vegetação nativa e as propriedades espectrais. .... 28
- Figura 2.9.** Derivação da relação da mudança relativa do NDVI de 2009 em relação a 2008 em função da biomassa da vegetação comparando as amostras de vegetação natural em período seco (2008) e período chuvoso (2009) no Mato Grosso. .... 30
- Figura 3.1.** Série histórica da taxa anual de desmatamento nos estados do Pará e Mato Grosso e contribuição relativa destes estados ao desmatamento da Amazônia. .... 39
- Figura 3.2.** Variação sazonal da cobertura de nuvens média da Amazônia no período entre janeiro de 2009 e dezembro de 2011 e cobertura média de nuvens no período considerado. A seta amarela indica o mês com menor cobertura de nuvens. .... 41
- Figura 3.3.** Imagens índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI), reflectância no infravermelho médio (MIR) e categorias territoriais amostradas nos estados do Pará e Mato Grosso. .... 43
- Figura 3.4.** Box-plots do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI) e reflectância no infravermelho médio (MIR) para as

categorias territoriais amostradas no estado do Mato Grosso (Terras Indígenas – TI; Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI; Unidades de Conservação de Uso Sustentável – UCUS e Áreas Privadas Cadastradas – CAR). Os dados discrepantes foram excluídos devido ao grande número de amostras (n=29.072). ..... 46

**Figura 3.5.** Box-plots do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI) e reflectância no comprimento de onda infravermelho médio (MIR) para as categorias territoriais amostradas no estado do Pará (Terras Indígenas – TI; Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI; Unidades de Conservação de Uso Sustentável – UCUS e Áreas Privadas Cadastradas – CAR). Os dados discrepantes foram excluídos devido ao grande número de amostras (n=62.374). ..... 48

**Figura 3.6.** Relação entre Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI) para as categorias territoriais do Pará e do Mato Grosso ..... 51

**Figura 3.7.** Modelos matemático logarítmicos, exponenciais e polinomiais para a relação entre as propriedades espectrais e a biomassa nos estados do Pará e Mato Grosso ..... 54

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado utilizou o sensoriamento remoto da vegetação para o desenvolvimento de dois estudos em dois biomas brasileiros, com diferentes vegetações.

O primeiro estudo foi realizado no Cerrado, cobrindo as savanas do Brasil central que apresentam alta variabilidade espacial na vegetação. O Cerrado é o bioma brasileiro não-amazônico que perde sua vegetação natural de forma mais acelerada. O objetivo do estudo foi avaliar as mudanças na resposta espectral nos comprimentos de onda vermelho, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) após o desmatamento. A análise foi realizada nos polígonos de desmatamento do Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS) identificados por interpretação visual localizados em três diferentes regiões. Para cada região, a imagem Landsat TM onde o desmatamento foi identificado (em 2009) foi comparada com a imagem do ano anterior (antes do desmatamento) e com as amostras testemunha de vegetação nativa. Os resultados revelaram mudanças nas propriedades espectrais após o desmatamento tanto em relação ao ano anterior, quanto em relação à vegetação nativa. Na banda 3 os polígonos de desmatamento apresentaram reflectância 50,8% superior em relação a vegetação nativa, enquanto a diferença foi 10,2% maior na banda 4. Na banda 5, a reflectância aumentou 30,6% após o desmatamento, enquanto os valores médios de NDVI reduziram 28,6%. Todas estas mudanças foram estatisticamente significativas pelo teste t pareado. As análises de regressão entre as propriedades espectrais antes e após o desmatamento comparando o comportamento do desmatamento e da vegetação natural demonstraram um padrão de mudança consistente ao longo das regiões selecionadas. As diferenças observadas nas mudanças espectrais entre regiões foram discutidas em relação a precipitação e biomassa da vegetação.

O segundo estudo foi realizado na região amazônica nos estados do Pará e do Mato Grosso. Estes estados vêm contribuindo com a maior parte do desmatamento na Amazônia brasileira. Entre 1988 e 2011 o desmatamento nestes estados representou 68% do total observado na Amazônia brasileira. O objetivo deste estudo foi analisar de forma comparativa o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Realçado (EVI) e a reflectância no comprimento de onda infravermelho médio (MIR) nas categorias territoriais (Terras Indígenas TI, Unidades de Conservação de Proteção Integral - UCPI, Unidades de Conservação de Uso Sustentável - UCUS e propriedades rurais cadastradas - CAR) dos estados do Pará e Mato Grosso. A análise foi realizada sob um mosaico de 7 imagens do produto MODIS de vegetação (MOD13Q1) de agosto de 2012. Para a amostragem dos valores digitais, uma grade vetorial de 5 km foi construída sob as categorias territoriais. A Análise de Variância (ANOVA) revelou que os valores de NDVI, EVI e MIR são diferentes entre as categorias territoriais. A tendência geral demonstrada pelo teste de Tukey para a comparação das médias de NDVI, EVI e MIR é que as TIs e UCPIs apresentam florestas melhor conservadas, seguidas das UCUSs e CARs respectivamente.

Palavras-chave: Propriedades espectrais da vegetação; Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); Índice de Vegetação Melhorado; Desmatamento no Cerrado; Savanas brasileiras; Categorias territoriais; Áreas protegidas; Propriedades rurais.

## ABSTRACT

This Master Science thesis used remote sensing of vegetation to carry out two studies in two Brazilian biomes, which present different vegetation characteristics.

The first study was performed in Cerrado biome, covering the Brazilian savannas that present high spatial variability of vegetation. Cerrado is the non-Amazonian Brazilian biome that has the fastest natural vegetation loss. This study aimed to evaluate changes on spectral response in red, near infrared, short wave infrared wavelengths and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) after deforestation. The analysis was conducted over polygons of deforestation from Monitoring Program of Brazilian Biomes by Satellite (PMDBBS) interpreted by visual inspection located at three different regions. For each location, the Landsat TM images where deforestation polygons were identified (in 2009) were compared to the previous year (before deforestation) as well as to control samples in native vegetation. Results have pointed out changes on spectral properties after deforestation not only regarding to previous year but also in relation to native vegetation. In band 3, deforestation polygons presented reflectance 50.8% higher in relation to native vegetation, while this difference was 10.2% higher in band 4. In band 5, the reflectance increased 30.6% after deforestation, while NDVI mean values decreased 28.6%. All of these differences were statistically significant by paired t-test. Regression analyses between spectral properties before and after deforestation comparing deforestation and natural vegetation behavior showed a consistent pattern of change throughout the selected regions. The observed differences in spectral changes among regions were then interpreted in light of precipitation and vegetation biomass.

The second study was carried out in the Amazon region, more specifically in the Mato Grosso and Pará States. These States contribute to the major part of deforestation in the Brazilian Amazon. Between 1988 and 2011, their deforestation represented 68% of overall deforestation in the Brazilian Amazon. The aim of this study is to make a comparative evaluation of NDVI, Enhanced Vegetation Index (EVI) and reflectance in the middle infrared wavelength (MIR) considering territorial categories (Indigenous Lands, Strictly Protected Areas, Sustainable Use Protected Areas and rural private lands) located in the Mato Grosso and Pará States. The analysis was carried out over a mosaic of seven tiles of MODIS vegetation product (MOD13Q1) from August of 2012. In order to obtain the means digital values, a vector grid with cells of 5-km was constructed for sampling purpose over the territorial categories. The Analysis of Variance (ANOVA) showed that digital values of NDVI, EVI and MIR are different among territorial categories. The overall trend revealed by Tukey test for multiple comparisons of mean values of NDVI, EVI and MIR is that Indigenous Lands and Strictly Protected Areas present better conserved forests, followed by Sustainable Use Protected Areas and rural private lands, respectively.

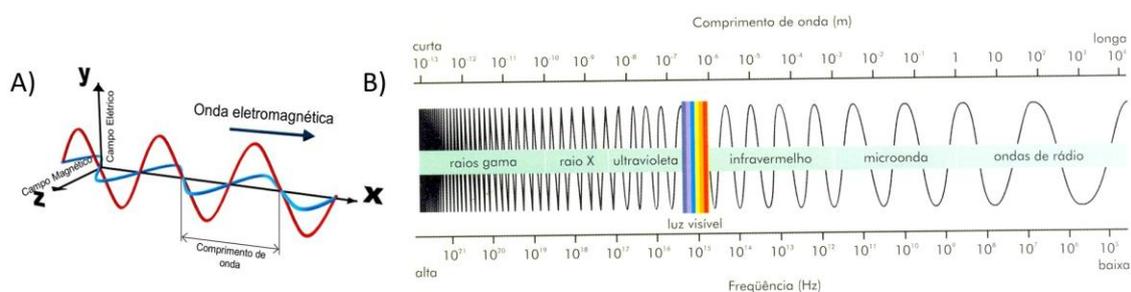
Key-words: Spectral properties of vegetation; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Deforestation in Cerrado, Brazilian savannas; Land categories; Protected Areas, Rural properties.

# CAPÍTULO I

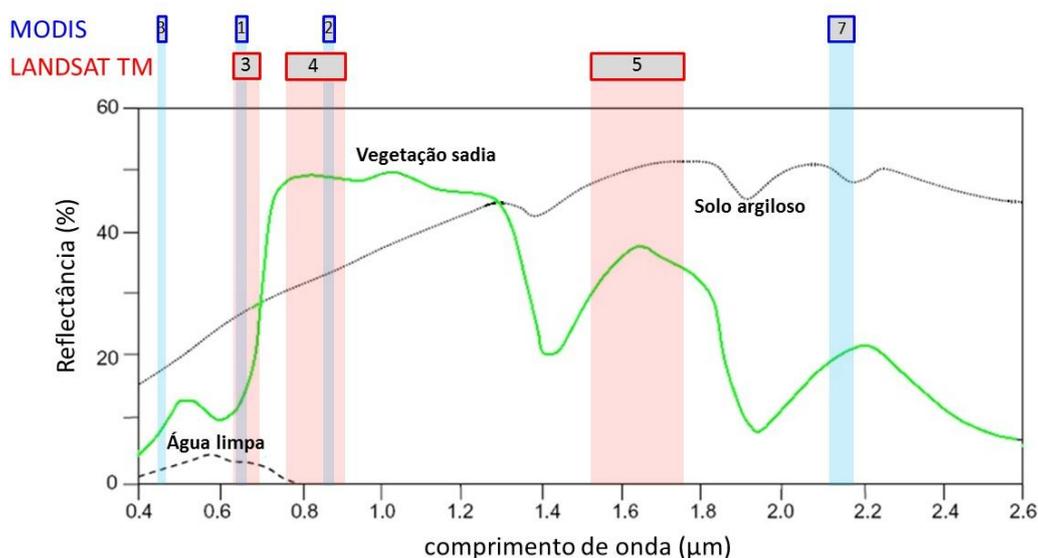
## Apresentação, objetivos e estrutura da dissertação.

### 1.1. Apresentação

A energia eletromagnética é resultado da interação de um campo elétrico e um campo magnético. Sua classificação é realizada de acordo com o seu comprimento de onda, dentro de um gradiente relacionado à frequência e dimensão do comprimento de onda conhecido como espectro eletromagnético (Figura 1.1). O estudo do espectro eletromagnético trouxe inúmeros benefícios para a sociedade em diferentes áreas do conhecimento, com destaque na medicina, no transporte (navegação), no conhecimento da terra (mapeamento) e na comunicação. No sistema solar, a maior fonte de energia eletromagnética é a radiação solar emitida ao longo dos comprimentos de onda do UV ao infravermelho de ondas curtas. A visão, nosso sentido mais aguçado, é baseada na resposta dos alvos à radiação solar ou outra fonte luminosa. O olho humano é um sensor remoto, pois utiliza a resposta da radiação eletromagnética (REM) da luz refletida dos alvos visualizados para obter informações sem ter contato físico com eles (Campbell, 2002). No entanto, é capaz de captar a REM apenas dentro de um curto intervalo do espectro, conhecido como luz visível, cujos comprimentos de ondas variam de 380 nm a 760 nm. Os satélites de observação da terra utilizam o mesmo princípio físico do olho humano e das câmeras fotográficas, para obter informações da superfície terrestre, por isso são considerados sensores remotos.



O sensoriamento remoto por imagens de satélites vem sendo utilizado para diversas finalidades relacionadas à medição e monitoramento de características biofísicas e atividades humanas na terra (Jensen, 2011). Por esta razão, atualmente existem centenas de sistemas de sensoriamento remoto públicos e comerciais coletando dados sobre o nosso planeta continuamente para a geração de informações e conhecimento sobre ele. Particularmente a respeito da vegetação, o sensoriamento remoto detém inúmeras aplicações, entre elas os estudos fenológicos, o monitoramento do desmatamento e a previsão de safras agrícolas (Ponzoni e Shimabukuro, 2010), bem como o monitoramento de atributos biofísicos e bioquímicos da vegetação (Asner, 1998). Os estudos apresentados nesta dissertação se baseiam no comportamento espectral da vegetação e utilizam dois diferentes sensores orbitais com diferentes características para monitorar a vegetação (Figura 1.2). O primeiro estudo utiliza as imagens das bandas 3, 4 e 5 do satélite Landsat TM, um sensor multiespectral de média resolução, para analisar o desmatamento do Cerrado. O segundo estudo utiliza imagens das bandas 1, 2, 3 e 7 do MODIS, um satélite de moderada resolução espacial e alta resolução temporal com 36 bandas para avaliação das categorias territoriais da Amazônia.



**Figura 1.2.** Assinatura espectral da vegetação em relação a outros alvos naturais e bandas espectrais do Landsat TM e MODIS utilizadas nos estudos do Cerrado e da Amazônia respectivamente (adaptado de Zhou, 1999).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Utilizar as propriedades espectrais da vegetação para análise das mudanças espectrais oriundas do desmatamento no Cerrado e como instrumento de avaliação quantitativa das categorias territoriais da Amazônia na integridade das florestas tropicais.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- A) Analisar a tendência geral das mudanças espectrais oriundas do desmatamento no Cerrado;
- B) Caracterizar a heterogeneidade espacial das mudanças espectrais oriundas do desmatamento no Cerrado;
- C) Relacionar a variabilidade das mudanças espectrais no Cerrado com a precipitação e a biomassa da vegetação;
- D) Propor recomendações operacionais a partir dos resultados obtidos no estudo para interpretação do desmatamento do Cerrado pelo Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS;
- E) Analisar o efeito das categorias territoriais da Amazônia nas propriedades espectrais das florestas tropicais;
- F) Avaliar a variabilidade espacial da resposta espectral das categorias territoriais entre estados da Amazônia;
- G) Relacionar as propriedades espectrais estudadas com a biomassa da vegetação.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A dissertação foi dividida em quatro capítulos. O primeiro deles apresenta brevemente ao leitor o sensoriamento remoto, os objetivos dos estudos e a organização

do documento. O segundo capítulo, redigido no formato de artigo, apresenta o estudo intitulado “*Desmatamento no Cerrado e mudanças espectrais: uma análise dos dados do Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS*”. No capítulo 3, também redigido no formato de artigo, o estudo intitulado “*Análise comparativa de propriedades espectrais da vegetação por categoria territorial nos estados do Pará e do Mato Grosso*” é apresentado. Os estudos foram desenvolvidos com o emprego de técnicas de processamento digital de imagens orbitais, análise espacial de informações geográficas e estatística experimental. O quarto e último capítulo traz uma síntese da relação entre os estudos e conclui a dissertação.

#### **1.4 Referências bibliográficas**

- Asner, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 64, p. 234-253, 1998.
- Campbell, J.B. Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, 3<sup>rd</sup> ed., 621p. 2002.
- Jensen, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução da segunda edição: Epiphany, J.C.N. et al. Editora Parêntese, 598p. 2011.
- Moreira, M.A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de Aplicação. 4<sup>a</sup> ed., Editora UFV, 422p. 2011.
- Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Editora Parêntese, 127p. 2010.

## CAPÍTULO II

---

### **Desmatamento no Cerrado e mudanças espectrais: uma análise dos dados do Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite - PMDBBS**

#### **2.1. Introdução**

O monitoramento do desmatamento no Brasil vem recebendo reconhecimento internacional por intermédio do Projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite – PRODES (INPE, 2013). O PRODES trouxe inúmeros benefícios que contribuíram tanto para o avanço do conhecimento científico da Amazônia, quanto para a elaboração de estratégias de governo para a redução do desmatamento. Com pouco mais de duas décadas de história, os resultados do PRODES são evidenciados pelo fortalecimento da comunidade de sensoriamento remoto brasileira e pela redução significativa do desmatamento da Amazônia. Contudo, o sucesso do programa em conjunto com o maior apelo que as questões amazônicas tendem a receber, de certa forma, inibiu o desenvolvimento de iniciativas de monitoramento da cobertura vegetal por satélite nos outros biomas brasileiros.

A comunidade científica internacional percebeu o fato e começou a chamar a atenção para o desmatamento brasileiro fora da Amazônia, particularmente aquele situado no bioma Cerrado (Ratter et al., 1997; Eva et al., 2004; Jason, 2005; Silva et al., 2006). O Governo brasileiro, reconhecendo tal limitação, lançou em 2007 os resultados do Projeto de Mapeamento da Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros, um dos componentes do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade – PROBIO com o intuito de preencher momentaneamente esta lacuna (Sano et al., 2008; 2009). Os resultados do PROBIO colocaram o bioma Cerrado em evidência ao demonstrar que até o ano de 2002, 43,22% do bioma apresentava vegetação antropizada.

O bioma Cerrado é constituído por formações savânicas e além de ocupar a maior parte da região central do Brasil, estende-se desde a porção norte da região sul, no estado do Paraná, até o norte do estado do Maranhão, na região nordeste. Trata-se do segundo maior bioma brasileiro, cobrindo uma superfície superior a 2.000.000 km<sup>2</sup> (IBGE, 2004). O cerrado detém elevada variabilidade espacial de fitofisionomias (Furley, 1999; Oliveira-Filho & Rattes, 2002). Suas tipologias variam desde vegetações campestres com predominância de gramíneas até as matas de galeria, formadas por três estratos arbóreos distintos com complexidade estrutural similar às florestas da Amazônia e da Mata Atlântica, sendo reconhecido como um importante *hotspot* de biodiversidade (Myers et al., 2000; Silva et al., 2002). A alta diversidade de ambientes e a heterogeneidade nos atributos ambientais do Cerrado (De Castro & Kauffman, 1998; Buttler et al., 2012) favorecem a riqueza florística, diversidade biológica e endemismo (Bridgewater et al., 2004; Simon et al., 2009). Por outro lado, o Cerrado apresenta características edafoclimáticas e relevo que favorecem a mecanização para as atividades agropecuárias, proporcionando alta produtividade potencial. Por esta razão, vem sendo extensivamente utilizado para a produção de alimentos (Rada, 2013). Portanto, o corrente cenário é o de expansão da fronteira agrícola e aumento do desmatamento (Sano et al., 2001; Jepson et al., 2010; Philippi et al., 2009; Sano et al., 2011), causando alterações ecossistêmicas e nos ciclos biogeoquímicos (Bernoux et al., 2006; Battle-Bayer et al., 2004).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora para a discriminação de fitofisionomias do Cerrado e avaliação da dinâmica sazonal destes ecossistemas (Ratana et al., 2005; Hills et al., 2011). Estudos recentes vêm demonstrando também a possibilidade da separação de áreas agrícolas de campos naturais a partir da variação intra-anual da resposta espectral (Galford et al., 2008; Brown et al., 2013).

Entendendo que havia conhecimento razoável sobre sensoriamento remoto e mão de obra qualificada suficiente, o Governo brasileiro decidiu dar continuidade à estratégia de monitoramento da cobertura vegetal dos biomas não amazônicos. Assim, foi criado o Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS (Brasil, 2009). O principal objetivo do PMDBBS foi estender o monitoramento do desmatamento por satélite para as regiões brasileiras fora do bioma Amazônia (biomas Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal), fornecendo subsídio às ações de fiscalização e planejamento da conservação. Os primeiros anos de monitoramento demonstraram que o bioma Cerrado é aquele que vem perdendo sua cobertura vegetal nativa de forma mais acelerada. Entre 2002 e 2008 o incremento anual médio de desmatamento no Cerrado foi de 14.179 km<sup>2</sup>/ano. Em 2009, 7.637 km<sup>2</sup> de vegetação nativa foram suprimidos e em 2010 mais 6.469 km<sup>2</sup> foram desmatados (Brasil, 2011). A variabilidade espacial das formações vegetais que compõem o Cerrado torna o monitoramento por satélite um grande desafio, pois a resposta espectral das fitofisionomias é bastante heterogênea e sofre grande influência da precipitação (Ferreira et al., 2003; Liesenberg et al., 2007). Por esta razão, o monitoramento vem sendo realizado por interpretação visual de composições coloridas 345 (RGB) de imagens Landsat TM. No entanto, faltam ainda parâmetros técnicos para dar suporte à tomada da decisão dos intérpretes sobre a ocorrência do desmatamento no Cerrado.

O objetivo deste estudo é avaliar as mudanças na resposta espectral nos comprimentos de onda vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (bandas 3, 4 e 5) a fim de auxiliar na precisão da interpretação das imagens dentro do PMDBBS, para distinguir com maior confiabilidade o desmatamento das fitofisionomias do bioma Cerrado. Adicionalmente, o estudo buscou demonstrar a

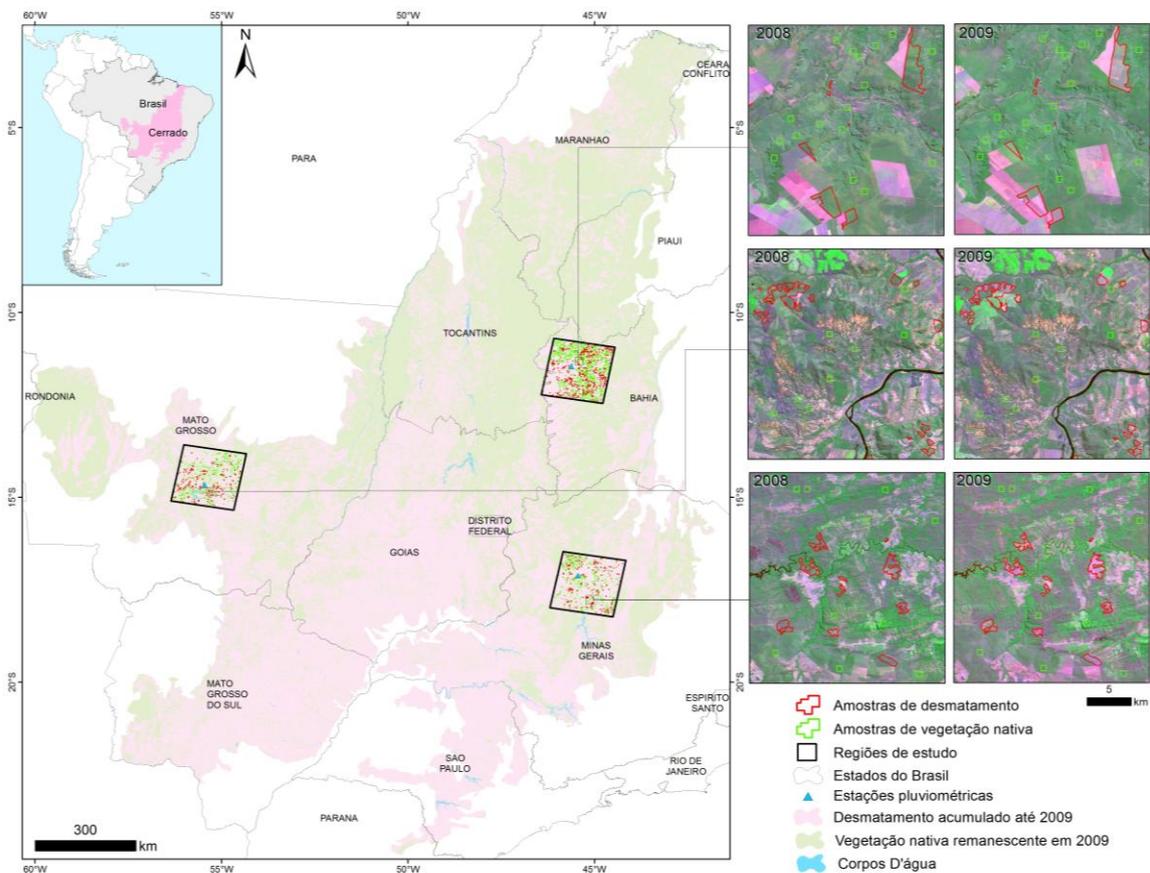
variabilidade regional das mudanças na resposta espectral e construir relações entre as propriedades espectrais e a biomassa da vegetação natural.

## **2.2. Metodologia**

### **2.2.1 Área de estudo**

O estudo foi realizado no bioma Cerrado. Para a cobertura total do bioma e estimativa do desmatamento anual do Cerrado, o PMDBBS realiza rotineiramente a interpretação visual de 118 imagens Landsat TM. Foram selecionadas para o estudo três regiões situadas nos estados da Bahia, Minas Gerais e Mato Grosso, que representam a variabilidade espacial das fitofisionomias do Cerrado, possibilitando, dessa forma, a análise das mudanças nas propriedades espectrais oriundas do desmatamento em diferentes regiões fitogeográficas. De acordo com a classificação proposta pelo PROBIO (BRASIL, 2007), as fitofisionomias predominantes na região da Bahia selecionada para o estudo são: Savana arborizada sem floresta de galeria (Sas), Savana florestada (Sd), Savana arborizada com floresta de galeria (Saf) e Floresta estacional decidual submontana (Cs). Na região selecionada em Minas Gerais, a categoria vegetacional predominante é a Savana parque com floresta de galeria (Spf), com encaves de Refúgios vegetacionais (R), Floresta estacional semidecidual aluvial (Fa), Savana arborizada com floresta de galeria (Saf) e Savana gramíneo-lenhosa com floresta de galeria. Na região Mato-grossense a Savana arborizada com floresta de galeria (Saf) e a Savana parque com floresta de galeria (Spf) são predominantes. Ocorrem também outras fitofisionomias como: Savana florestada (Sd), Savana arborizada sem floresta de galeria (Sas), Floresta estacional semidecidual submontana (Fs), Savana florestada (Sd), Savana parque com floresta de galeria (Spf) e Floresta

estacional semidecidual aluvial (Fa). Na figura 2.1 são demonstradas as regiões selecionadas para o estudo.



**Figura 2.1.** Localização da área de estudo nos estados da Bahia, Mato Grosso e Minas Gerais (órbitas-pontos 220-68, 226-70 e 219-72, respectivamente).

## 2.2.2 Processamento das imagens

Foram selecionados três pares de imagens Landsat TM para a realização do estudo. Cada par de imagens é composto por uma imagem de 2008, antes da detecção do desmatamento e outra de 2009, onde o desmatamento foi detectado. O primeiro par situado no estado da Bahia (órbita-ponto: 220-68), o segundo em Minas Gerais (órbita-ponto: 219-72) e o terceiro em Mato Grosso (órbita-ponto: 226-70) (Tabela 2.1). A ausência de nuvens foi considerada como pré-requisito para a seleção das imagens.

**Tabela 2.1.** Imagens Landsat TM selecionadas para o estudo.

Estado	Órbita-Ponto	1ª data*	2ª data**	Intervalo (dias)
Bahia	220-68	06/06/2008	27/07/2009	416
Minas Gerais	219-72	17/07/2008	05/08/2009	384
Mato Grosso	226-70	18/07/2008	12/06/2009	329

\* Imagem anterior à detecção do desmatamento;

\*\* Imagem em que o desmatamento foi detectado.

As imagens foram georreferenciadas utilizando 18 pontos de controle, tendo como referência os mosaicos de imagens Landsat ETM<sup>+</sup> do ano de 2000 (Geocover), disponibilizados pela Agência Espacial Americana – NASA. A principal vantagem da utilização destas imagens é o alto nível de pré-processamento empregado, destacando o fato de elas estarem ortorretificadas, realçadas e apresentarem deslocamento espacial máximo de 50 metros. Como o estudo busca quantificar as mudanças espectrais das áreas em que se detectou mudança (desmatamento) a partir da interpretação das composições coloridas utilizadas pelo PMDBBS (RGB: 3,4,5), foram utilizadas somente as bandas 3 (vermelho), 4 (Infravermelho próximo) e 5 (Infravermelho de ondas curtas) para este estudo. Uma vez georreferenciadas, as imagens foram convertidas para radiância no topo da atmosfera. Em seguida, foram transformadas em reflectância aparente utilizando o algoritmo QUAC (Quick Atmospheric Correction) encontrado no programa ENVI<sup>®</sup>.

Os índices de vegetação foram utilizados como forma de se melhorar o sinal refletido pela vegetação, o que é feito a partir da resposta espectral das imagens de dois ou mais comprimentos de onda combinados, normalmente nas regiões dos comprimentos de onda vermelho (0,6 - 0,7 $\mu$ m) e infravermelho próximo (0,7 - 1,1 $\mu$ m). A concepção teórica dos índices se baseia na análise das curvas de assinatura espectral da reflectância das folhas. Enquanto a energia refletida na região do visível é muito baixa devido a sua absorção pelos pigmentos fotossintéticos, na região do infravermelho

próximo a radiação é quase totalmente refletida (Huete et al., 2002). Com as imagens Landsat TM, as bandas 3 e 4 devem ser utilizadas para a derivação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), de acordo com a expressão abaixo.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Onde: NIR = reflectância no infravermelho próximo;  
RED = reflectância no vermelho.

### 2.2.3 Amostragem

Os polígonos de desmatamento do PMDBBS detectados por interpretação visual em 2009 nas imagens Landsat TM órbita-ponto 220-68 (Bahia), 219-72 (Minas Gerais) e 226-70 (Mato Grosso) foram usados para a amostragem dos valores de reflectância nas bandas 3, 4 e 5 e dos valores de NDVI. A tabela 2.2 sintetiza a amostragem do desmatamento para as regiões estudadas. O desenho experimental pareado foi utilizado para o estudo. Portanto, as mesmas métricas apresentadas na tabela 2.2 foram repetidas na amostragem da vegetação nativa, utilizada como testemunha neste estudo.

Para a amostragem da vegetação nativa do Cerrado, foram construídas três grades vetoriais, onde cada célula corresponde a um polígono com a área média dos polígonos de desmatamento identificados em cada uma das 3 imagens. Em seguida, as células da grade vetorial que estavam fora e na borda da máscara de vegetação nativa (não antropizada) foram eliminadas, assim como aquelas que interceptavam corpos d'água. A etapa seguinte foi o sorteio das unidades amostrais de vegetação nativa nas células remanescentes. Para isso, em cada uma das três regiões o mesmo número de polígonos de desmatamento identificados pelo PMDBBS foi sorteado, assegurando, dessa forma, a amostragem pareada. Essa estratégia possibilitou a amostragem da mesma superfície de vegetação nativa e desmatamento. Entretanto, devido a

variabilidade na forma dos polígonos, o número total de pixels amostrados foi diferente entre as amostras de desmatamento (578.677) e vegetação nativa (561.306). Essa diferença de 17.371 pixels corresponde apenas a 3,0% em relação aos pixels amostrados para o desmatamento. Após o estabelecimento das amostras os valores médios de reflectância nas bandas 3, 4 e 5 e de NDVI foram extraídos para cada amostra dos anos de 2008 e 2009.

**Tabela 2.2.** Amostragem do desmatamento por região.

Estado	Nº de Polígonos de desmatamento	Área média (ha)	Área total amostrada (ha)	Nº de pixels amostrados
Bahia	776	41.05	31856.8	351845
Minas Gerais	306	32.30	9886.8	108808
Mato Grosso	298	36.25	10803.1	118024
Total	1380	38.07	52546.8	578677

#### 2.2.4 Dados adicionais

Dados de precipitação e biomassa foram utilizados com intuito de complementar e discutir as mudanças espectrais observadas por região. Os dados de precipitação foram obtidos a partir de três estações pluviométricas distintas situadas o mais próximo possível do centroide de cada uma das imagens. Foram utilizados dados de totais diários registrados por pluviômetros entre 01/01/2008 e 31/12/2009, disponibilizados pelo sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (Brasil, 2013). A tabela 2.3 apresenta as características gerais das estações pluviométricas utilizadas. Os dados de biomassa utilizados foram gerados a partir de um modelo que relaciona a altura da floresta obtida por sensores remotos com medidas de campo da biomassa (Saatchi et al., 2011). Esses dados são disponibilizados pelo Laboratório de Propulsão de Jatos (Jet Propulsion Laboratory - JPL) da NASA no formato matricial, com resolução espacial de 1 km. As

amostras vetoriais da vegetação nativa foram usadas para extrair o valor médio da biomassa.

**Tabela 2.3.** Estações pluviométricas selecionadas para cada região estudada.

Estado	Código	Nome	Latitude	Longitude	Município	Operador
Bahia	1145020	Fazenda Triunfo	-11,4603	-45,6153	Formosa do Rio Preto	ANA
Minas Gerais	1745001	Cachoeira do Paredão	-17,1111	-45,4378	Pirapora	FURNAS
Mato Grosso	1455011	Fazenda Brasil	-14,6661	-55,4603	Nova Brasilândia	INMET

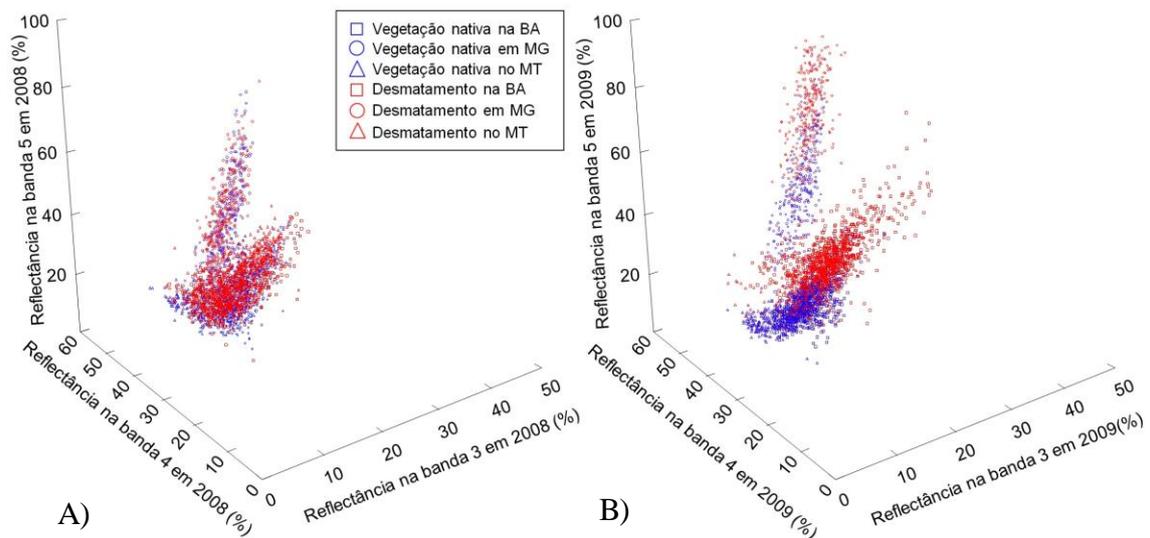
### 2.2.5 Análise estatística

O teste t pareado foi usado para a comparação dos valores médios de reflectância nas bandas 3, 4 e 5 e de NDVI entre as amostras de vegetação nativa e desmatamento no ano de 2009. Para documentar as diferenças regionais nas mudanças espectrais entre as amostras de desmatamento e vegetação nativa nos anos de 2008 (antes do desmatamento) e 2009 (após o desmatamento), foram utilizadas regressões lineares simples. Os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  ajustados para as amostras de vegetação nativa foram utilizados como protocolos das mudanças esperadas para as propriedades espectrais. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram usados para caracterizar os padrões de mudanças nas propriedades espectrais de 2008 para 2009 observado nas amostras de desmatamento em relação às amostras de vegetação nativa. Adicionalmente, equações logarítmicas e exponenciais foram ajustadas para demonstrar a relação entre as propriedades espectrais estudadas e a biomassa.

## **2.3. Resultados**

### **2.3.1 Mudanças espectrais após o desmatamento do Cerrado**

A figura 2.2 (A) demonstra que em 2008, antes da detecção do desmatamento, as amostras de vegetação nativa e desmatamentos identificados em 2009 apresentavam valores similares de reflectância nos comprimentos de onda vermelho (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (banda 5) nas três regiões estudadas. Tal similaridade é evidenciada pela sobreposição das nuvens de pontos vermelhas (desmatamento) e azuis (vegetação nativa) no diagrama de dispersão tridimensional da reflectância nas bandas 3, 4 e 5. Em 2009, no entanto, após a detecção dos polígonos de desmatamento pelo PMDBBS, houve mudança nos valores de reflectância observados para as áreas desmatadas e as amostras de desmatamento se deslocaram em relação às de vegetação nativa (Figura 2.2 - B). Apesar de o deslocamento ter ocorrido ao longo dos três eixos (X, Y e Z), ele foi maior nos eixos X e Y, que correspondem a reflectância nos comprimentos de onda vermelho e infravermelho médio respectivamente. A análise da figura 2.2 permite verificar também que as três regiões estudadas apresentam propriedades espectrais distintas, tanto para as áreas de vegetação nativa, quanto para os polígonos de desmatamento. As diferenças espectrais justificam-se pela alta variabilidade espacial das categorias vegetacionais, pelos diferentes tipos de solos, pela variação espacial da precipitação e pelas diferentes datas das imagens satelitais.

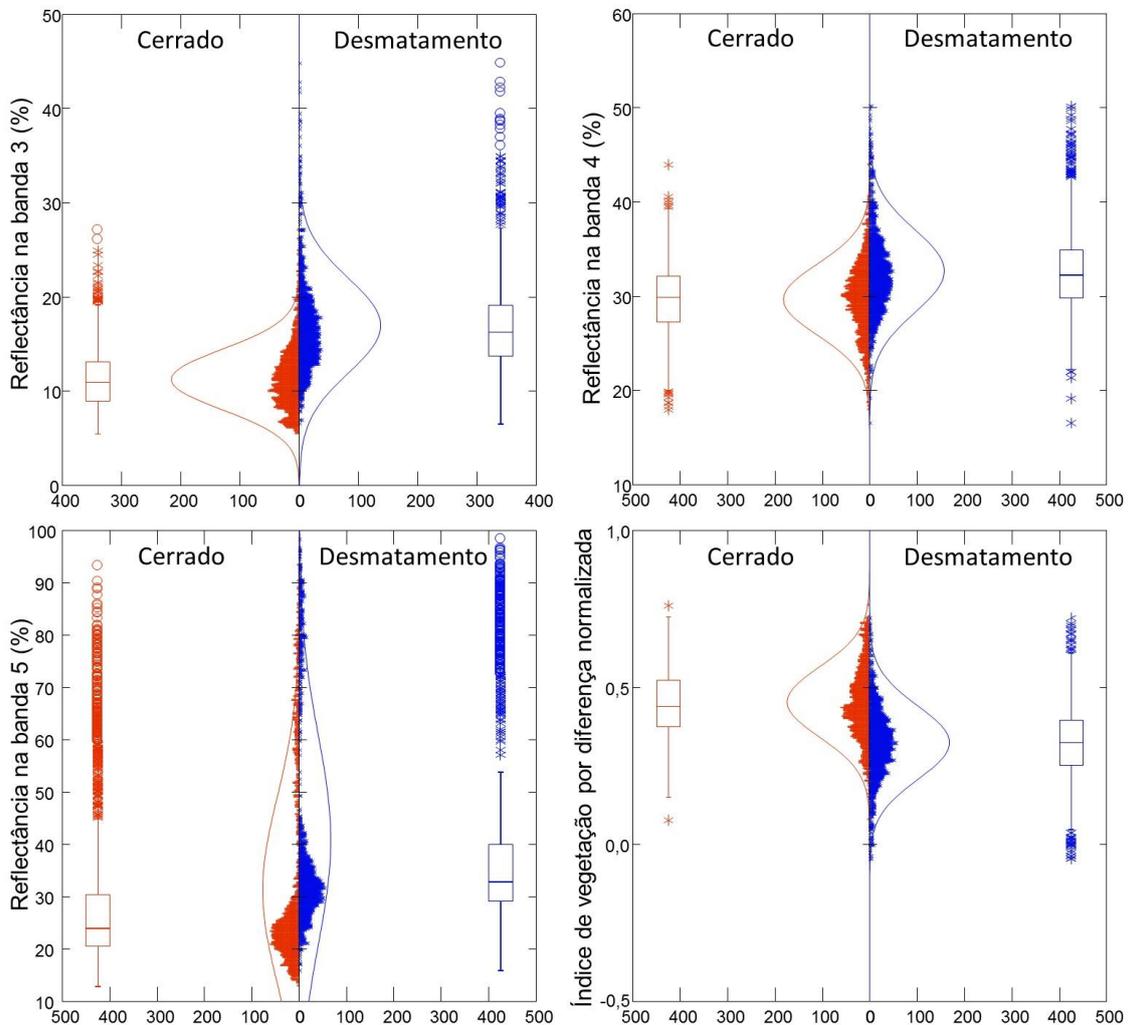


**Figura 2.2.** Diagrama de dispersão tridimensional relacionando as reflectâncias nos comprimentos de onda vermelho (banda 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (banda 5) das unidades amostrais (vegetação nativa e desmatamento) em 2008 (A) e 2009 (B).

De 2008 para 2009, a reflectância média no comprimento de onda vermelho (banda 3) das amostras de desmatamento mudou de  $13,84\% \pm 4,25$  para  $16,98\% \pm 5,00$ , o que representa um aumento médio na reflectância de 22,68%. Em relação ao comprimento de onda infravermelho próximo (banda 4), a reflectância média antes do desmatamento era de  $32,76\% \pm 4,80$  e após o desmatamento passou a ser  $32,69\% \pm 4,39$ . A mudança foi de apenas -0,21%. A reflectância média no comprimento de onda infravermelho de ondas curtas (banda 5) apresentou um aumento de 28,66% após o desmatamento, mudando de  $31,75\% \pm 13,77$  em 2008 para  $40,85\% \pm 19,97$  em 2009. O NDVI médio mudou de  $0,41 \pm 0,12$  para  $0,32 \pm 0,12$  após o desmatamento, o que representa uma redução de 21,74%.

Após o desmatamento, quando comparadas as amostras de desmatamento em relação às testemunhas, verificou-se que na banda 3 a reflectância tornou-se 50,8% superior, sendo  $11,26\% \pm 3,18$  para a vegetação nativa e  $16,98\% \pm 5,00$  para o desmatamento. Já na banda 4 a diferença na reflectância foi de 10,2%, onde a média da

vegetação nativa foi de  $29,67\% \pm 3,78$  e a do desmatamento foi de  $32,69\% \pm 4,40$ . Na banda 5, por sua vez, a reflectância foi 30,6% maior, pois as amostras da vegetação nativa apresentaram média de  $31,27\% \pm 17,7$ , enquanto que para os polígonos de desmatamento foram de  $40,85\% \pm 19,97$ . Como o NDVI médio observado para as amostras testemunhas foi de  $0,45 \pm 0,11$ , enquanto que para os polígonos de desmatamento foi de  $0,32 \pm 0,12$ , a diferença relativa observada foi de -28,6%. A figura 2.3 apresenta na forma gráfica de distribuição essas diferenças espectrais observadas entre a vegetação nativa e o desmatamento.



**Figura 2.3.** Boxplots e curvas de distribuição de frequência comparando as propriedades espectrais entre vegetação nativa e desmatamento no bioma Cerrado.

A análise comparativa das propriedades espectrais (reflectância nos comprimentos de onda vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas e NDVI) das amostras de desmatamento em relação às amostras de vegetação nativa revelou a existência de diferenças estatisticamente significativas pelo teste t pareado para as quatro variáveis estudadas (Tabela 2.4). Após o desmatamento foi observada uma diferença nas médias de reflectância das amostras de 5,7 na banda 3, 3,0 na banda 4 e 9,6 na banda 5. A diferença na média das amostras de NDVI foi de 0,13.

**Tabela 2.4.** Teste t pareado para comparação das propriedades espectrais entre vegetação nativa e desmatamento no bioma Cerrado. GL=grau de liberdade

Variável espectral	GL	Diferença de médias	Intervalo de Confiança 95%	valor-t	valor-p
Reflectância na banda 3	2758	5,726	± 0,313	35,841	0,000
Reflectância na banda 4	2758	3,022	± 0,307	19,359	0,000
Reflectância na banda 5	2758	9,576	± 1,421	13,178	0,000
NDVI	2758	-0,130	± 0,008	-29,725	0,000

### 2.3.2 Mudanças espectrais regionais após o desmatamento no Cerrado

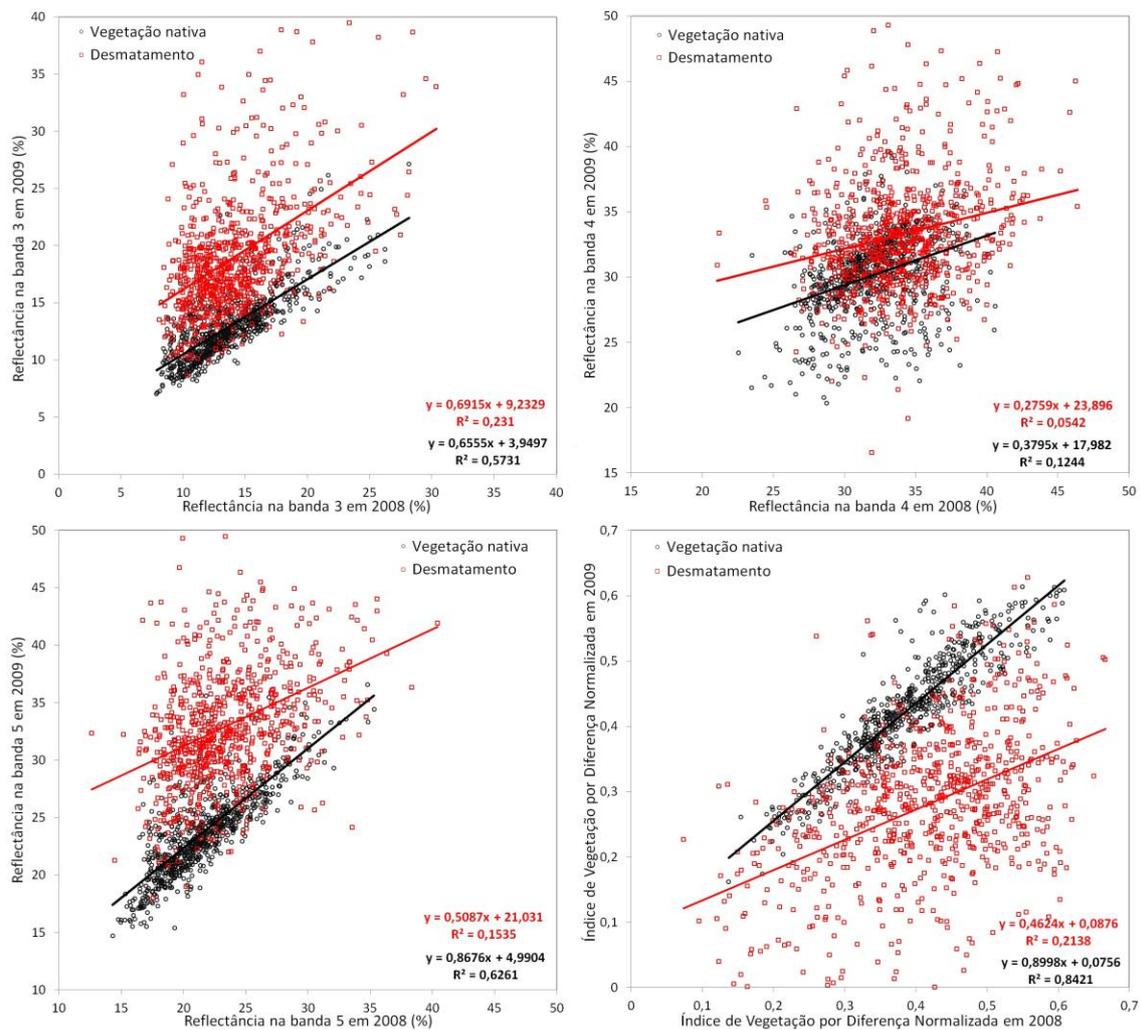
As regressões lineares simples das propriedades espectrais entre 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa demonstram a variação esperada devido à diferença na resposta espectral dos alvos. A figura 2.4 apresenta as regressões lineares simples das propriedades espectrais entre 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado da Bahia. Em relação às amostras de vegetação nativa, pode-se observar a existência de um padrão de linearidade entre as propriedades espectrais de 2008 e 2009. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para a banda 3 foi de 0,573, para a banda 5 foi de 0,626 e para o NDVI foi de 0,842. A regressão para a banda 4, no entanto, apresentou baixo coeficiente de determinação ( $R^2=0,124$ ). Uma possível explicação para isso é o fato da banda 4 ser mais sensível à resposta espectral dos solos

(latossolos) do oeste baiano, que por possuírem um horizonte A arenoso com presença de areia lavada na superfície, potencializam sua resposta espectral. Outro fator que pode ter contribuído é a presença de Floresta estacional decidual submontana (Cs) como uma das principais categorias vegetacionais da região. Esse tipo de vegetação perde as folhas durante a estação seca, tendendo a uma maior variabilidade da resposta espectral.

Os coeficientes lineares indicaram a diferença média das propriedades espectrais observadas em 2009 em relação às de 2008. Verificou-se que os valores do intercepto foram sempre positivos ( $b_0=3,94$  para a banda 3;  $b_0=17,98$  para a banda 4;  $b_0=4,99$  para a banda 5 e  $b_0=0,07$  para o NDVI), o que significa que as reflectâncias de 2009 foram superiores às de 2008. Com relação aos coeficientes angulares, o NDVI e a banda 5 apresentaram os valores mais próximos de 1,0 ( $b_1=0,899$  e  $b_1=0,867$  respectivamente), o que indica um padrão mais consistente na variação linear entre os anos de 2009 e 2008.

A diferença nos ajustes (coeficientes de determinação) e nos coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  entre as amostras de vegetação nativa e desmatamento podem ser usadas para evidenciar as mudanças espectrais regionais após o desmatamento. Considerando as amostras de desmatamento situadas no estado da Bahia, a principal mudança em relação ao comportamento observado para a vegetação nativa foi a perda da linearidade das propriedades espectrais entre 2008 e 2009. O coeficiente  $R^2$  mudou de 0,573 para 0,231 na banda 3, de 0,124 para 0,054 na banda 4, de 0,626 para 0,153 na banda 5 e de 0,842 para 0,213 no NDVI. A justificativa para a perda da linearidade foi o aumento da reflectância em 2009 no caso das bandas 3 e 5. Na banda 3 a reflectância média aumentou 34,35%, passando de 14,15%  $\pm 3,63$  em 2008 para 19,02%  $\pm 5,23$  em 2009. A reflectância na banda 5 aumentou 40,81%, pois em 2008 era de 23,38%  $\pm 3,99$  e em 2009 passou a ser de 32,92%  $\pm 5,18$ . A mudança observada na banda 4 após o

desmatamento, foi a redução de 2,13%, onde os valores médios de reflectância mudaram de 34,00%  $\pm$ 4,33 para 33,27%  $\pm$ 3,66. Em relação ao NDVI, a perda da linearidade se deve à redução dos valores do índice de 2008 para 2009. Enquanto antes do desmatamento (2008) os valores eram de 0,415%  $\pm$ 0,11, depois de desmatadas (em 2009) as amostras sofreram uma redução de 32,67%, com valores médios de 0,279  $\pm$ 0,11.

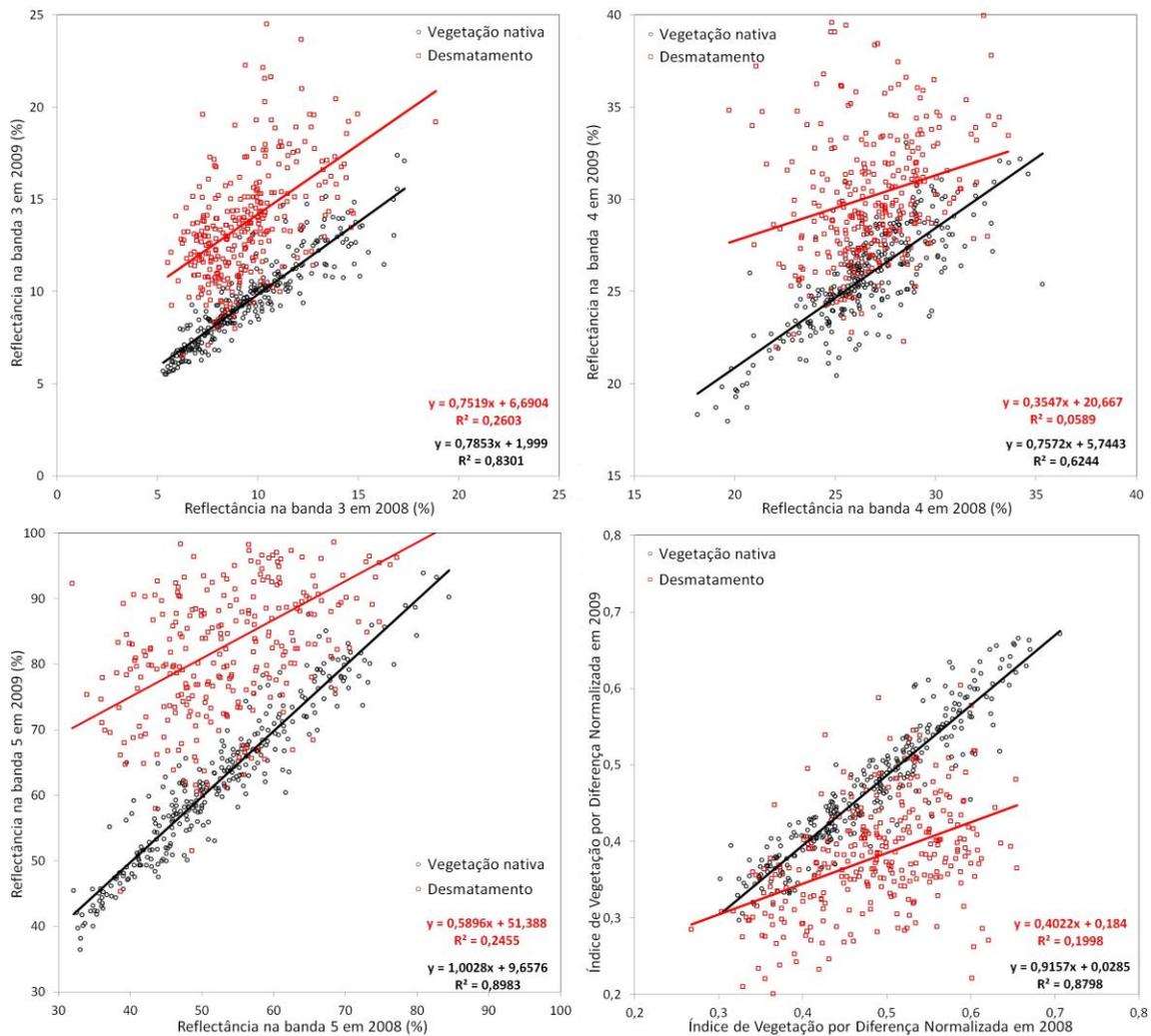


**Figura 2.4.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado da Bahia.

As análises das amostras situadas no estado de Minas Gerais apresentaram padrões similares aos observados na Bahia (Figura 2.5). As regressões construídas para

a análise comparativa das propriedades espectrais entre 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa apresentaram alta linearidade ( $R^2=0,830$  para a reflectância na banda 3,  $R^2=0,624$  para a reflectância na banda 4,  $R^2=0,898$  para a reflectância na banda 5 e  $R^2=0,879$  para o NDVI). Os interceptos (coeficientes  $b_0$ ) obtidos para a vegetação foram também todos positivos ( $b_0=1,99$  para a reflectância na banda 3,  $b_0=5,74$  para a reflectância na banda 4,  $b_0=9,65$  para a reflectância na banda 5 e  $b_0=0,02$  para o NDVI), o que evidencia uma tendência de aumento na resposta espectral das imagens de 2009 em relação a 2008. Os coeficientes angulares ( $b_1$ ) próximos de 1.0 ( $b_1=0,785$  para a reflectância na banda 3,  $b_1=0,757$  para a reflectância na banda 4,  $b_1=1,00$  para a reflectância na banda 5 e  $b_1=0,915$  para o NDVI) demonstram que a variação anual das propriedades espectrais obtidas para a vegetação natural segue tendência proporcional.

Assim como na Bahia, o padrão marcante verificado para as amostras de desmatamento em relação às de vegetação nativa foi a perda da linearidade das propriedades espectrais entre 2009 e 2008. O coeficiente de determinação reduziu 68,6% para a reflectância no comprimento de onda vermelho, 90,5% no infravermelho próximo, 72,6% no infravermelho de ondas curtas e 77,3% no NDVI. A explicação para a perda da linearidade das regressões é o aumento da reflectância e a redução do NDVI após o desmatamento. Em 2008, antes da detecção dos polígonos de desmatamento, a reflectância média na banda 3 era de  $9,38\% \pm 2,10$ . Após o desmatamento passou a ser de  $13,74\% \pm 3,1$ , aumentando 46,4% devido à redução nas atividades fotossintéticas. O aumento verificado na banda 4 foi de 12,39%, passando de  $26,86\% \pm 3,54$  em 2008 para  $30,19\% \pm 2,42$  após a detecção dos desmatamentos. Na banda 5 os valores médios observados antes e após o desmatamento foram de  $54,39\% \pm 9,97$  e  $83,40\% \pm 9,42$ , configurando um aumento de 53,3%. Com relação ao NDVI, houve redução de 21,9%, pois o valor médio obtido em 2008 foi  $0,485 \pm 0,07$ , enquanto em 2009 foi  $0,379 \pm 0,07$ .



**Figura 2.5.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado de Minas Gerais.

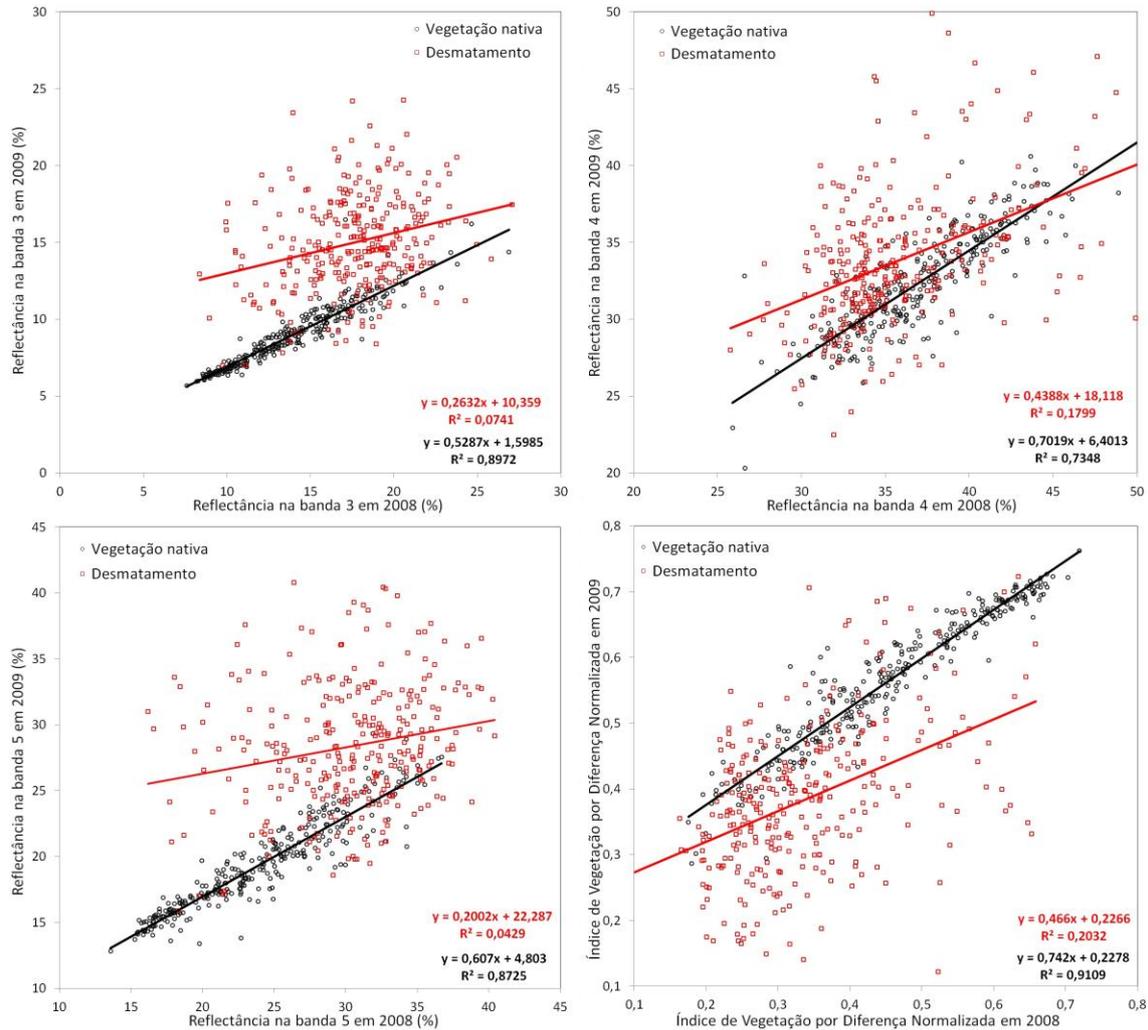
As regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 construídas para as amostras do estado do Mato Grosso, de maneira geral, apresentaram também padrão similar ao observado na Bahia e em Minas Gerais (Figura 2.6). Assim como nas outras regiões, as amostras de vegetação nativa tiveram alta linearidade. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para a banda 3 foi de 0,897, para a banda 4 foi de 0,734, para a banda 5 de 0,872 e para o NDVI foi de 0,910. Os valores dos coeficientes lineares foram todos positivos também ( $b_0=1,59$  para a reflectância na banda 3,  $b_0=3,40$  para a reflectância na banda 4,  $b_0=4,80$  para a reflectância na banda 5 e  $b_0=0,22$  para o NDVI).

Uma notável diferença que chama atenção quando comparado o comportamento espectral das amostras de vegetação nativa do Mato Grosso com aquelas situadas na Bahia e em Minas Gerais, são os coeficientes angulares ( $b_1$ ) das regressões que foram menores no Mato Grosso ( $b_1=0,528$  para a reflectância na banda 3,  $b_1=0,701$  para a reflectância na banda 4,  $b_1=0,607$  para a reflectância na banda 5 e  $b_1=0,742$  para o NDVI). Quanto menor for o coeficiente  $b_1$ , menor é o valor médio esperado para 2009 em relação a 2008, desde que o coeficiente  $b_0$  não seja alto. Isto significa que os valores de reflectância observados na imagem de 2009 para as amostras de vegetação nativa são inferiores aqueles verificados em 2008, diferentemente do que foi observado para os estados da Bahia e Minas Gerais.

A análise das amostras de desmatamento para o Mato Grosso em relação às amostras de vegetação nativa seguiu o mesmo padrão de perda da linearidade das regressões comparando 2008 e 2009. O coeficiente de determinação reduziu 91,7% na banda 3, 75,5% na banda 4, 95,1% na banda 5 e 77,7% no NDVI. No entanto, as mudanças médias de 2008 para 2009 das propriedades espectrais foram bastante diferentes daquelas ocorridas na Bahia e em Minas Gerais. Ainda assim, o padrão de mudança em relação às amostras de vegetação nativa foi mantido.

A reflectância média na banda 3 reduziu 14,8%, pois os valores mudaram de  $17,59\% \pm 3,17$  para  $14,99\% \pm 3,06$ . Na banda 4, a reflectância em 2008 era de  $35,59 \pm 4,39$  passando para  $33,73\% \pm 4,25$  em 2009, ou seja, uma redução de 5,22%. A banda 5 teve redução de 6,43%, pois os valores médios de reflectância antes do desmatamento eram de  $30,30\% \pm 4,85$  e mudaram para  $28,35\% \pm 4,69$  após a detecção do desmatamento. O NDVI aumentou 13,66%, antes do desmatamento o valor médio era de  $0,337 \pm 0,10$ , passando para  $0,384 \pm 0,11$  em 2009. Acredita-se que diferenças observadas nas mudanças das propriedades espectrais de desmatamento entre 2009 e

2008 estejam relacionadas à época do ano em que o segundo imageamento foi realizado e os desmatamentos foram detectados, pois as amostras de vegetação nativa obtiveram padrão semelhante de redução das propriedades espectrais de 2009 em relação a 2008.



**Figura 2.6.** Regressões lineares simples entre as propriedades espectrais em 2008 e 2009 para as amostras de vegetação nativa e desmatamento no estado de Mato Grosso.

A repetição das tendências para as três regiões distintas sugere que o padrão observado é consistente tanto para as amostras de vegetação nativa quanto para os polígonos de desmatamento identificados pelo PMDBBS. Os padrões nas mudanças espectrais do desmatamento em relação a vegetação nativa das três regiões estudadas, que apresentam diferentes atributos ambientais (vegetação, solos e clima), permitem

afirmar que as amostras são representativas para o bioma e que resultados semelhantes são esperados para outras regiões do Cerrado.

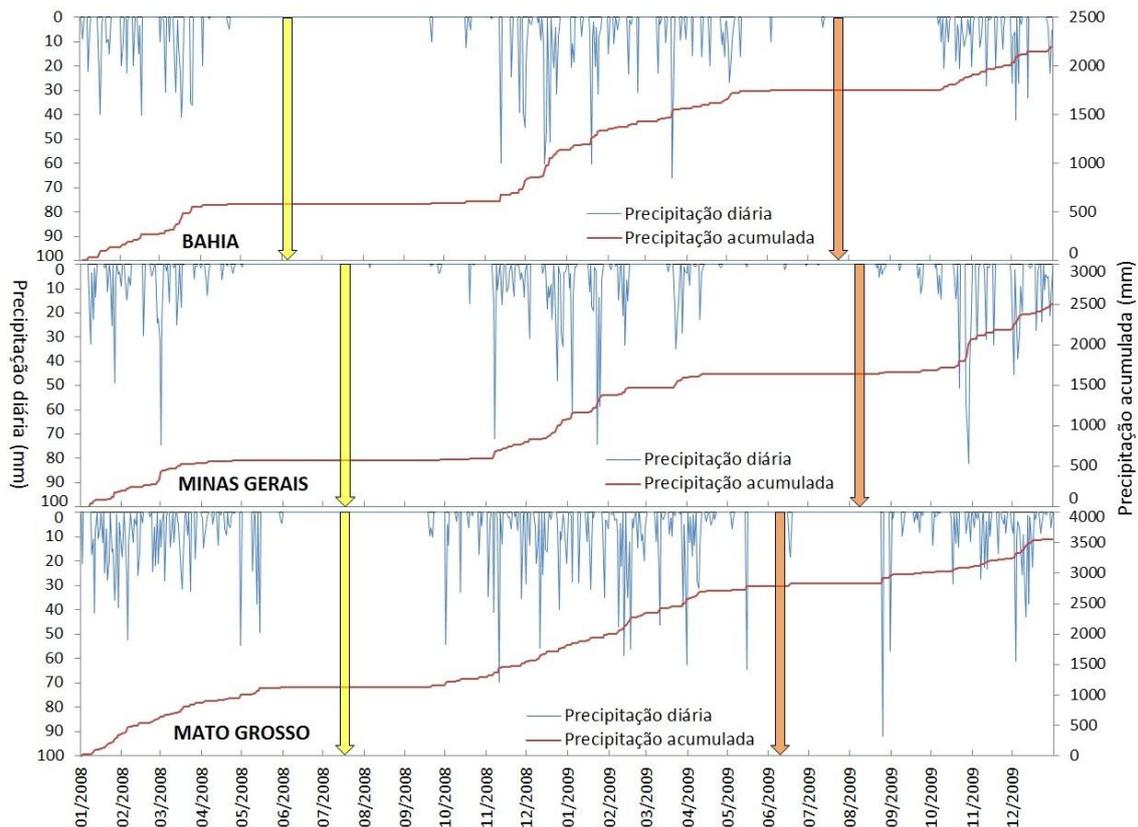
## **2.4. Discussão**

### **2.4.1 Influência da precipitação na variabilidade regional das mudanças espectrais após o desmatamento no Cerrado**

Avaliações das mudanças espectrais sazonais de cinco diferentes fitofisionomias do Cerrado arborizado demonstraram que no fim da estação chuvosa o contraste entre as categorias vegetacionais é mínimo, enquanto que no fim da estação seca, estas diferenças assumem valores máximos (Lieseberg et al., 2007). Portanto, a variação sazonal e regional das propriedades espectrais é esperada no meio biótico, pois apesar da reflectância e do NDVI estarem livres da interferência atmosférica, os alvos vegetacionais carregam um efeito memória que é diretamente relacionado ao clima. Estudos relacionando variáveis climática com índices de vegetação demonstraram a correlação destes dados (Ichii et al., 2002; Foddy et al., 2003), pois principalmente a precipitação e a temperatura têm influência direta no crescimento e vigor da vegetação (Song & Ma, 2011). Dessa forma, como o Cerrado apresenta sazonalidade marcada, com estações seca e chuvosa bem definidas, o vigor da vegetação tende a acompanhar a flutuação anual da precipitação e este sinal influencia a resposta espectral (Ferreira & Huete, 2004). Portanto, neste estudo, os coeficientes angulares e lineares das regressões entre a resposta espectral da vegetação nativa podem ser interpretados para demonstrar essas diferenças.

A menor linearidade das regressões entre as propriedades espectrais de 2008 e 2009 para as amostras de vegetação da Bahia em relação a Minas Gerais e Mato Grosso tem influência da diferença de tempo entre a imagem de 2008 e 2009. Enquanto a

imagem de 2009 de Minas Gerais foi obtida 19 dias após a mesma data do ano anterior e a imagem do Mato Grosso foi obtida 36 dias antes, na Bahia a imagem foi obtida 51 dias depois. Como a sazonalidade da precipitação do Cerrado é bem definida, a comparação de imagens de diferentes épocas do ano, com pluviosidades distintas, tem elevado potencial de mudança na resposta espectral da vegetação (Figura 2.7).



**Figura 2.7.** Influência da precipitação diária e acumulada na data de aquisição das imagens Landsat TM na Bahia, Minas Gerais e Mato Grosso. A seta amarela indica a data da imagem anterior ao desmatamento (2008), enquanto a seta laranja corresponde a data em que os polígonos de desmatamento foram detectados (2009).

Enquanto nas três regiões estudadas as imagens de 2008 foram obtidas próximo ao meio da estação seca, para 2009 a imagem da Bahia corresponde ao meio da estação seca, a de Minas Gerais ao fim da estação seca e a do Mato Grosso ao fim da estação chuvosa. Estas diferenças justificam parte da variabilidade na resposta observada entre as regiões estudadas. Quando a imagem de 2009 foi obtida a região da Bahia estava 54

dias sem chuvas de pelo menos 10 mm, Minas Gerais estava 117 dias e o Mato Grosso 27 dias sem chuvas dessa mesma proporção. As diferenças observadas nos coeficientes  $b_0$  e  $b_1$ , que indicam como as propriedades espectrais de 2009 variam em relação às aquelas observadas em 2008 também são explicadas pela sazonalidade do bioma. Principalmente no Mato Grosso, onde as imagens de 2008 e 2009 foram obtidas em épocas distintas considerando o ciclo sazonal da precipitação, a diferença observada nos coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  foi superior.

Estudos demonstram que a reflectância de uma mesma fitofisionomia do Cerrado é menor na estação chuvosa do que na estação seca (Ferreira et al., 2003; Liesenberg et al., 2007). Isto justifica a redução dos valores de reflectância e aumento do NDVI verificados para o Mato Grosso em 2009 quando comparadas a 2008. Por esta razão, para fins de monitoramento do desmatamento, é importante ter uma estratégia para o controle da variabilidade sazonal da resposta espectral da vegetação do Cerrado. Neste estudo, as amostras de vegetação nativa foram utilizadas como testemunhas com a finalidade de controlar tal variação. Dessa forma, foi possível avaliar as mudanças espectrais oriundas do desmatamento em função da vegetação natural. Se esta estratégia não tivesse sido empregada, as mudanças espectrais devido a sazonalidade teriam mascarado aquelas advindas do desmatamento no estado do Mato Grosso.

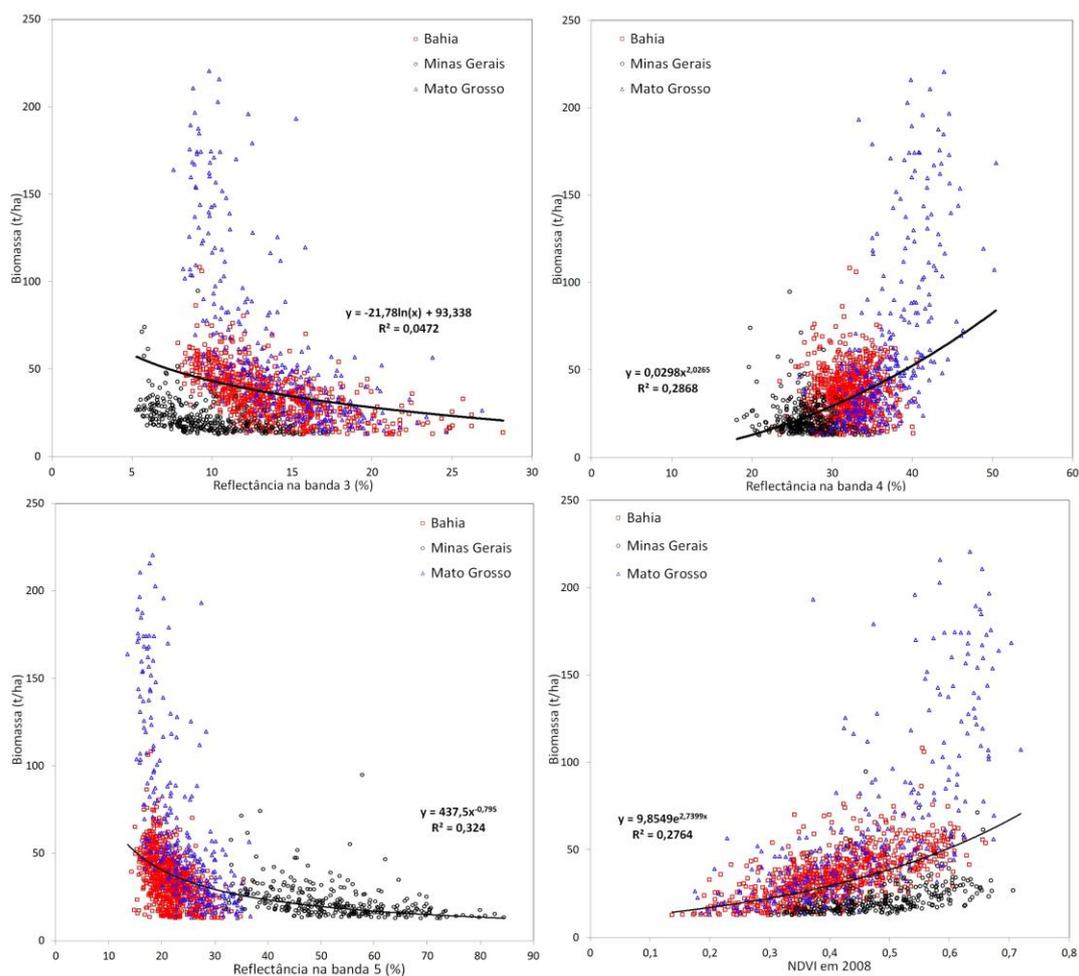
#### **2.4.2 Influência da biomassa na variabilidade regional das mudanças espectrais após o desmatamento no Cerrado**

A composição florística do Cerrado apresenta elevada heterogeneidade dentro do bioma, o que contribui para a diversidade  $\beta$ . Um estudo analisando a similaridade florística entre seis províncias fitogeográficas demonstrou que apesar da alta similaridade florística das espécies dominantes a nível local, em nível regional há alta

variação da composição de espécies, principalmente daquelas menos comuns (Bridgewater et al., 2004). Portanto, assim como a precipitação, a composição florística tem elevado potencial de influência sobre a resposta espectral observada para as diferentes regiões do bioma, sendo responsável por grande parte da heterogeneidade na resposta espectral observada entre regiões e dentro de uma única região. Considerando que as regiões selecionadas para o estudo abrangeram três regiões fitogeográficas distintas (Província Nordeste, Província Central e sudeste e Província Centro-Oeste) a variabilidade entre as regiões estudadas já era esperada, pois as espécies vegetais detêm diferenças em suas assinaturas espectrais (Asner, 1998). As diferenças na composição florística proporcionam também elevada variabilidade espacial na biomassa da vegetação (Ribeiro et al., 2011) e matéria orgânica dos solos (Batlle-Bayer et al., 2010; Mendes et al., 2012) do Cerrado, apresentando, dessa forma, grande potencial de interferência na resposta espectral dos alvos (Asner, 1998). Por esta razão, estudos recentes vêm demonstrando que é possível identificar variações de tipologias de savanas usando propriedades espectrais da vegetação obtidas por sensoriamento remoto (Hills et al., 2011), bem como distinguir áreas campestres de cultivadas (Galford et al., 2008; Brown et al., 2013).

Como as regiões estudadas estão em diferentes províncias fitogeográficas do Cerrado e detêm elevada variação de fitofisionomias, a biomassa também é bastante diferente dentro e entre as regiões. Com o intuito de demonstrar estas diferenças, as unidades amostrais de vegetação nativa foram usadas para extrair os valores de um mapa de biomassa para a região tropical construído a partir de dados de altura da vegetação e medidas de campo (Saatchi et al., 2011). A figura 2.8 demonstra a relação entre as propriedades espectrais da vegetação nativa e os valores de biomassa destes ecossistemas. Em relação à biomassa das amostras de vegetação estudadas, em primeiro

plano é importante apontar a existência de um gradiente não linear de biomassa de Minas Gerais (menores valores) para o Mato Grosso (maiores valores) considerando a variabilidade inter-regional. Em relação a variabilidade intra-regional, a região do Mato Grosso foi a que apresentou maior amplitude de variação da biomassa, com as amostras de vegetação apresentando uma variação de 12,9 a 220,4 t.ha<sup>-1</sup>. Considerando a relação do padrão espectral de reflectância da vegetação com a biomassa, verifica-se que as reflectâncias nas bandas 3 e 5 apresentam comportamento inversamente proporcional a biomassa, ao passo que a reflectância na banda 4 e o NDVI são proporcionais a biomassa.



**Figura 2.8.** Modelos matemáticos logarítmicos e exponenciais da relação entre a biomassa das amostras de vegetação nativa e as propriedades espectrais.

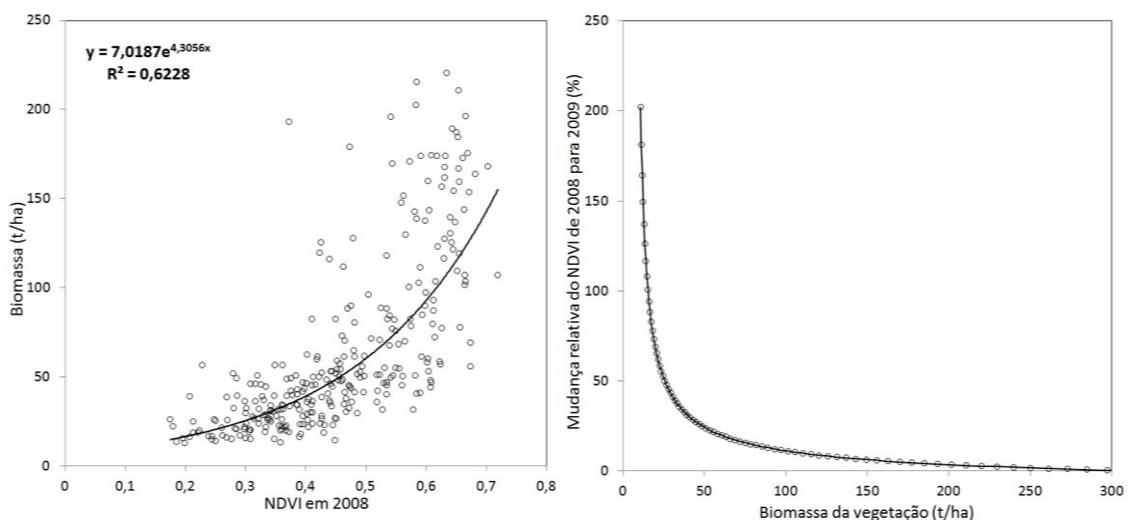
A reflectância, neste caso, tende a ser inversamente proporcional ao índice de área foliar (IAF) (Asner et al., 1998). O IAF, por sua vez, é proporcional a biomassa, contudo, em florestas tropicais, ocorre saturação. Esta situação é agravada em florestas secundárias, que tendem a apresentar composição de espécies de estágios sucessionais iniciais, com menor estratificação vertical, formando um único estrato com alta competição por luminosidade, assumindo valores máximos de IAF.

Dentre as variáveis espectrais estudadas, aquela que apresentou melhor ajuste do modelo matemático foi a reflectância na banda 5 ( $R^2=0,32$ ).

O consumo de água nos ecossistemas do Cerrado varia de acordo com a densidade da vegetação e umidade disponível nos solos (Giambelluca et al., 2009). A partir da elevada variação na resposta espectral das amostras de vegetação nativa do Mato Grosso nos períodos seco (2008) e chuvoso (2009), foi possível derivar uma relação entre mudança espectral observada entre 2008 e 2009, considerando a diferença na umidade disponível e a biomassa da vegetação. Dessa forma, a equação linear apresentada na figura 2.6 ajustada para a mudança do NDVI de 2008 para 2009 ( $R^2=0,911$ ) e a equação ajustada para a relação entre o NDVI em 2008 e a biomassa ( $R^2=0,622$ ) foi usada para demonstrar a sensibilidade espectral da vegetação em função da biomassa (Figura 2.9). Verifica-se que quanto menor a biomassa da vegetação maior a variação relativa da reflectância entre os períodos seco e chuvoso. Comportamento similar a este já havia sido documentado no Cerrado, onde diferenças significativas na resposta espectral da vegetação entre a estação seca e chuvosa foram demonstradas (Ferreira & Huete, 2004). Outro estudo avaliando a variação sazonal da resposta espectral de categorias de vegetação do Cerrado arbóreo demonstrou que a amplitude de variação da resposta espectral é inversamente proporcional a densidade de árvores, onde

as matas de galeria tendem a uma menor oscilação quando comparadas as savanas arborizadas (Liesenberg et al., 2007).

Foi observada variação de até 200% para as amostras de vegetação com pouca biomassa (formações campestres), enquanto que amostras com maior biomassa (formações florestais) tiveram variação quase nula. A curva modelada demonstra claramente um ponto de inflexão para amostras de vegetação com biomassa entre 40 e 50 t.ha<sup>-1</sup>, onde a mudança do NDVI assume comportamento diferenciado. Enquanto as amostras acima do ponto de inflexão vão reduzindo gradativamente a sensibilidade à umidade com tendência quase linear, abaixo do ponto de inflexão, à medida que a biomassa é reduzida, a sensibilidade espectral as mudanças na umidade disponível aumenta exponencialmente.



**Figura 2.9.** Derivação da relação da mudança relativa do NDVI de 2009 em relação a 2008 em função da biomassa da vegetação comparando as amostras de vegetação natural em período seco (2008) e período chuvoso (2009) no Mato Grosso.

## 2.5 Conclusões e recomendações

O estudo demonstrou as mudanças espectrais causadas pelo desmatamento no Cerrado e sua variabilidade entre diferentes regiões e dentro das regiões estudadas. Além disso, foi evidenciada a influência da época em que a imagem foi obtida nas

propriedades espectrais da vegetação e nos padrões de mudanças da resposta espectral após o desmatamento. Dentre as bandas espectrais utilizadas, a banda 4 foi a menos sensível as mudanças após o desmatamento, não sendo recomendada, portanto para a discriminação de desmatamentos no Cerrado. O estudo mostrou também que a intensidade de mudança espectral tende a ser proporcional à biomassa da vegetação suprimida e derivou uma relação entre a susceptibilidade da vegetação nativa às mudanças devido à umidade de acordo com a biomassa da vegetação remanescente.

As diferentes tipologias vegetais e padrões climatológicos observados no Cerrado proporcionam elevada variabilidade espectral, o que dificulta as parametrizações para fins de interpretação do desmatamento e automação de procedimentos para a classificação de áreas desmatadas.

É importante que estudos futuros avaliem também a influência do ângulo de visada na mudança da resposta espectral das áreas desmatadas, visto que estudos anteriores demonstraram que esta característica influencia a resposta espectral dos alvos do Cerrado. Estudos realizados pelos grupos do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE) e da Universidade Federal de Goiás (UFG) já haviam demonstrado alguns aspectos mencionados neste estudo. Cabe ressaltar que este estudo não pretendeu repetir o que foi realizado, visto que além de trazer novas estratégias de abordagem para as questões, buscou avaliar espectralmente o monitoramento periódico que vem sendo realizado no Cerrado pelo PMDBBS.

Para aperfeiçoamentos operacionais do monitoramento do desmatamento do Cerrado a partir dos resultados obtidos neste estudo recomenda-se, primeiramente, a seleção de imagens na época da seca, onde o contraste entre as fitofisionomias é maximizado. Outra alternativa para minimizar variações da sazonalidade seria a normalização por imagem de referência da época seca. Considerando que o Centro de

Sensoriamento Remoto do IBAMA detém softwares de processamento de imagens, recomenda-se também a conversão de número digital dos pixels para radiância no topo da atmosfera e em seguida a conversão para reflectância aparente, visto que tal procedimento é de fácil operacionalização. Assim, os interpretes poderão se basear em propriedades físicas, ao invés de trabalhar com o brilho dos alvos, o que possibilita a parametrização das mudanças para as diferentes regiões fitogeográficas e fitofisionomias do Cerrado. Dessa forma, os intérpretes poderão fundamentar a tomada de decisão da ocorrência do desmatamento na mudança das propriedades espectrais da vegetação e poderão usar os limiares estabelecidos neste estudo e gerar novas parametrizações para outras regiões. A substituição da banda 4 pela banda 7 provavelmente potencializaria a identificação dos desmatamentos pelos interpretes, pois foi demonstrado que a banda 4 não discrimina bem os desmatamentos no Cerrado. Portanto, recomenda-se a utilização da composição colorida 357 (RGB) em substituição a composição 345. Por último, é importante que sejam observadas a variabilidade regional da vegetação, da biomassa e da precipitação antes de extrapolar os resultados obtidos para as demais regiões do Cerrado.

## **2.6 Referencias bibliográficas**

- Asner, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 64, p. 234-253, 1998.
- Battle-Bayer, L. Batjes, N.H., Bindraban, P.S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n.137, p. 47-58, 2010.
- Bernoux, M., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Neto, M.S., Metay, A., Perrin, A.-S., Scopel, E., Razafimbelo, T., Blavet, D., Piccolo, M.D.C., Pavei, M., Milne, E. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. **Agronomy for Sustainable Development**, n.26, p. 1-8, 2006.

- Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2007. Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado – Relatório Final. MMA, Brasília. <[http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documentos/relatorio\\_final.pdf](http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documentos/relatorio_final.pdf)> (Acessado em 13 de janeiro de 2013).
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2009. Relatório técnico de monitoramento do desmatamento no bioma Cerrado, 2002–2008: dados revisados. MMA, Brasília. <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/\\_arquivos/relatorio\\_tecnico\\_monitoramento\\_desmate\\_bioma\\_cerrado\\_csr\\_ibama\\_2002\\_2008\\_rev\\_72.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_monitoramento_desmate_bioma_cerrado_csr_ibama_2002_2008_rev_72.pdf)> (Acessado em 13 de julho de 2012).
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente, 2013. Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB. Agência Nacional de Águas – ANA. <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> (Acessado em 11 de novembro de 2012).
- Bridgewater, S., Ratter, J.A., Ribeiro, J.F. Biogeographic patterns,  $\beta$ -diversity and dominance in the cerrado biome of Brazil. **Biodiversity and Conservation**, V. 13, p. 2295-2318, 2004.
- Brown, J.C., Kastens, J.H., Coutinho, A.C., Victoria, D.C., Bishop, C.R. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. **Remote Sensing of Environment**, n. 130, p. 39-50, 2013.
- Butler, A., Meir, P., Saiz, G., Maracahipes, L., Marimon, B.S., Grace, J. Annual variation in soil respiration and its component parts in two structurally contrasting woody savannas in Central Brazil. **Plant Soil**, n. 352, p.129–142, 2012.
- De Castro, E.A., Kauffman, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal of Tropical Ecology**, n.14, p.263–283, 1998.
- Eva, H.D., Belward, A. S., Miranda, E.E., Di Bella, C.M., Gond, V., Huber, O., Jones, S., Sgrenzaroli, M., Fritz, S. 2004. A land cover map of South America. **Global Change Biology**, v. 10, p. 731-744.
- Ferreira, L.G., Yoshioka, H., Huete, A., Sano, E.E. Seasonal landscape and spectral vegetation dynamics in the Brazilian Cerrado: an analysis within the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, n.87, p.534-550, 2003.
- Ferreira, L. G., Huete, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, n. 25, p. 1837–1860, 2004.

- Foody, G.M., Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: An example focused on the NDVI-rainfall relationship. **Remote Sensing of Environment**, n.88, p. 283–293, 2003.
- Furley, P.A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, n. 8, p. 223–241, 1999.
- Galford, G. L., Mustard, J. F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n.112, p. 576–587, 2008.
- Giambelluca, T.W., Scholz, F.G., Bucci, S.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Franco, A.C., Buchert, M.P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agriculture and Forest Meteorology**, n.149, p.1365–1376, 2009.
- Hill, M.J., Román, M.O., Schaaf, C.B, Hutley, L. Brannstrom, C., Etter, A., Hanan, N.P. Characterizing vegetation cover in global savannas with an annual foliage clumping index derived from the MODIS BRDF product. **Remote Sensing of Environment**, n. 115, p. 2008-2024. 2011.
- Huete, A, Liu, H. Q., Batchily, K., Leween, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440–451, 1997.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013. Projeto PRODES - Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite . <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>> (Acessado em 11 de dezembro de 2012).
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Mapa de biomas do Brasil. Escala 1:5.000.000. <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>> (Acessado em 15 de dezembro de 2012).
- Ichii, K., Kawabata, A., Yamaguchi, Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990. **International Journal of Remote Sensing**, n. 23, p. 3873–3878, 2002.

- Jepson, W. A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in the Brazilian savanna. **The Geographical Journal**, v. 171, n. 2, p. 99-111, 2005.
- Jepson, W., Brannstrom, C., Filippi, A. Access Regimes and Regional Land Change in the Brazilian Cerrado, 1972–2002. **Annals of the Association of American Geographers**, n. 100, pp. 87–111, 2010.
- Liesenbergh, V., Galvão, L.S., Ponzoni, F.J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, n.107, p. 276-286, 2007.
- Mendes, I.C., Fernandes, M.F., Chaer, G.M., Junior, F.B.R. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant Soil**, n. 359, p. 183-195. 2012.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Fonseca, G.A.B., Kent, J., Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, n. 403, p. 853-858. 2000.
- Oliveira-Filho, A. T., and J. A. Ratter. Vegetation physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In: Oliveira, P.S., Marquis, R.J. (eds) *The cerrados of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna*, p.91–120. New York: Columbia University Press. 2002.
- Philippi, A. M., Brannstrom, C., Dobрева, I., Cairns, D. M., Kim, D. Unsupervised fuzzy ARTMAOP classification of hyperspectral Hyperion data for savanna and agriculture discrimination in the Brazilian cerrado. **GIScience & Remote Sensing**, n.46, p.1–23, 2009.
- Rada, N. Assessing Brazil's Cerrado agricultural miracle. **Food Policy**, n. 38, p.146–155, 2013.
- Ratana, P., Huete, A. R., & Ferreira, L. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal–temporal domain. **Earth Interactions**, n. 9, p.1–22, 2005.
- Ratter, J.A., Ribeiro, J.F., Bridgewater, S. The Brazilian Cerrado Vegetation and Threats to its Biodiversity. **Annals of Botany**, n.80, p. 223-230. 1997.
- Ribeiro, S.C., Fehrmann, Soares, P.B.S., Jacovine, L.A.G., Klein, C., Gaspar, R.O. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, n.262, p.491-499, 2011.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M.,

- Morel, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 108, p. 9899-9904, 2011.
- Simon, M.F., Grether, R., Queiroz, L.P., Skema, C., Pennington, R.T., Hughes, C.E. Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 106, p. 20359-20364, 2009.
- Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L. S., Ferreira, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.
- Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L., Ferreira, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 113-124, 2009.
- Sano, E.E., Barcellos, A.O., Bezerra, H.S. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. **Pasturas Tropicales**, v. 22, n.3, p. 2-15, 2001.
- Sano, E.E., Santos, C.C.M., Silva, E.M., Chaves, J.M. . Fronteira agrícola do oeste baiano: considerações sobre os aspectos temporais e ambientais. **Geociências**, v. 30, p. 479-489, 2011.
- Silva, J. F., Farinas, M. R., Felfili, J.M., Klink, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, n.33, p.536-48. 2006.
- Silva, J. M. C., Bates, J. M. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A tropical savanna hotspot. **Bioscience**, n. 52, p.225-34. 2002.
- Song, Y., Ma, M. A statistical analysis of the relationship between climatic factors and the Normalized Difference Vegetation Index in China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 3947-3965, 2011.

## CAPÍTULO III

---

### **Análise comparativa de propriedades espectrais da vegetação por categoria territorial nos estados do Pará e do Mato Grosso**

#### **3.1 Introdução**

Diversos fatores vêm sendo relacionados com o aumento da probabilidade de ocorrência de desmatamento na Amazônia. Entre eles, a acessibilidade, a fertilidade dos solos, a aptidão para mecanização, a disponibilidade de recursos florestais madeireiros, bem como os aspectos culturais dos colonos são apontados como os principais requisitos para ocorrência do desmatamento na Amazônia. Alguns destes requisitos vêm sendo, inclusive, utilizados como variáveis preditoras para a modelagem de cenários futuros e padrões de desmatamento (Soares Filho et al., 2006; Aguiar et al., 2007; Trancoso et al., 2007).

Entretanto, as diferenças na legislação que regulam as categorias territoriais do Brasil e a efetividade do monitoramento e fiscalização do território pelos órgãos competentes também são fatores que vêm sendo apontados como determinantes para a ocorrência de desmatamento, pois possibilitam diferentes níveis de restrição ao uso do território. As Terras Indígenas (TIs), por exemplo, são reguladas pela Política Nacional de Gestão Ambiental e Territorial de Terras Indígenas – PNGATI (Decreto N° 7747/2012). As TIs são destinadas ao usufruto das populações indígenas, não sendo permitida a ocupação por não índios. A Fundação Nacional do Índio (FUNAI) é responsável pela fiscalização das TIs. As Unidades de Conservação (UCs), por sua vez, são reguladas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Lei N° 9985/2000). O SNUC detém doze categorias de áreas protegidas, onde cinco delas são consideradas de Proteção Integral e sete de Uso Sustentável. Enquanto nas UCs de Proteção integral não é permitido o uso direto de seus recursos naturais pelas

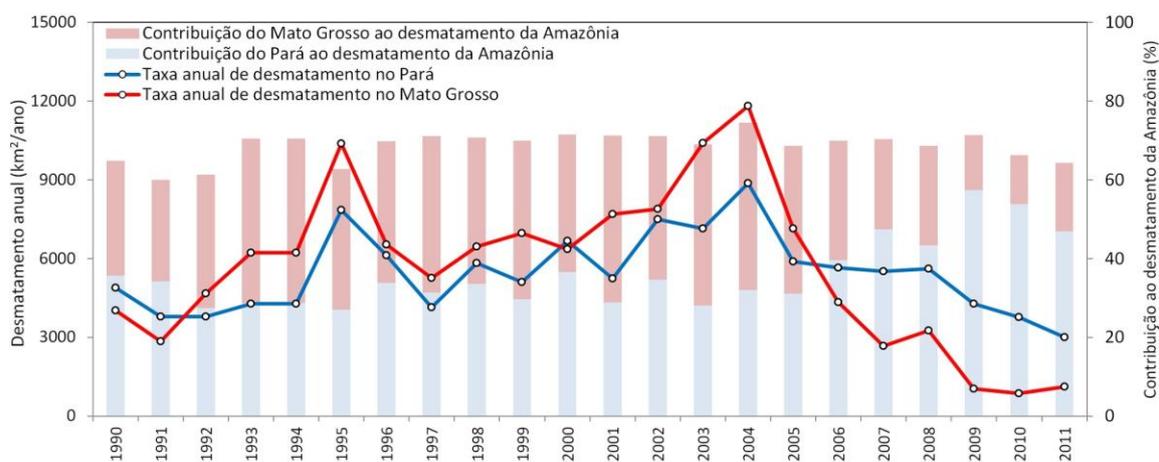
populações humanas, as UCs de Uso Sustentável buscam compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de seus recursos naturais. O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) é o órgão encarregado de fiscalizar as UCs. O Código Florestal brasileiro (Lei N° 4775/1965) regula as áreas privadas (propriedades rurais) estabelecendo o percentual máximo de conversão da vegetação nativa em áreas de uso alternativo do solo e restringindo a remoção da vegetação nativa nas margens de rios, áreas declivosas e topos de morros. A fiscalização das propriedades rurais é encargo das Secretarias Estaduais de Meio Ambiente (SEMAs) e do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

A cobertura da terra nas categorias territoriais, portanto, é resultante tanto dos instrumentos legais, quanto da operacionalização da fiscalização pelo órgão competente. Estudos comparativos entre o nível de proteção exercido pelas áreas protegidas demonstraram que, na Amazônia, as Terras Indígenas e Parques Nacionais apresentam as menores taxas de desmatamento e incêndios florestais (Nepstad et al., 2006a) e que a incidência de focos de calor em Terras Indígenas é inferior quando comparada ao exterior (Trancoso et al., 2011).

Existem diversos indicadores para a avaliação quantitativa da vegetação. As estratégias para obtenção variam desde métodos de campo, como os inventários florestais até métodos remotos, obtidos por intermédio do processamento de imagens de satélite, como os índices de vegetação. Os índices de vegetação foram propostos para a melhoria do sinal refletido pela vegetação a partir da resposta espectral de dois ou mais comprimentos de onda combinados, normalmente nas regiões dos comprimentos de onda vermelho (0,6 - 0,7 $\mu$ m) e infravermelho próximo (0,7 - 1,1 $\mu$ m). Dessa forma, a diferença entre as respostas aos comprimentos de onda vermelho e infravermelho próximo, é uma medida adimensional relacionada com a densidade da vegetação.

Assim, em regiões com vegetação densa o contraste entre as respostas da radiação eletromagnética nas regiões do vermelho e infravermelho próximo é alto, e quando não há vegetação o contraste é baixo, pois não há absorção da radiação no vermelho pelos pigmentos fotossinteticamente ativos (Huete et al., 1997).

Historicamente, os estados do Pará e Mato Grosso totalizam o maior percentual de desmatamento realizado na Amazônia Legal (INPE, 2012). Entre 1988 e 2011, a contribuição média do Pará ao desmatamento da Amazônia foi de 35,6%, ao passo que a do Mato Grosso foi de 32,4%. Juntos, estes estados contribuíram com 68,0% do desmatamento da Amazônia neste período. Em 2011 a taxa de desmatamento anual no Pará foi de 3008 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup>, o que correspondeu a 46,9% do total observado na Amazônia. No Mato Grosso, a taxa de desmatamento anual em 2011 foi de 1120 km<sup>2</sup>.ano<sup>-1</sup> ou 17,4% do desmatamento da Amazônia Legal (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Série histórica da taxa anual de desmatamento nos estados do Pará e Mato Grosso e contribuição relativa destes estados ao desmatamento da Amazônia. Fonte: INPE (2012)

O objetivo deste capítulo é analisar de forma comparativa os indicadores espectrais obtidos a partir de imagens MODIS (índice de vegetação por diferença normalizada - NDVI, índice de vegetação realçado - EVI e reflectância no comprimento

de onda do infravermelho médio - MIR) nas principais categorias territoriais (Terras Indígenas, Unidades de Conservação de Proteção Integral, Unidades de Conservação de Uso Sustentável e Propriedades Rurais) dos estados do Mato Grosso e Pará.

## **3.2 Metodologia**

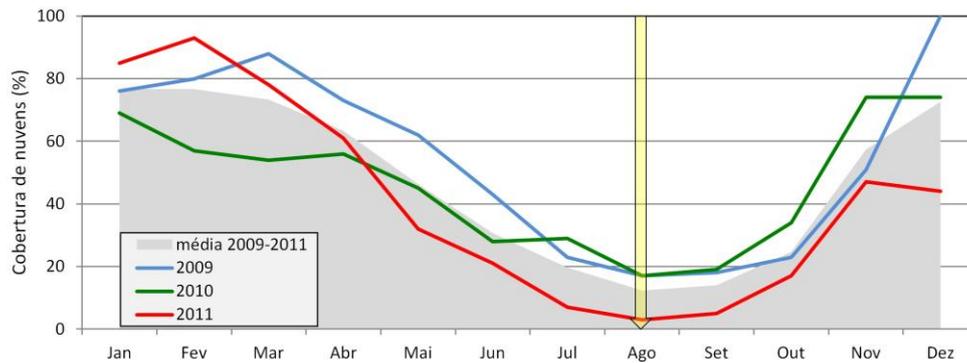
### **3.2.1 Área de estudo**

Os estados do Pará e Mato Grosso foram selecionados para o estudo, devido ao fato de historicamente virem contribuindo com a maior parte do desmatamento da Amazônia.

### **3.2.2 Obtenção das imagens índices de vegetação e reflectância no infravermelho médio**

Para a seleção da data da imagem, três critérios foram considerados: (i) imagem mais recente possível; (ii) ausência ou baixa cobertura de nuvens e (iii) máximo vigor da vegetação. Para avaliar a época com a menor cobertura de nuvens da Amazônia, foram utilizados mapas mensais de cobertura de nuvens para a Amazônia (INPE, 2012) e o percentual mensal de cobertura de nuvens foi calculado para os três últimos anos. A figura 3.2 demonstra a variação sazonal da cobertura de nuvens na Amazônia.

Considerando a cobertura de nuvens média da Amazônia, o mês de agosto foi selecionado para o estudo por apresentar a menor cobertura média de nuvens ao longo do ano (12,3%). Como agosto é o pico da estação seca na Amazônia, a vegetação atinge o vigor máximo devido à maior quantidade de luz que recebe (Huete et al., 2006; Kim et al., 2012).



**Figura 3.2.** Variação sazonal da cobertura de nuvens média da Amazônia no período entre janeiro de 2009 e dezembro de 2011 e cobertura média de nuvens no período considerado. A seta amarela indica o mês com menor cobertura de nuvens.

O sensor MODIS vem sendo utilizado para várias aplicações que envolve sensoriamento remoto para análise de extensas áreas e que requeiram alta resolução temporal no Brasil e no mundo (Justice et al., 1998; Huete et al., 2002; Rudorff et al., 2007) O produto MOD13Q1, desenvolvido pelo Laboratório de índices de vegetação e fenologia da Universidade do Arizona – EUA, foi selecionado para o estudo. O MOD13Q1 disponibiliza imagens índices de vegetação, reflectâncias e valores de ângulos zenitais e azimutais. São disponibilizadas composições a cada 16 dias, com resolução espacial de 250 metros. Para cada janela de 16 dias são utilizadas entre 16 e 64 imagens para compor uma única imagem livre de nuvens e com mínima contaminação atmosférica residual (Solano et al., 2010). O intervalo selecionado para a composição de 16 dias foi de 27/07/2012 a 11/08/2012. Para a cobertura da área de estudo foram necessários sete *tiles*. Foram utilizados o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de vegetação realçado (EVI) e a reflectância no comprimento de onda do infravermelho médio (MIR). Para cada uma dessas imagens foi construído um mosaico, que em seguida, foi recortado usando uma máscara da área de estudo.

O NDVI é obtido pela equação 1.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Onde: NIR = reflectância no infravermelho próximo;  
RED = reflectância no vermelho.

O EVI tem como objetivo a atenuação dos efeitos do solo e da atmosfera sobre a vegetação. O EVI é calculado de acordo com a equação 2.

$$EVI = G * \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 * RED - C_2 * BLUE + L} \quad (2)$$

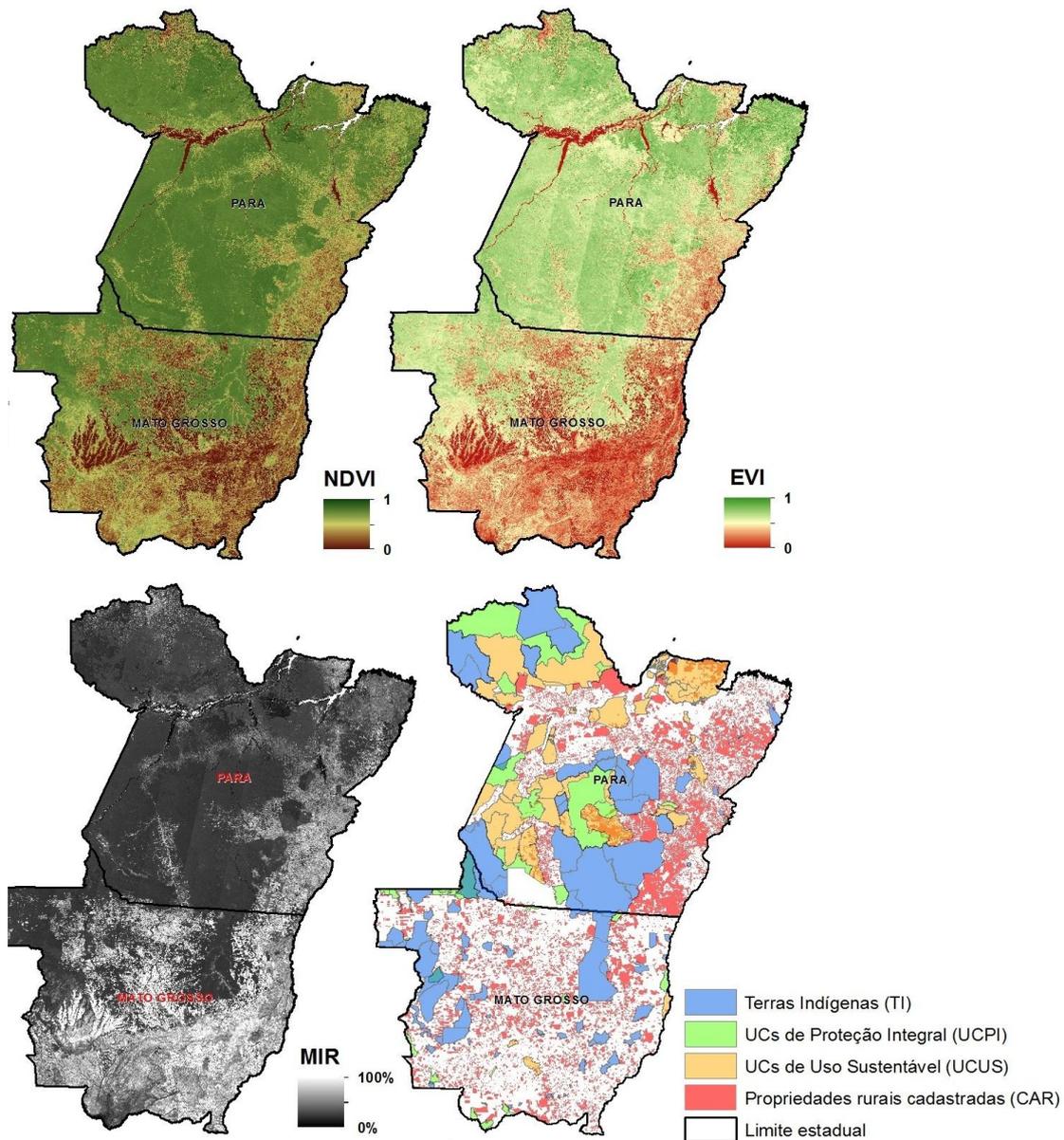
Onde: NIR = reflectância no infravermelho próximo;  
RED = reflectância no vermelho;  
BLUE = reflectância no azul;  
C1 = coeficiente de correção atmosférica para a banda do vermelho;  
C2 = coeficiente de correção atmosférica para a banda do azul;  
L = fator de correção para a interferência do solo;  
G = fator de ganho.

Embora os coeficientes C1 e C2 possam ser alterados de acordo com as características da área de estudo, o produto MOD13Q1 utiliza a seguinte parametrização: C1 = 6,0; C2 = 7,5; L = 1,0 e G = 2,5.

### 3.2.3 Amostragem por categoria territorial

As categorias territoriais consideradas neste estudo foram as Terras Indígenas (TIs) (FUNAI, 2012), Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPI), Unidades de Conservação de Uso Sustentável (UCUS) (ICMBio, 2012) e propriedades rurais cadastradas nas Secretarias Estaduais de Meio Ambiente do Pará e do Mato Grosso (CAR). Foram consideradas como Unidades de Conservação todas as categorias

federais, estaduais e municipais cadastradas no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). A figura 3.3 apresenta as imagens índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI), reflectância no comprimento de onda infravermelho médio (MIR) e as categorias territoriais amostradas nos estados do Pará e Mato Grosso.



**Figura 3.3.** Imagens índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI), reflectância no comprimento de onda infravermelho médio (MIR) e categorias territoriais amostradas nos estados do Pará e Mato Grosso.

Os valores digitais das imagens NDVI, EVI e MIR foram amostrados nos polígonos que representam as categorias territoriais. Buscando minimizar o efeito do tamanho da unidade territorial (TI, UC e propriedade rural) nos valores digitais amostrados, uma grade vetorial com células de 5 km foi construída. A grade vetorial foi utilizada para dividir as grandes unidades territoriais em unidades amostrais múltiplas de 25 km<sup>2</sup>, balanceando, desta forma, a amostragem em relação as pequenas propriedades da Amazônia. Assim, todos os polígonos que apresentavam área maior que 25 km<sup>2</sup> foram divididos de acordo com as células da grade, formando unidades amostrais com capacidade amostral máxima de 400 pixels. No total foram geradas 62.374 unidades amostrais para o Pará e 29.072 unidades amostrais para o Mato Grosso. A tabela 3.1 apresenta o número de unidades amostrais por categoria territorial para os estados do Pará e Mato Grosso resultante da divisão das grandes unidades territoriais.

**Tabela 3.1.** Amostragem das categorias territoriais consideradas no estudo para os estados do Pará e Mato Grosso.

Categoria Territorial	Pará		Mato Grosso	
	Amostra (n)	(%)	Amostra (n)	(%)
Terras Indígenas	12.584	20,2	7.110	24,5
Unidades de Conservação de Uso Sustentável	12.662	20,3	489	1,7
Unidades de Conservação de Proteção Integral	6.058	9,7	1.667	5,7
Propriedades Rurais	31.070	49,8	19.786	68,1
Total	62.374	100,0	29.072	100,0

A etapa seguinte foi a obtenção dos valores médios das imagens NDVI, EVI e MIR por unidade amostral. Para isso, foi utilizada a ferramenta de amostragem estatística de um arquivo matricial a partir de outro arquivo vetorial que indica as áreas

a serem amostradas, resultando em tabelas com os valores médios de NDVI, EVI e MIR por unidade amostral.

Adicionalmente, as amostras foram usadas para extrair os valores médios do mapa de biomassa proposto por Saatchi et al (2011).

### **3.2.4 Análise estatística**

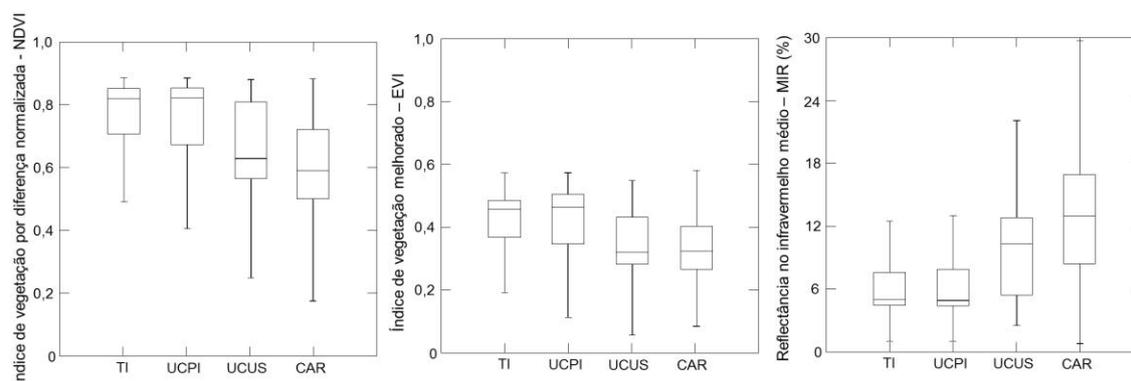
Devido às diferenças na vegetação dos estados do Pará e Mato Grosso, as análises foram realizadas separadamente para os estados. Os valores médios de NDVI, EVI e MIR foram comparados por categoria territorial utilizando gráficos box-plots. A análise de variâncias foi usada para avaliar a existência de diferenças estatisticamente significativas nos valores médios de NDVI, EVI e MIR entre as categorias territoriais e o teste de Tukey foi utilizado para a comparação múltipla de médias. Equações logarítmicas e exponenciais foram ajustadas entre as propriedades espectrais e a biomassa no Pará e no Mato Grosso com intuito de avaliar a relação entre estas variáveis.

## **3.3. Resultados**

### **3.3.1 NDVI, EVI e MIR nas categorias territoriais do Mato Grosso**

A ANOVA revelou a existência de diferença estatisticamente significativa dos valores médios de NDVI ( $F=2.249$ ;  $p\leq 0,001$ ;  $n=29.072$ ), EVI ( $F=1.576$ ;  $p\leq 0,001$ ;  $n=29.072$ ) e reflectância no comprimento de onda infravermelho médio - MIR ( $F=3142$ ;  $p\leq 0,001$ ;  $n=29.072$ ) entre as categorias territoriais. A figura 3.4 apresenta os box-plots para o NDVI, EVI e MIR para as categorias territoriais amostradas no estado do Mato Grosso. Verifica-se que as TIs e UCPIs apresentaram valores de NDVI e EVI mais elevados em relação as UCUS e propriedades rurais. Entretanto, a reflectância média no

comprimento de onda infravermelho médio foi inferior nas TIs e UCs de Proteção Integral quando comparadas as demais categorias. Cabe ressaltar que os índices de vegetação NDVI e EVI são proporcionais à biomassa, ao passo que a reflectância no infravermelho médio é inversamente proporcional à biomassa. Portanto, comparando-se fitofisionomias similares, valores mais altos de NDVI e EVI e mais baixos de MIR são indicadores de que a vegetação encontra-se em melhor estado de conservação. É importante destacar também que as variabilidades dos valores amostrados de NDVI, EVI e MIR foram inferiores para as TIs e UCPIs em relação as demais categorias. A explicação para isso é que a cobertura vegetal predominante nas TIs e UCPIs é a floresta, enquanto que nas UCUS e propriedades rurais uma maior parte das áreas florestadas foi substituída por outros usos, alterando os valores dos indicadores espectrais.



**Figura 3.4.** Box-plots do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI) e reflectância no infravermelho médio (MIR) para as categorias territoriais amostradas no estado do Mato Grosso (Terras Indígenas – TI; Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI; Unidades de Conservação de Uso Sustentável – UCUS e Áreas Privadas Cadastradas – CAR). Os dados discrepantes foram excluídos devido ao grande número de amostras (n=29.072).

O teste de Tukey para a comparação de múltiplas médias revelou que, em termos espectrais, as quatro categorias territoriais comparadas podem ser divididas em três classes. A primeira delas, que representa a classe com a vegetação melhor conservada, é

formada pelas TIs e UCPIs, que não apresentaram diferenças estatisticamente significativas considerando os valores de NDVI, EVI e MIR. A segunda classe, que apresenta a cobertura florestal em estágio intermediário de conservação, é formada pelas UCUS. E a terceira classe, que apresentou valores inferiores de NDVI e EVI e superiores de MIR, é representada pelas propriedades rurais, onde a maior fração de cobertura florestal foi convertida para outros usos. A tabela 3.2 demonstra os resultados do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado de Mato Grosso.

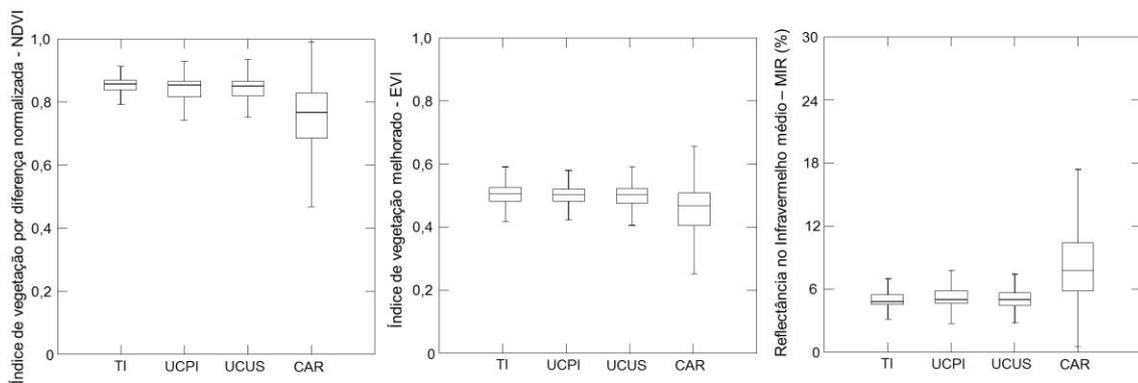
**Tabela 3.2.** Valores de significância (p) do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado de Mato Grosso. Valores menores que 0,05 significam que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das categorias territoriais comparadas.

	NDVI				EVI				MIR			
	TI	UCPI	UCUS	CAR	TI	UCPI	UCUS	CAR	TI	UCPI	UCUS	CAR
TI	-				-				-			
UCPI	0,999	-			0,278	-			0,107	-		
UCUS	0	0	-		0	0	-		0	0	-	
CAR	0	0	0	-	0	0	0,04	-	0	0	0	-

### 3.3.2 NDVI, EVI e MIR nas categorias territoriais do Pará

Considerando o estado do Pará, a ANOVA também revelou a existência de diferença estatisticamente significativa nos valores médios de NDVI ( $F=3.912$ ;  $p \leq 0,001$ ;  $n=62.374$ ), EVI ( $F=1.949$ ;  $p \leq 0,001$ ;  $n=62.374$ ) e MIR ( $F=7.609$ ;  $p \leq 0,001$ ;  $n=62.374$ ) entre as categorias territoriais. A figura 3.5 demonstra os box-plots para o NDVI, EVI e MIR para as categorias territoriais amostradas no estado do Pará. Diferentemente do observado no estado do Mato Grosso, as TIs, UCPIs e UCUSs apresentaram comportamento espectral similar considerando os índices de vegetação

NDVI e EVI e a reflectância no comprimento de onda infravermelho médio. As áreas privadas cadastradas, no entanto, apresentaram valores médios de NDVI e EVI inferiores e reflectância no comprimento de onda infravermelho médio superior. A variabilidade dos valores amostrados também foi similar entre as áreas protegidas (TIs, UCPIs e UCUSs), porém bastante inferior quando comparadas àquelas observadas nas propriedades rurais.



**Figura 3.5.** Box-plots do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de vegetação melhorado (EVI) e reflectância no infravermelho médio (MIR) para as categorias territoriais amostradas no estado do Pará (Terras Indígenas – TI; Unidades de Conservação de Proteção Integral – UCPI; Unidades de Conservação de Uso Sustentável – UCUS e Áreas Privadas Cadastradas – CAR). Os dados discrepantes foram excluídos devido ao grande número de amostras (n=62.374).

O teste de Tukey para a comparação de múltiplas médias revelou que, em relação ao NDVI, todas as categorias territoriais apresentam diferenças estatisticamente significativas. A análise do EVI, no entanto, revelou resultado similar ao observado no Mato Grosso, onde três classes foram separadas devido à similaridade entre as médias observadas para as TIs e UCPIs. Considerando a análise dos valores médios de MIR, três classes foram separadas, uma vez que o teste apontou que as UCUSs e as áreas privadas cadastradas não apresentam diferenças estatisticamente significativas. A tabela

3.3 demonstra os resultados do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado do Pará.

**Tabela 3.3.** Valores de significância (p) do teste de Tukey para a comparação das médias dos indicadores espectrais por categoria territorial no estado do Pará. Valores menores que 0,05 significam que existe diferença estatisticamente significativa entre as médias das categorias territoriais comparadas.

	NDVI				EVI				MIR			
	TI	UCPI	UCUS	CAR	TI	UCPI	UCUS	CAR	TI	UCPI	UCUS	CAR
TI	-				-				-			
UCPI	0	-			0,229	-			0	-		
UCUS	0	0	-		0	0	-		0	0	-	
CAR	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0,483	-

### 3.4 Discussão

#### 3.4.1 Diferenças na resposta espectral das categorias territoriais por estado

A fronteira agrícola da Amazônia brasileira depende de múltiplos fatores endógenos e exógenos que operam simultaneamente em diversas escalas (Brondizio & Moran, 2012), cuja trajetória dominante da paisagem dependerá de fatores locais, como os tipos de atores envolvidos (Pacheco, 2012), suas inter-relações, a conectividade geográfica e movimentos migratórios (Garcia et al., 2007). Estudos vêm demonstrando que as principais atividades que promovem o desmatamento são a exploração madeireira ilegal (Asner et al, 2002; 2005), a pecuária (Margulis, 2003; Barreto, 2010), a e a agricultura (Nepastad et al., 2006b; Marchand et al., 2012). Os fatores que dirigem o desmatamento diferem também dentro das categorias territoriais, que apresentam diversos padrões de uso da terra.

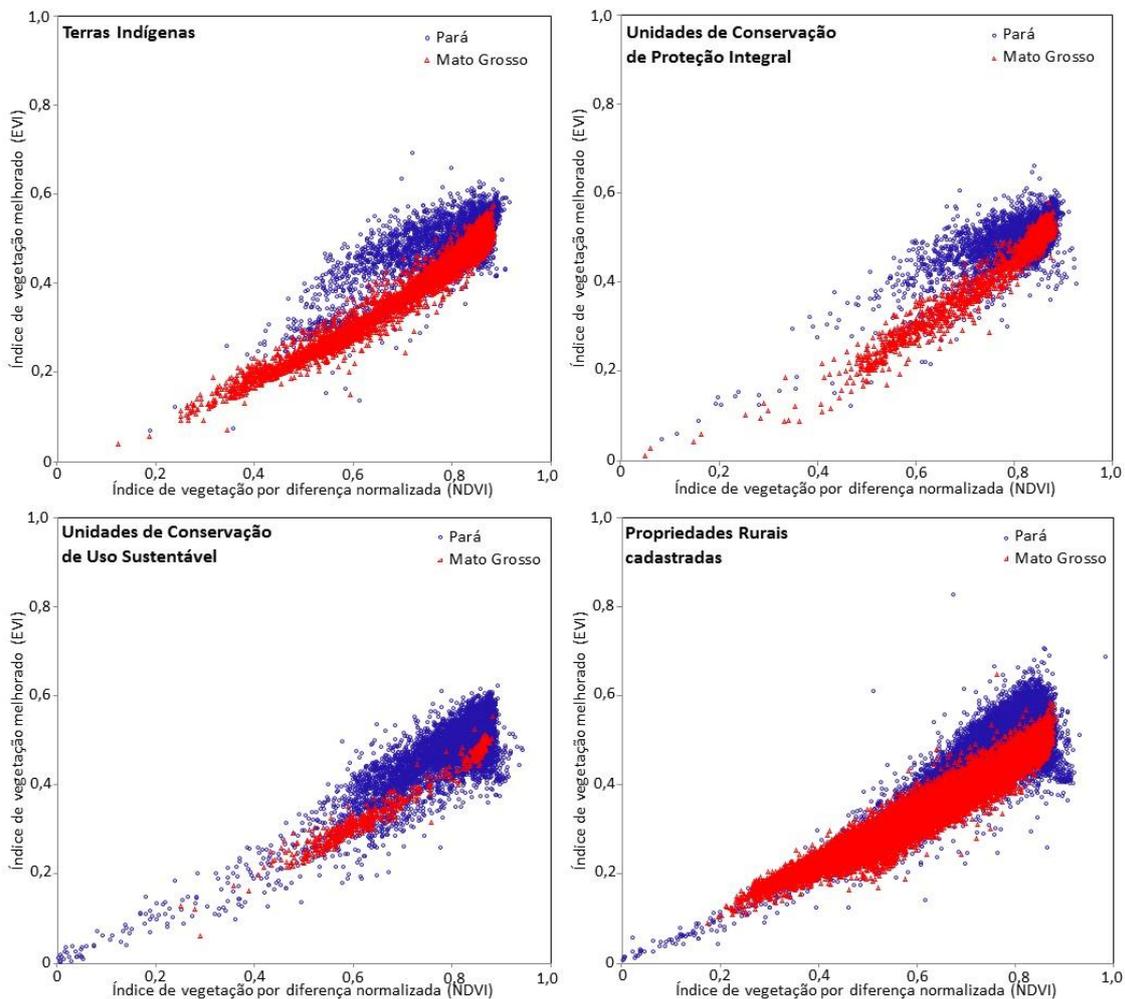
A figura 3.6 apresenta diagramas de dispersão entre NDVI e EVI por categoria territorial entre estados. Verifica-se que o comportamento espectral das categorias

territoriais entre os estados é diferente. Há maior amplitude de variação nas categorias territoriais do Mato Grosso. Estes resultados já eram esperados devido às características da vegetação natural. Contudo, considerando as diferenças na vegetação dos estados, não é possível isolar a variação oriunda da vegetação natural daquelas advindas das alterações antrópicas.

As terras indígenas, por exemplo, são vulneráveis a diversos tipos de ameaças, principalmente aquelas relacionadas à invasão para a prática de atividades ilícitas como exploração madeireira, pecuária, caça, pesca, mineração e incêndios oriundos de áreas adjacentes (Gascon et al., 2000; Laurance et al., 2001; Schwartzman & Zimmerman, 2005; Suárez et al., 2009; Adeney et al., 2009). É importante ressaltar que estas atividades podem ocorrer com ou sem o consentimento dos habitantes indígenas. Neste estudo, foi observada grande variabilidade nas propriedades espectrais das terras indígenas. Cabe destacar que, tanto no Mato Grosso como no Pará, muitas terras indígenas encontram-se invadidas e/ou sob juízo, como por exemplo, as TIs Cachoeira Seca, Alto Rio Guamá e Apyterewa no Pará e a TI Maraiwatsede no Mato Grosso. Além destas possíveis fontes de heterogeneidade nas propriedades espectrais, o Mato Grosso apresenta muitas TIs situadas no bioma Cerrado, o que justifica a maior amplitude observada.

As Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPI) apresentam comportamento espectral bastante similar ao das Terras Indígenas, com maior variabilidade no Mato Grosso do que no Pará. É importante destacar que o número de UCPIs no Pará é muito superior ao do Mato Grosso e que muitas delas também estão vulneráveis a invasores que adentram estas áreas para a prática de atividades ilícitas. Dentre elas, as principais são: REBIO Nascentes da Serra do Cachimbo, PARNA do Rio Novo, ESEC da Terra do Meio, PARNA da Amazônia e PARNA do Jamanxim. O

Mato Grosso não tem tantos problemas quanto o Pará em suas UCPIs. A variabilidade espectral observada ocorre principalmente devido a distribuição das UCPIs em diferentes tipologias de vegetação.



**Figura 3.6.** Relação entre Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Realçado (EVI) para as categorias territoriais do Pará e do Mato Grosso

As Unidades de Conservação de Uso Sustentável (UCUS) situadas no Pará são as mais problemáticas da Amazônia, pois é comum apresentarem os maiores incrementos anuais de desmatamento em relação às demais. Exemplificando, a APA do Tapajós, FLONA do Jamanxim, FLONA Altamira e RESEX Verde para Sempre estavam entre as cinco UCUSs com maiores áreas desmatadas em 2011. No MT, a

UCUS com maior incremento de desmatamento em 2011 foi a RESEX Guariba-Roosevelt. O MT apresenta poucas UCUSs, por esta razão apenas 489 polígonos foram amostrados enquanto no PA foram 12.662. Tanto no PA quanto no MT, os pontos isolados com valores de NDVI abaixo de 0,4 e EVI abaixo 0,2 correspondem a amostras situadas em áreas desmatadas. Contudo, de forma geral, os estudos vem demonstrando que tanto as UCPI quanto as UCUS detêm importante papel na conservação da biodiversidade (Gascon et al., 2000; Bruner et al., 2001), sustento das populações tradicionais (Naughton-Treves et al., 2005), inibição do desmatamento e incêndios florestais (Nepstad et al., 2006; Adendey et al., 2009) e mitigação de mudanças climáticas (Soares-Filho et al., 2010).

Com relação às propriedades particulares cadastradas, houve grande variação dos índices de vegetação, uma vez que o uso da terra é definido pelo proprietário. O desmatamento da propriedade rural é uma prática comum na Amazônia que é visto como uma forma de assegurar o direito à posse da terra (Araujo et al., 2009). Esta prática cultural é vista por alguns especialistas como um risco de aumento de desmatamento com a reforma agrária (Pacheco, 2009). Na Amazônia, há uma infinidade de padrões de uso do território na propriedade rural, estimativas recentes apontam que do total da área desmatada até 2008, 62,2% encontra-se em uso pela pecuária, a produção agrícola ocupava 4,9% e em 21% da superfície desmatada havia vegetação secundária (INPE, 2011), que são indicadoras de áreas abandonadas. No entanto, o uso e cobertura do solo se diferem entre o PA e MT. Em relação a área ocupada por culturas agrícolas, por exemplo, enquanto no PA apenas 2100 km<sup>2</sup> eram destinados à produção agrícola em 2008, no MT a superfície era de 30952 km<sup>2</sup>. A superfície ocupada por pastagens produtivas era da ordem de 107000 km<sup>2</sup> em ambos os estados. A superfície ocupada por regeneração natural, no entanto, era de 27987 km<sup>2</sup> no MT e 57624 no PA.

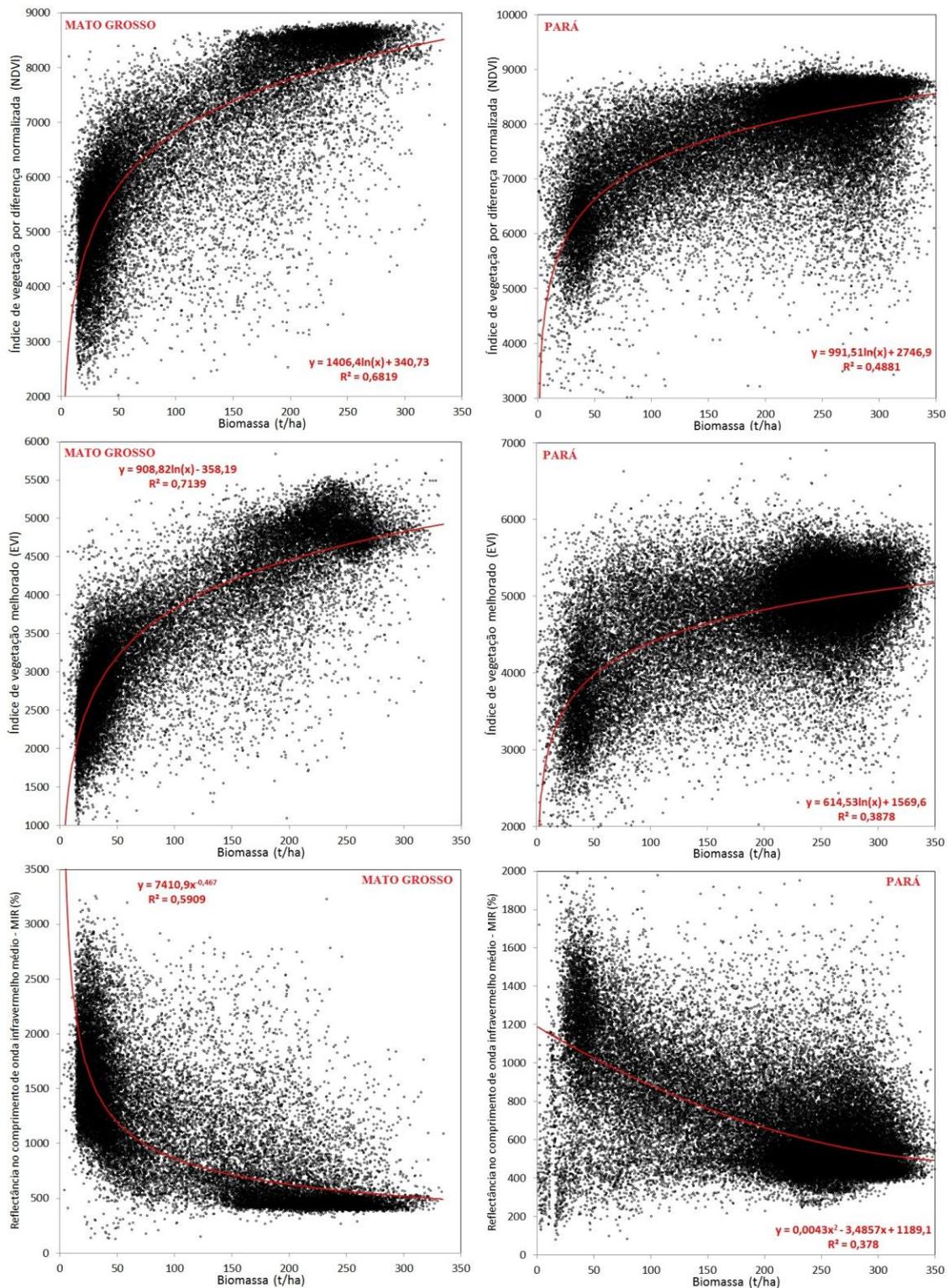
Os estados do Pará e do Mato Grosso detêm tipologias vegetais diferenciadas, não cabendo, por tanto, uma análise comparativa entre as categorias territoriais dos estados. Enquanto no Mato Grosso predominam as formações associadas ao Cerrado e as florestas abertas e de transição, no Pará as florestas são mais densas com maior biomassa. Portanto, é esperado que as propriedades espectrais extraídas das amostras do Mato Grosso tenham menores índices de vegetação e maiores reflectâncias no infravermelho médio. Outra fonte de incerteza para as análises diz respeito à representatividade dos ecossistemas abrangidos pelas categorias territoriais, pois algumas categorias não são bem distribuídas ao longo dos estados, ficando restritas a algumas tipologias vegetacionais. É o caso das Unidades de Conservação de Uso Sustentável do Mato Grosso, que abrangem somente as regiões centro-sul e leste do estado, onde predominam formações vegetais do Cerrado.

### **3.4.2 Influência da biomassa na resposta espectral**

Estudos têm demonstrado que os dados oriundos de sensores remotos se relacionam com medidas de biomassa da vegetação (Lefsky et al., 1999; Saatchi et al., 2011). Contudo, o sombreamento e fechamento do dossel e a complexidade das características biofísicas dificultam o ajuste de modelos baseados na reflectância (Lu et al., 2005). Por esta razão, estimativas a partir da reflectância costumam obter melhores resultados em florestas secundárias e ecossistemas com vegetação menos densa quando comparadas as florestas primárias.

Neste estudo, com objetivo de compreender o motivo das diferenças observadas nas propriedades espectrais, foram construídos modelos relacionando o NDVI, EVI e MIR com a biomassa da vegetação estimada por dados satelitais de altura da vegetação (Figura 3.7). Enquanto as relações entre biomassa e NDVI e EVI apresentaram maior

poder de explicação por equações logarítmicas, as relações entre biomassa e MIR foram melhor explicadas por equações exponencial e polinomial de segunda ordem.



**Figura 3.7.** Equações logarítmicas, exponenciais e polinomiais para a relação entre as propriedades espectrais e a biomassa nos estados do Pará e Mato Grosso.

No estado do Mato Grosso, onde há um gradiente de vegetação, desde as áreas campestres do Cerrado até as florestas densas, o modelo logarítmico entre biomassa e EVI apresentou o melhor ajuste ( $R^2=0,713$ ). Já no Pará, onde predominam as florestas densas com menor variabilidade da vegetação, o modelo logarítmico entre biomassa e NDVI deteve maior poder de explicação ( $R^2=0,488$ ). Cabe ressaltar que todos os modelos ajustados entre a biomassa e as propriedades espectrais estudadas (NDVI, EVI e MIR) foram mais consistentes para o Mato Grosso, apresentando melhores ajustes quando comparados ao Pará. Estas diferenças estão associadas à heterogeneidade da vegetação do Mato Grosso e a homogeneidade da vegetação do Pará. Acredita-se que enquanto as propriedades espectrais observadas no Mato Grosso estejam mais relacionadas à biomassa, no Pará as especificidades do dossel (sombreamento e características biofísicas) dificultam a relação entre a biomassa e as propriedades espectrais.

### **3.5 Conclusões**

A análise comparativa dos valores médios dos indicadores espectrais (NDVI, EVI e MIR) por categoria territorial (TI, UCPI, UCUS e CAR) no estado do Mato Grosso revelou que as categorias territoriais TI e UCPI apresentam florestas em melhor estado de conservação, seguido das UCUS e propriedades rurais. No estado do Pará, os indicadores espectrais não foram convergentes como no Mato Grosso, entretanto a mesma tendência se repetiu, apontando que as categorias territoriais TI e UCPI apresentaram florestas mais preservadas que as demais. De uma forma geral, a análise dos indicadores espectrais por categoria territorial revelou que as florestas mais bem preservadas estão em Terras Indígenas e Unidades de Conservação de Proteção Integral seguidas das Unidades de Conservação de Uso Sustentável e áreas privadas.

### 3.6 Referências bibliográficas

- Adeney, J.M., Christensen Jr, N.L., Pimm, S.L. Reserves protect against deforestation fires in the Amazon. **PLoS One**, 4, e5014, 2009.
- Aguiar, A. P. D.; Camara, G.; Escada, M. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modeling**, v. 209, p. 169-188, 2007.
- Araujo, C., Bonjean, C.A., Combes, J.-L., Motel, P.C., Reis, E.J. Property rights and deforestation in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, n.68, p. 2461–2468, 2009.
- Asner, G.P., Keller, M., Pereira, R., Zweede, J.C. Remote sensing of selective logging in Amazonia - Assessing limitations based on detailed field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. **Remote Sensing of Environment**, n. 80, p. 483-496, 2002.
- Asner, G.P., Knaap, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M., Silva, J.N. Selective Logging in the Brazilian Amazon. **Science**, n. 5747, p. 480-482, 2005.
- Barreto, P., Silva, D. Will Cattle Ranching Continue to Drive Deforestation in the Brazilian Amazon? Institute of People and the Environment (IMAZON), 23p., 2010.
- Brondizio, E.S, Moran, E.F. Level-dependent deforestation trajectories in the Brazilian Amazon from 1970 to 2001. **Population and Environment**, n. 34, p. 69-85, 2012.
- Bruner, A., Gullison, R., Rice, R., Fonseca, G. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. **Science**, n. 291, p.125–28, 2001.
- Garcia, R.A, Soares-Filho, B.S., Sawyer, D.O. Socioeconomic dimensions, migration and deforestation: an integrated model of territorial organization for the Brazilian Amazon. **Ecological Indicators**, n. 7, p. 719-730, 2007.
- Gascon C., Williamson B., Fonseca G.A.B. Receding forest edges and vanishing reserves. **Science**, n. 288, p.1356–1358, 2000.
- Huete, A; Liu, H. Q.; Batchily, K.; Leween, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, n. 59, p. 440–451, 1997.

- Huete, A.; Justice, C.; Leeuwen, W. V. **Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document**, 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\_mod13.pdf>. Acesso: out. 2012.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 195-213, 2002.
- Huete, A.R, Didan K., Shimabukuro, Y.E, Ratana, P., Saleska, S.R., Hutyrá, L.R., Yang, W., Nemani, R.R., Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, n. 33, L06405.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). DETER: Detecção do Desmatamento em Tempo Real. <http://www.obt.inpe.br/deter/>> Acesso em: out. 2012.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). TerraClass: Levantamento de informações de uso e cobertura da terra na Amazônia – Sumário Executivo. São José dos Campos – SP, 34p., 2011.
- Justice, C. O.; Vermote, E.; Townshend, J. R. G.; DeFries, R.; Roy, P. D; Hall, D. K, Salomonson, V.; Privette, J. L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, B; Knyazikhin, Y.; Running, W. S.; Nemani, R. R.; Wan, Z.; Huete, A. R.; Leeuwen, W. V.; Wolfe, R. E.; Giglio, L.; Muller, J. P; Lewis, P.; Barnsley, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p.1228-1247, 1998.
- Kim, Y., Knox, R., Longo, M., Medvigy, D., Hutyrá, L.R., Pyle, E., Wofsy, S.C., Bras, R.L., Moorcroft, P.R. Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an amazonia rainforest. **Global Change Biology**, n. 18, p.1322-1334, 2012.
- Laurance, W.F., Albernaz, A.K.M., Costa, C.D. Is deforestation accelerating in the Brazilian Amazon? **Environmental Conservation**, n. 28, p.305–311, 2001.
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G., Shugart, H.H. Surface Lidar Remote Sensing of Basal Area and Biomass in Deciduous Forests of Eastern Maryland, USA. **Remote Sensing of Environment**, n. 67, p. 83-98, 1999.
- Lu, D., Batistella, M., Moran, E. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts on forest stand structure. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, n. 71, p. 967-974, 2005.

- Marchand, S. The relationship between technical efficiency in agriculture and deforestation in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, n. 77, p. 166-175, 2012.
- Margulis, S. Causes of deforestation of the Brazilian Amazon. World Bank Working Paper 22, 2003.
- Naughton-Treves, L., Holland, M. B., Brandon, K. The role of protected areas in conserving biodiversity and sustaining local livelihoods. **Annual Review of Environmental Resources**, n. 30, p. 219–52, 2005.
- Nepstad, D., Schwartzman, D., Banberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., Lefebvre, P., Alencar, A. Inhibition of Amazonian deforestation and fire by parks and indigenous lands. **Conservation Biology**, v.20 p. 65–73, 2006.
- Nepstad, D.C., Stickler, C.M., Almeida, O.T. Globalization of the Amazon soy and beef industries: Opportunities for conservation. **Conservation Biology**, n. 20, p. 1595–1603, 2006.
- Pacheco, P. Agrarian reform in the Brazilian Amazon: its implications for land distribution and deforestation. **World Development**, n. 37, p. 1337–1347, 2009.
- Pacheco, P. Actor and frontier types in the Brazilian Amazon: Assessing interactions and outcomes associated with frontier expansion. **Geoforum**, v.43, p.864-874, 2012.
- Rudorff, B. F. T., Shimabukuro, Y. E., Ceballos, J. C. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 428 p.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 108, p. 9899-9904, 2011.
- Schwartzman, S., Zimmerman, B. Conservation alliances with indigenous peoples of the Amazon. **Conservation Biology**, n. 19, p. 721–727, 2005.
- Soares-Filho, B. S.; Nepstad, D.; Curran, L.; Voll, E.; Cerqueira, G.; Garcia, R. A.; Ramos, C. A. ; Mcdonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P. Modeling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p. 520-523, 2006.

- Soares-Filho, B.; Moutinho, P.; Nepstad, D.; Anderson, A.; Rodrigues, H.; Garcia, R.; Dietzsch, L.; Merry, F.; Bowman, M.; Letícia, H.; Silvestrini, R.; Meretti, C.: Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 107, p. 10821-10826, 2010.
- Solano R., Didan., K., Jacobson, A., Huete, A. Modis **vegetation index User's Guide (MOD 13 Series)**, 2010. Disponível em: <[http://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS\\_VI\\_UsersGuide\\_01\\_2012.pdf](http://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf)>. Acesso: out. 2012.
- Suárez, E. M., Cueva, R.M., Bucheli, V.U., Zapata-Ríos, G., Toral, E., Torres, J., Prado, W., Olalla, J.V. Oil industry, wild meat trade and roads: indirect effects of oil extraction activities in a protected area in north-eastern Ecuador. **Animal Conservation**, v. 12, p. 364–373, 2009.
- Trancoso, R., Schiatti, J., Carneiro Filho, A. Padrões de desflorestamento na Amazônia Legal: diferenças espaciais e temporais das mudanças na cobertura da terra. In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, p. 3187 – 3194, 2007.
- Trancoso, R., Pessoa, O. A. A., Machado, G. C. Contenção de incêndios florestais por Terras Indígenas na região do arco do desflorestamento da Amazônia em 2010. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brasil, p. 8012-8019, 2011.

## CAPÍTULO VI

---

### Considerações finais

#### 4.1 Considerações finais

Nesta dissertação de mestrado em Geociências Aplicadas, o sensoriamento remoto da vegetação foi usado para duas diferentes finalidades em dois biomas (no Cerrado e na Amazônia), onde a vegetação apresenta características espectrais distintas. Ambos os estudos usaram a análise espacial e a estatística para a amostragem e análise dos dados oriundos de sensores remotos com diferentes resoluções espacial, temporal e espectral.

No estudo realizado no Cerrado, os polígonos de desmatamentos identificados pelo Projeto de Monitoramento dos Biomas Brasileiros por Satélite (PMDBBS) foram usados como amostras para a parametrização das mudanças na resposta espectral dos comprimentos de onda vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio e índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). As mudanças médias verificadas após o desmatamento foram demonstradas para o bioma e para as diferentes regiões estudadas. A variabilidade espacial da resposta espectral ao longo das regiões estudadas foi interpretada em relação aos ciclos sazonais de precipitação e a biomassa da vegetação.

O estudo realizado na região da Amazônia Legal utilizou os polígonos das diferentes categorias territoriais (Terras Indígenas, Unidades de Conservação de Proteção Integral, Unidades de Conservação de Uso Sustentável e propriedades rurais cadastradas) para a amostragem dos valores médios de índices de vegetação e reflectância no infravermelho médio. A análise quantitativa das propriedades espectrais

da vegetação apontou as categorias territoriais que apresentam florestas tropicais em melhor estado de conservação nos estados Amazônicos estudados.

Os estudos utilizaram métodos semelhantes para a realização de avaliações distintas, demonstrando aplicações diferenciadas do sensoriamento remoto da vegetação a partir dos sensores Landsat TM e MODIS. No entanto, estudos baseados nas propriedades espectrais da vegetação detêm uma infinidade de aplicações (Asner, 1998; Ponzoni e Shimabukuro, 2010; Jensen, 2011). Estudos recentes vêm utilizando o sensoriamento remoto da vegetação como indicador para questões relacionadas à seca da Amazônia (Anderson et al., 2010; Saatchi et al., 2013), a fenologia da vegetação (Koltunov et al., 2009), a biomassa (Saatchi et al., 2011; Kim et al., 2012), a produção de soja (Galford et al., 2008; Brown et al., 2013) e para a detecção de exploração seletiva (Asner et al., 2005). Inúmeras são as aplicações relacionadas aos fundamentos do comportamento espectral da vegetação tropical para a compreensão de processos em diversas escalas e áreas do conhecimento, fazendo do sensoriamento remoto da vegetação tropical um desafio bastante intrigante (Samanta et al., 2012).

#### **4.2 Referências bibliográficas**

- Anderson, L.O., Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Ladle, R., Arai, E., Barbier, N., Phillips, O. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. **New Phytologist** n.187, p.733–750, 2010.
- Asner, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n. 64, p. 234-253, 1998.
- Asner, G.P., Knaap, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M., Silva, J.N. Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Science*, n. 5747, p. 480-482, 2005.

- Brown, J.C., Kastens, J.H., Coutinho, A.C., Victoria, D.C., Bishop, C.R. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. **Remote Sensing of Environment**, n. 130, p. 39-50, 2013.
- Galford, G. L., Mustard, J. F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n.112, p. 576–587, 2008.
- Jensen, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução da segunda edição: Epiphânio, J.C.N. et al. Editora Parêntese, 598p. 2011.
- Kim, Y., Knox, R., Longo, M., Medvigy, D., Hutyrá, L.R., Pyle, E., Wofsy, S.C., Bras, R.L., Moorcroft, P.R. Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an Amazonian rainforest. **Global Change Biology**, n. 18, p.1322-1334, 2012.
- Koltunov, A., Ustin, S.L., Asner, G.P., Fung, I. Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, n. 113, p. 2431-2440, 2009.
- Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Editora Parêntese, 127p. 2010.
- Saatchi, S., Asefi-Najafabady, S., Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Anderson, L.O., Myneni, R.B., Nemani, R. Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 110, p. 565-570, 2013.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 108, p. 9899-9904, 2011.
- Samanta, A., Ganguly, S., Vermote, E., Nemani, R.R., Myneni, R.B. Why is remote sensing of Amazon forest greenness so challenging? **Earth Interactions**, v. 16, p. 1-14, 2012.