



**Universidade de Brasília**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

ANTONIO FELIPE COUTO JUNIOR

**SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR MODIS UTILIZADAS PARA A  
AVALIAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA DA ECORREGIÃO  
DO CHAPADÃO DO SÃO FRANCISCO**

Tese de Doutorado N° 005

BRASÍLIA - DF  
2012



**Universidade de Brasília**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

ANTONIO FELIPE COUTO JUNIOR

**SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR MODIS UTILIZADAS PARA A  
AVALIAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA DA ECORREGIÃO  
DO CHAPADÃO DO SÃO FRANCISCO**

Tese de Doutorado N° 005

Tese de Doutorado apresentada à Universidade de Brasília, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, para a obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: *Geoprocessamento Aplicado à Análise Ambiental*

Orientador: Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Junior

BRASÍLIA - DF  
2012

**SÉRIES TEMPORAIS DO SENSOR MODIS UTILIZADAS PARA A  
AVALIAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA DA ECORREGIÃO  
DO CHAPADÃO DO SÃO FRANCISCO**

ANTONIO FELIPE COUTO JUNIOR

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Osmar Abílio de Carvalho Junior (GEA/UnB)

---

Prof. Dr. Yosio Edemir Shimabukuro (INPE)

---

Prof. Dr. Antonio Roberto Formaggio (INPE)

---

Prof. Dr. Edson Eyji Sano (Embrapa/CPAC)

---

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (IG/UnB)

## AGRADECIMENTOS

Devo ressaltar que tive o privilégio de ter sido orientado por dois grandes mestres e excelentes cientistas, os professores Osmar e Eder. Eles me ensinaram que, na verdade, o verdadeiro mestre torna seu discípulo um ser humano mais consciente.

Início agradecendo ao professor Osmar pelo aprendizado intenso e pelos desafios propostos ao longo de minha formação. Devo destacar também sua competência em orientar minhas habilidades e sua confiança em minha capacidade para a conclusão deste trabalho. Agradeço por nossa brilhante parceria, colocando-me à disposição para contribuir ainda mais efetivamente para o desenvolvimento do nosso grupo de pesquisa.

Concomitantemente, agradeço ao professor Eder por sua paciência e sabedoria durante o processo de concepção deste trabalho e das reflexões geradas por esta obra. Destaco sua preciosa capacidade de associação entre os resultados obtidos e os fenômenos observados na natureza. Sua consciência científica proporcionou a inserção desta tese dentro de desafios reais e em resposta a demandas práticas. A conclusão desta tese expressa a minha gratidão por seu comprometimento.

Ao longo desta trajetória, tive o privilégio de conviver com professor Paulo Meneses e desfrutar de sua vasta experiência, que contribuiu de forma decisiva para a consolidação do meu conhecimento. Além desta gratidão individual, agradeço por sua expressiva contribuição científica para o país, que, indiretamente, foi precursora desta tese.

Agradeço aos integrantes da comissão avaliadora por suas valiosas reflexões e considerações. Reforço o agradecimento aos membros externos, Dr. Yosio Shimabukuro e Dr. Antonio Formaggio, que gentilmente aceitaram o nosso convite, trazendo contribuições relevantes para o aprimoramento desta tese.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Geociência Aplicadas, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pela oportunidade de ingressar neste curso. Aproveito a oportunidade para agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo fornecida durante a execução desta tese. Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), pelos recursos fornecidos aos projetos desenvolvidos pelo Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE), do Departamento de Geografia. Sou grato à parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), especialmente com o Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado (CPAC). Dentro desta instituição, sou especialmente grato à Dra. Adriana Reatto, Dr. Antonio Guerra, Dr. Cláudio Karia e Dr. José Roberto Peres.

Todas estas realizações e conexões só foram possíveis devido ao apoio incondicional demonstrado pelos meus pais, Zilda e Felipe. Sou grato por todos os meus familiares pelo convívio e aprendizado mútuo ao longo de minha existência. Nos últimos anos, também devo agradecimentos à Adriana pela compreensão e consideração aos meus ideais. Nesta caminhada, destaco minha amizade com Vinícius, grande amigo e parceiro em vários projetos, que agradeço por seu apoio ao longo desta construção.

## RESUMO

COUTO JUNIOR, A.F. **Séries temporais do sensor MODIS utilizadas para a avaliação da cobertura da terra da ecorregião do Chapadão do São Francisco**. 2012. 126f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

As atividades da sociedade moderna alteraram a cobertura da terra, desde o nível local até global, ocasionando impactos para a manutenção de sua própria existência. Neste sentido, torna-se relevante o conhecimento dos padrões de ocupação da cobertura da terra como forma de melhor utilizar os recursos naturais. Dentre as alternativas, destaca-se a caracterização da vegetação por meio de séries temporais de dados orbitais. Um dos principais avanços desta linha de pesquisa foi lançamento do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que proporcionou maior compreensão dos processos terrestres. No entanto, estas séries temporais apresentam interferências atmosféricas, demandando tratamento para atenuar estes efeitos. Neste contexto, o objetivo principal desta tese foi avaliar a cobertura da terra do bioma Cerrado, com destaque para a ecorregião do Chapadão do São Francisco, utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS. O presente trabalho utilizou a seguinte sequência metodológica: 1) filtro de mediana, visando reduzir os ruídos de impulso; 2) transformação pela Fração Mínima de Ruído (FRM), ampliar a razão sinal/ruído; 3) transformação inversa FRM, retornar os valores de índices de vegetação considerando apenas a fração composta por sinal. O tratamento das séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS proporcionou a caracterização dos comportamentos fenológicos das principais culturas agrícolas: café, soja, milho e algodão. Neste sentido foram evidenciadas as variações interanuais e a sazonalidade desses plantios, destacando os principais eventos fenológicos em função dos tratos culturais. Considerando os comportamentos temporais das principais coberturas da terra, foi descrita a dinâmica da ocupação agrícola no município de Luis Eduardo Magalhães, inserido na mesorregião do Extremo Oeste Baiano nos últimos dez anos. Foram evidenciados três principais classes de cobertura da terra: a) Cerrado, representando as coberturas da terra que apresentaram sazonalidade similar à fitofisionomia cerrado sentido restrito; b) Conversão, caracterizada como o processo de retirada da cobertura natural para outras coberturas; c) Agricultura, representando as áreas dos cultivos agrícolas mecanizados consolidados na porção oeste do município avaliado nos últimos dez anos. Estes comportamentos ao longo do tempo foram denominados de assinaturas temporais e sua organização proporcionou a estruturação de bibliotecas temporais, características de ambientes temporais. Estes resultados permitiram a avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção por meio do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP). Este índice foi fundamentado no comportamento temporal das características biofísicas da vegetação natural, neste caso a fitofisionomia de cerrado sentido restrito. Esta abordagem favorece o entendimento sobre o funcionamento da paisagem e proporciona a estruturação de agroecossistemas sustentáveis em função da cobertura natural. É desejado que os futuros sistemas de produção no Brasil levem em consideração o comportamento da cobertura ao longo do tempo, favorecendo o estabelecimento de arranjos produtivos regionais, a avaliação de sistemas de produção e a previsão de safra. Esta abordagem permitirá que o país mantenha sua posição no cenário do agronegócio internacional e torne-se referência de sustentabilidade.

**Palavras chave:** Índices de vegetação, fenologia, mudanças da cobertura da terra, biblioteca de assinaturas temporais, sustentabilidade.

## ABSTRACT

COUTO JUNIOR, A.F. **MODIS time series applied to land cover evaluation in the Chapadão do São Francisco ecoregion**. 2012. 126f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

The human activities have already changed the land cover from the local to the global levels causing impacts maintenance of life. In this way it is relevant the knowledge of the land cover occupation patterns to better use of natural resources. Among the alternatives the characterization of vegetation using orbital sensors time series. One of the main advances in this research line was the launch of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) that provided better comprehension about the land processes. However, these time series are affected by atmosphere and demand noise reduction. In this context, this thesis aimed to evaluate the land cover of Cerrado biome, focusing in the *Chapadão do São Francisco* ecoregion, and using MODIS vegetation indices time series. The present work used the following procedures for the noise reduction: 1) median filter, to the reduction of impulse noise; 2) Minimum Noise Fraction (MNF), magnifying the signal/noise ratio; 3) inverse MNF transformation, returning the vegetation indices values based on the signal fraction. These procedures generated the phenological characterization of the main crops: coffee, soybean, corn and cotton. There were evidenced the main phenological events based on the cultural treatments. Considering the temporal behavior of the main land cover it was described the agriculture occupation dynamics in the last ten years in the Luis Eduardo Magalhães municipality. There were evidenced three land cover classes: a) Cerrado, representing the land cover that showed seasonality similar to the *cerrado stricto sensu*; b) Conversion, characterized by the natural land cover removal; c) Agriculture, representing the mechanized areas in the west part for more than ten years. These behaviors were called temporal signatures and their organization provided temporal libraries that were particular to the temporal environments. These results allowed the evaluation of the production systems sustainability based on the Landscape Productivity Index (LPI). This index was grounded on the temporal behavior of the natural cover biophysical characterization, in this case the *cerrado stricto sensu*. This approach favors the landscape understanding and provides the structuration if sustainable agroecosystems based on the natural land cover. It is desired the future production systems in Brazil take into account the land cover behavior on the time, favoring the regional productive arrangements, the production system evaluation and crop forecast. This approach will allow that the country main hold its position in the international agribusiness scenario and become a sustainability reference.

**Keywords:** Vegetation indices, phenology, land cover changes, temporal signature library, sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 1

Fig. 1.1 - Estimativas de mudanças históricas das áreas naturais para agricultura, compreendido entre o período de 1700 a 1992; entre 1700 e 1850 as mudanças foram tomadas a cada 50 anos, e daí em diante, a cada década. [Adaptado (RAMANKUTTY, et al., 1999)]. .....	13
Fig. 1.2 - O comportamento da atividade fotossintética (NDVI) e a cobertura do dossel (EVI) de cada cobertura ao longo do ano e sua relação com a precipitação. [Adaptado (COUTO JUNIOR, et al., 2011)] .....	17
Fig. 1.3 - Organização desta tese.....	24

### Capítulo 2

Fig. 2.1 - Abrangência da Ecorregião Chapadão do São Francisco (linha branca) em relação ao Bioma Cerrado (A); Região com grande parte dos plantios de café (B); Plantio de café em pivô central, cada quadrado branco corresponde ao pixel (250x250m) do sensor MODIS (C). 35	
Fig. 2.2 - Etapas do procedimento metodológico para geração de séries temporais tratadas. ....	37
Fig. 2.3 - Efeito dos procedimentos metodológicos utilizados para tratar os dados originais (pontos pretos) e gerar séries temporais suavizadas (linhas pretas), para cada um dos índices de vegetação.....	38
Fig. 2.4 - Série temporal dos índices de vegetação referente ao café-produção (parte superior), acompanhado por suas respectivas derivadas (parte inferior).....	39
Fig. 2.5 - Comparação entre a assinatura temporal do café, soja e vegetação natural. ....	40
Fig. 2.6 - Valores médios de NDVI e EVI para o café, soja e área natural, acompanhado de seus respectivos desvios-padrão.....	41
Fig. 2.7 - Comportamento dos índices de vegetação em relação ao ciclo fenológico de 24 meses do cafeeiro arábica ( <i>Coffea arabica</i> L.). .....	41

### Capítulo 3

Fig. 3.1 - Área de estudo dividida em Área 1 e 2, com a projeção dos quadrantes referentes aos pixels do sensor MODIS em relação à imagem Landsat TM5 (RGB-543), adquirida no dia 14 de julho de 2010; localização aproximada em relação ao Bioma Cerrado (A); entorno da área de estudo dentro do município de Luis Eduardo Magalhães (B); detalhe do pixel do sensor MODIS (250mx250m). 48	
Fig. 3.2 - Série temporal MODIS gerado a partir das imagens corrigidas dispostas em sequencia crescente. ....	50
Fig. 3.3 - Sequencia metodológica aplicada para o tratamento das séries temporais MODIS....	51
Fig. 3.4 - Comparação entre os dados originais (linha pontilhada) e os dados tratados (linha preta). ....	53
Fig. 3.5 - Estatística descritiva considerando a distribuição de frequência dos pixels referentes à sucessão soja-milho (A1) e milho-soja (A2) em função do comportamento dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI), considerando um período de 12 anos; análise de correlação entre os índices de vegetação em uma determinada sucessão e entre sucessões.....	54
Fig. 3.6 - Comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para a sucessão soja-milho.....	56
Fig. 3.7 - Comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para a sucessão milho-soja.....	57
Fig. 3.8 - Comportamento temporal médio dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI referentes às sucessões soja-milho e milho-soja. ....	57
Fig. 3.9 - Fenologia das sucessões avaliadas, soja-milho (esquerda) e milho-soja (direita), considerando o comportamento médio do NDVI ao longo de 12 anos, as transições fenológicas foram evidenciada com a 1ª Derivada (linha segmentada) e os estádios fenológicos caracterizados pela 2ª Derivada (linha preta). .....	58

## Capítulo 4

- Fig. 4.1 - Detalhe da área de estudo com a projeção dos pixels do sensor MODIS (250mx250m), em relação a imagem Landsat 5-TM, do dia 14 de julho de 2010 e composição colorida RGB/543 (A); entorno da área de estudo localizada ao longo da BR-020, no sentido do município de Luis Eduardo Magalhães (B); localização regional em relação ao Bioma Cerrado (C). 66
- Fig. 4.2 - Série temporal MODIS gerado a partir das imagens corregristadas dispostas em sequencia crescente. .... 67
- Fig. 4.3 - Geração das séries temporais dos índices de vegetação MODIS e sequencia metodológica utilizada para o tratamento dos ruídos, nesse caso, o exemplo do NDVI..... 69
- Fig. 4. 4 - Perfil temporal original (triângulos cinzas), perfil após a aplicação da mediana (quadrados pretos) e o perfil tratado pela transformação inversa da Fração Mínima de Ruído (linha preta). .... 70
- Fig. 4.5 - Qualidade crescente das imagens referentes ao dia 305 do ano de 2000, original (esquerda), após o filtro de mediana (centro) e após a transformação inversa FMR (direita). ... 70
- Fig. 4.6 - Comportamento temporal do algodão entre os anos de 2000 e 2011, considerando os índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI..... 71
- Fig. 4. 7 - Correlação entre EVI e NDVI, acompanhado por suas distribuições de frequência. . 72
- Fig. 4. 8 - Correlação entre conteúdo de água (NDWI) e a produção de biomassa (NDVI), acompanhado por suas distribuições de frequência. .... 72
- Fig. 4. 9 - Correlação entre NDWI e EVI, acompanhado por suas distribuições de frequência. 73
- Fig. 4.10 - Comportamento temporal da cultura do algodão em sistema de plantio convencional referente aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI, em dias do ano; a duração das fases fenológicas, destacadas por meio das 1<sup>as</sup> derivadas (linha tracejada). .... 74
- Fig. 4. 11 - Comportamento temporal cultura do algodão considerando a produção de biomassa (NDVI), fechamento do dossel (EVI) e conteúdo de água foliar (NDWI), em dias do ano; os estádios fenológicos identificados utilizando a segunda derivada (linha pontilhada); ilustrações do desenvolvimento do algodão [Adaptado MARUR & RUANO (2001)]. .... 76

## Capítulo 5

- Fig. 5. 1 - Bioma Cerrado e a áreas estudo, em preto (esquerda); limite do município de Luis Eduardo Magalhães (direita). 83
- Fig. 5. 2 - Paralelepípedo gerado a partir das imagens corregristadas dispostas em sequencia crescente..... 85
- Fig. 5. 3 - Espectros temporais NDVI original (linha pontilhada) com alta variação e presença de ruído, e espectros suavizados pela associação do filtro de mediana e Fração Mínima de Ruído (FMR) (linha preta). .... 87
- Fig. 5.4 - Gráfico de autovalores (direita) e a qualidade decrescente das imagens (esquerda)... 88
- Fig. 5.5 - Gráfico de dispersão entre a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> componente da FMR; os números correspondem aos membros finais..... 88
- Fig. 5.6 - Assinaturas temporais médias dos membros finais. .... 89
- Fig. 5. 7 - As proporções da Fração Cerrado (superior) e da Fração Agricultura (inferior), oriundas da Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais..... 90
- Fig. 5.8 - Perfis temporais das principais fitofisionomias do Cerrado e de plantios de café..... 91
- Fig. 5.9 - Perfis temporais dos manejos de Algodão e da sucessão Soja e Milho..... 92
- Fig. 5.10 - Composição colorida das frações da Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais, onde os canais RGB são, respectivamente, Agricultura, Cerrado e Conversão. .... 92

## Capítulo 6

- Fig. 6.1 - Localização dos municípios (linha amarela) no oeste do estado da Bahia, inseridos dentro do Cerrado. 98
- Fig. 6.2 - Composição colorida das primeiras componentes FMR do NDVI, EVI e NDWI, respectivamente nos canais RGB (A); classificação não supervisionada Kmeans, considerando essas componentes FMR, evidenciando a separação de três ambientes temporais (B)..... 100
- Fig. 6.3 - Assinaturas temporais dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI) encontradas dentro do Ambiente Floresta Estacional Decidual (Mata Seca Arbustiva e Arbórea) e do Ambiente Savânico (Cerrado, Mata de Galeria, Eucalipto e Café)..... 101
- Fig. 6.4 – Assinaturas temporais dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI: sistema de plantio direto com a sucessão soja-milho e milho-soja, onde soja (ponto e traço) representa soja como primeira cultura e milho (tracejada), o milho como primeira cultura; sistema de plantio convencional de algodão (pontilhada)..... 102
- Fig. 6.5 - Distribuição espacial considerando o comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para os sistemas de plantio convencional e direto..... 103

## Capítulo 7

- Fig. 7.1 - Localização dos municípios (linha amarela), inseridos na mesorregião do Extremo Oeste Baiano e dentro do bioma Cerrado. 109
- Fig. 7.2 - Assinatura temporal do alvo (sistemas de produção) e da referência (Cerrado) e o resultado desta diferença, onde a parte acima da linha corresponde à estação chuvosa e abaixo, à seca..... 111
- Fig. 7.3 - Assinaturas temporais referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI... 112
- Fig. 7.4 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e o NDWI, considerando a estação chuvosa..... 114
- Fig. 7.5 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI, considerando a estação seca. .... 115
- Fig. 7.6 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Café em relação ao Cerrado sentido restrito, referente ao NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano. .... 116
- Fig. 7.7 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Eucalipto em relação ao Cerrado sentido restrito, referente NDVI, EVI e NDWI, para ambos os períodos.. 117
- Fig. 7.8 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) da Soja e do Milho em relação ao Cerrado sentido restrito, referente ao NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano. .... 117
- Fig. 7.9 - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Algodão em relação ao Cerrado sentido restrito, referente NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano. .... 118

## CONTEÚDO

RESUMO .....	II
ABSTRACT .....	III
LISTA DE FIGURAS .....	IV
<b>CAPÍTULO 1- APRESENTAÇÃO GERAL .....</b>	<b>10</b>
1.1. INTRODUÇÃO.....	10
1.2. HIPOTESE .....	11
1.3. JUSTIFICATIVA.....	11
1.4. OBJETIVOS.....	12
1.4.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	12
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	12
1.5. MUDANÇAS GLOBAIS DE COBERTURA DA TERRA.....	12
1.5.1. MUDANÇAS DE COBERTURA DA TERRA NO BRASIL .....	14
1.5.2. MUDANÇAS DE COBERTURA DA TERRA NO CERRADO .....	15
1.6. SÉRIES TEMPORAIS ORBITAIS E SUAS LIMITAÇÕES.....	18
1.6.1. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DO SENSOR MODIS.....	19
1.7. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	23
REFERÊNCIAS .....	25
<b>CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DO CAFEIEIRO (COFFEA ARÁBICA L.) UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS .....</b>	<b>31</b>
2.1. INTRODUÇÃO.....	31
2.1.1. <i>Fenologia do cafeeiro (Coffea arabica L.)</i> .....	32
2.1.2. <i>Monitoramento orbital do cafeeiro</i> .....	34
2.2. ÁREA DE ESTUDO .....	34
2.3. MATERIAL E MÉTODOS .....	35
2.3.1. <i>Dados do sensor MODIS</i> .....	35
2.3.2. <i>Construção das séries temporais e tratamento do ruído</i> .....	36
2.3.3. <i>Séries temporais utilizadas para a caracterização fenológica do cafeeiro</i> .....	38
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
2.4.1. <i>Resultados do tratamento de ruído</i> .....	38
2.4.2. <i>Resultado da caracterização fenológica do cafeeiro utilizando séries temporais</i> ....	39
2.5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS .....	42

**CAPÍTULO 3 – SÉRIES TEMPORAIS MODIS APLICADAS PARA  
CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA SUCESSÃO SOJA (GLYCINE MAX (L.)  
MERRILL) E MILHO (ZEA MAYS L.) EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO..... 46**

3.1. INTRODUÇÃO.....	46
3.2. ÁREA DE ESTUDO .....	48
3.3. MATERIAL E MÉTODOS .....	49
3.3.1. Séries temporais do sensor MODIS .....	49
3.3.2. Tratamento do ruído.....	51
3.3.3. Análise estatística dos perfis temporais e a fenologia de sucessões culturais.....	52
3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
3.4.1. Resultados do tratamento de ruído .....	52
3.4.2. Resultados da análise estatística dos perfis temporais .....	53
3.4.3. Resultados da fenologia das sucessões culturais .....	55
3.5. CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS .....	60

**CAPÍTULO 4 – SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO MODIS PARA  
CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DO ALGODÃO ..... 63**

4.1. INTRODUÇÃO.....	63
4.2. ÁREA DE ESTUDO .....	65
4.3. MATERIAL E MÉTODOS .....	66
4.3.1. Dados do sensor MODIS.....	66
4.3.2. Tratamento das séries temporais e caracterização dos estágios fenológicos do algodão.....	68
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	70
4.4.1. Resultados do tratamento de ruído .....	70
4.4.2. Resultado da comparação entre os índices de vegetação .....	70
4.4.3. Resultados da caracterização fenológica do algodão.....	73
4.5. CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS .....	77

**CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO DA OCUPAÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO  
UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS MODIS ..... 81**

5.1. INTRODUÇÃO.....	82
5.2. ÁREA DE ESTUDO .....	83
5.3. MATERIAL E MÉTODOS .....	84
5.3.1 Dados do sensor MODIS.....	84
5.3.2. Tratamento do ruído.....	85
5.3.3. Detecção dos membros finais e Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais .....	86
5.4. RESULTADOS .....	87
5.4.1. Resultados do tratamento do ruído .....	87
5.4.2. Resultados dos membros finais e Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais.....	88
5.5. CONCLUSÃO.....	93
REFERÊNCIAS .....	94

<b>CAPÍTULO 6 – ESTRUTURAÇÃO DE BIBLIOTECA TEMPORAL DAS PRINCIPAIS COBERTURAS DA TERRA DO BIOMA CERRADO .....</b>	<b>97</b>
6.1. INTRODUÇÃO.....	97
6.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	98
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
6.4. CONCLUSÃO.....	104
REFERÊNCIAS .....	104
<b>CAPÍTULO 7 – SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DA PAISAGEM.....</b>	<b>106</b>
7.1. INTRODUÇÃO.....	107
7.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	109
7.2.1. <i>Dados do sensor MODIS</i> .....	109
7.2.2. <i>Índices de vegetação e tratamento dos ruídos</i> .....	109
7.2.3. <i>Índice de produtividade da paisagem (IPP)</i> .....	110
7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
7.3.1. <i>Resultados das assinaturas temporais</i> .....	112
7.3.2. <i>Resultados do índice de produtividade da paisagem (IPP)</i> .....	113
7.4. CONCLUSÃO.....	118
REFERÊNCIAS .....	119
<b>CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>122</b>

## CAPÍTULO 1- APRESENTAÇÃO GERAL

### 1.1. INTRODUÇÃO

As atividades humanas converteram ou modificaram substancialmente a superfície terrestre para incrementar o valor das terras (LAMBIN, et al., 2003). As alterações dos atributos biofísicos (cobertura da terra) e a utilização destes atributos para propósitos humanos (uso da terra) mostram-se relevantes para a compreensão do processo mudanças da superfície terrestre (LAMBIN, et al., 1999). Essas alterações modificam a configuração espacial dos usos, além de ocasionar impactos, como, por exemplo, desflorestamento e desertificação (VERBUG, et al., 2004). Dentre as principais consequências ocasionadas por essas mudanças, destacam-se as alterações de ciclos biogeoquímicos, principalmente água, carbono e nitrogênio (RAMANKUTTY, et al., 1999). Os impactos advindos dessas mudanças ainda afetam os bens e serviços ambientais (LAMBIN, et al., 2003), especialmente aqueles relacionados à biodiversidade global (SALA, et al., 2002), degradação de solos (TRIMBLE, et al., 2000) e capacidade dos sistemas biológicos suportarem as necessidades humanas (VITOUSEK, et al., 1997).

A relevância desse conhecimento impulsionou o desenvolvimento de tecnologias, dentre elas, os sensores orbitais para a obtenção de parâmetros biofísicos referentes a mudanças cobertura (GALFORD, et al., 2008). A vegetação destaca-se como um dos principais parâmetros biofísicos estudados para a detecção de mudanças, especialmente, através de índices de vegetação como integradores da atividade fotossintética e capazes de medir a variabilidade espacial e temporal (HUETE, 1988). Grande parte dos trabalhos vem utilizando assinaturas temporais oriundas do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para a caracterização sazonal dos ecossistemas (DEFRIES, et al., 1994; RUNNING, et al., 1995; WESSELS, et al., 2004; RATANA, et al., 2005).

O uso NDVI permite evidenciar que padrões fenológicos da vegetação mostram-se diretamente relacionados com elementos fundamentais das dinâmicas sazonais da baixa atmosfera (REED, et al., 1994). Essa capacidade conduz a inferências relativas à vegetação e seu ambiente, proporcionando o incremento do conhecimento relativo aos padrões de uso da superfície terrestre e suas interações climáticas (SCHWARTZ, et al., 1999). Esses padrões permitem a criação de bancos de dados biofísicos utilizados nos modelos climáticos globais (SELLERS, et al., 1996).

Essa sazonalidade mostra-se relacionada à análise das modificações ecossistêmicas (SINGH, 1989), mesmo havendo controvérsias quanto à sua extensão, especialmente em áreas

tropicais como as savanas (GIRI, et al., 2005). No caso do Cerrado, a savana mais diversa em termos biológicos e ambientais (SILVA, et al., 2002; SILVA, et al., 2006), observa-se que a descrição do comportamento temporal da reflectancia da vegetação evidencia uma variabilidade espectral, conduzindo a uma melhor distinção da dinâmica sazonal de suas fitofisionomias (CARVALHO JUNIOR, et al., 2006, 2008, 2009). Além disso, dentro desse bioma a caracterização do comportamento temporal da cobertura permitiu diferenciação de áreas de pastagem e plantios agrícolas (FERREIRA, et al., 2004; RATANA, et al., 2005; COUTO JUNIOR, et al., 2011).

Porém, foram observadas limitações na utilização de séries temporais, especialmente devido a resíduos atmosféricos e efeitos geométricos e sazonais (CIHLAR, et al., 1997). Estudos evidenciam a importância da atenuação desses efeitos deletérios e discutem métodos para suavização (VANDIJK, et al., 1987; VIOVY, et al., 1992; ROERINK, et al., 2000; CHEN, et al., 2004; SAKAMOTO, et al., 2005; GALFORD, et al., 2008). Nesse contexto, mostra-se fundamental o desenvolvimento de procedimentos para a redução da influencia de ruídos presentes em séries temporais orbitais, antes da identificação e caracterização dos padrões cobertura do solo.

## **1.2. HIPOTESE**

A cobertura da terra pode ser avaliada por meio de assinaturas temporais de índices de vegetação de sensores orbitais após a minimização da influencia de ruídos, possibilitando a discriminação de ambientes em função de seu comportamento ao longo do tempo.

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

A utilização de séries temporais de índices de vegetação orbitais permite a caracterização do comportamento da cobertura da terra ao longo do tempo. A incorporação do fator tempo favorece a compreensão sobre o funcionamento da paisagem natural e suas relações com as demandas humanas.

Considerando a posição que o Brasil apresenta no cenário do agronegócio internacional, esta abordagem possibilita a avaliação de sistemas de produção, gera indicadores biosfísicos para os processos de financiamento rural e seguros agrícolas e proporciona a estruturação de arranjos produtivos regionais. Neste contexto, o país tem condições de manter seu destaque agrícola e consolidar seu sistema produtivo como referência em sustentabilidade.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo Geral**

Avaliar a cobertura da terra e caracterizar os comportamentos fenológicos dos principais alvos da Ecorregião do Chapadão do São Francisco utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Caracterizar os estádios fenológicos das principais culturas agrícolas presentes na Ecorregião do Chapadão do São Francisco.
- ✓ Descrever a dinâmica da ocupação agrícola dentro da Ecorregião do Chapadão do São Francisco.
- ✓ Estruturar uma biblioteca temporal das principais coberturas do bioma Cerrado.
- ✓ Gerar um Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) baseado no comportamento temporal de variáveis biofísicas.

## **1.5. MUDANÇAS GLOBAIS DE COBERTURA DA TERRA**

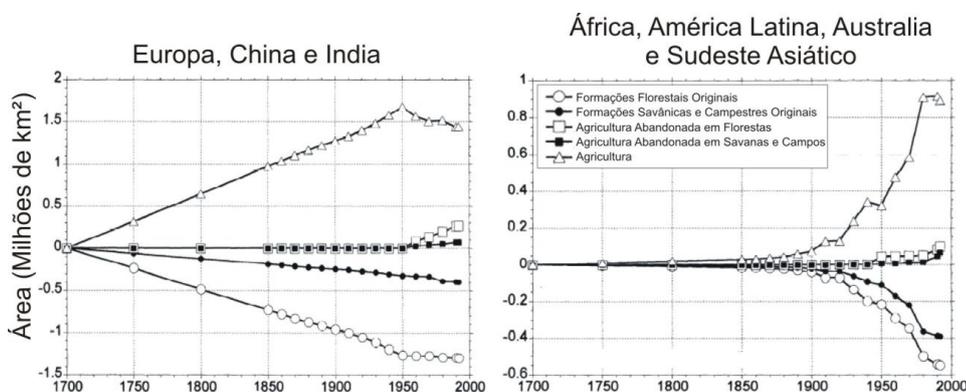
Cerca de metade das estruturas e funções dos ecossistemas terrestres livre de gelo foi convertida ou modificada significativamente devido às atividades humanas nos últimos 10.000 (RAMANKUTTY, et al., 1998; LAMBIN, et al., 2003). Essas alterações produziram impactos em taxas crescentes sobre o ambiente natural nos últimos 300 anos, ocasionados pelo rápido crescimento populacional global, o que acarretou maior necessidade de produção de alimentos (GOLDEWIJK, et al., 2004).

O estabelecimento da civilização mostra-se dependente das áreas agrícolas para a produção de alimentos, enquanto as regiões savânicas e campestres servem como pastagem e as florestas são fontes de madeira, carvão, papel e produtos farmacêuticos (RAMANKUTTY, et al., 2002). Neste sentido, a expansão agrícola vem acompanhando o desenvolvimento geral da economia e o aumento populacional (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION, 2001), tendo sido observado nos últimos 300 anos um incremento de cerca de 80% tanto de áreas agrícolas como pastagens (LAMBIN et al., 2003).

A Europa, a China e a Índia experimentaram a primeira rápida expansão de cultivos agrícolas, evidenciando uma elevada cobertura desde 1700, com taxas estáveis de crescimento durante os três séculos subsequentes (Fig. 1.1) (RAMANKUTTY, et al., 1999; LAMBIN, et al., 2003). É possível constatar por essa figura que esse grupo já apresentava um histórico de

práticas agrícolas com plantios extensivos em 1700, uma vez que sua curva permaneceu constante ao longo dos anos. Dentro desse grupo a Europa apresentou a primeira expansão agrícola, por ser mais economicamente desenvolvidas naquele contexto histórico. Já a China e Índia apresentaram um crescimento estável ao longo desses três séculos, chegando a estabilizar-se por volta de 1950, com redução após esta década.

Por outro lado, na África, América Latina, Austrália e Sudeste Asiático esta expansão ocorreu de forma gradual até 1850 (Fig 1.1), mostrando-se mais acelerada em meados do século XX (RAMANKUTTY, et al., 2002). A partir da década de 1970, o padrão de ocupação dos países da América Latina, inclusive na América do Sul, mostrou-se baseado na conversão de grandes áreas florestadas, acompanhada de rápida colonização agrícola e pecuária (LAMBIN, et al., 2003).



**Fig. 1.1** - Estimativas de mudanças históricas das áreas naturais para agricultura, compreendido entre o período de 1700 a 1992; entre 1700 e 1850 as mudanças foram tomadas a cada 50 anos, e daí em diante, a cada década. [Adaptado (RAMANKUTTY, et al., 1999)].

Dentro da América do Sul, podem ser separadas duas regiões: 1) a porção norte e 2) o conjunto formado por Argentina, Chile e Uruguai. Deste segundo grupo, a Argentina foi considerada a maior região de cultivo de moderada a alta intensidade entre 1910 e 1930, ocupando a região dos Pampas argentinos (RAMANKUTTY, et al., 2002). Durante este mesmo período, o Chile apresentou áreas agrícolas mais extensivas, sendo que dois terços ocuparam florestas e o terço restante, savanas e campos (RAMANKUTTY, et al., 1999).

Observando a porção norte da Américas do Sul, o Brasil destaca-se com áreas extensivas de agricultura, evidenciando sobre a região leste uma conversão ao longo dos Rios Paranaíba e Tocantins, por volta de 1960, e ao longo do São Francisco, na década de 1990 (RAMANKUTTY, et al., 2002). Em meados da década de 1970, observa-se que a expansão agrícola brasileira avançou sobre os planaltos da região Centro-Oeste, iniciando seu desenvolvimento no Mato Grosso, principalmente com os cultivos de soja e milho (RAMANKUTTY, et al., 1998).

### **1.5.1. MUDANÇAS DE COBERTURA DA TERRA NO BRASIL**

As mudanças de cobertura do solo no Brasil Central estão associadas ao processo de desconcentração espacial da atividade econômica no país desde 1970, ocasionado pela expansão agrícola na região Centro-Oeste e influenciada, principalmente, pelas políticas comerciais e agrícolas adotadas (HELFAND, et al., 2000; HELFAND, et al., 2003).

Essa expansão foi impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico em pesquisas agropecuárias através da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (GUIMARÃES, et al., 1997). Suas pesquisas fizeram com que os solos presentes no Centro-Oeste, fossem transformados em áreas de agricultura comercial com alta produtividade (DELGADO, 1985). Somado a esse conhecimento científico, outro fator preponderante para a implantação das culturas agrícolas foi a mecanização, facilitada pelo relevo predominantemente plano da região (REZENDE, 2002).

A introdução dessas frentes de agricultura na região Centro-Oeste proporcionou a incorporação de um sistema de produção intensiva de grãos, ultrapassando os limites regionais e alcançando a região Nordeste, em especial, o extremo oeste baiano (GUIMARÃES, et al., 1997; HELFAND, et al., 2000; BRANDÃO, et al., 2006).

Tendo em vista a restrição aos limites políticos arbitrários, o mais apropriado deve ser a compreensão da expansão agrícola partindo do conceito dos domínios da natureza, sendo considerado neste caso o Cerrado (AB'SÁBER, 2003). Desta forma, observa-se que esse domínio natural consolidou-se como um pólo de produção agroindustrial, devido à transformação de sua base produtiva, estimulada pela ação estatal (HELFAND, et al., 2000; BRANNSTROM, et al., 2008).

Essa transformação da base produtiva conduziu a mudanças no uso e cobertura do solo no Cerrado, tornando essencial a compreensão de seus processos de ocupação, além da análise das alterações ocorridas ao longo dos anos (BRANNSTROM, et al., 2008). O conhecimento dessas dinâmicas de uso e cobertura mostra-se fundamental para explicar como são conduzidas as mudanças, mesmo havendo distinções entre os biomas. As mudanças relativas a florestas secas e regiões savânicas são pouco conhecidas (LAMBIN, et al., 2001), existindo ainda divergências entre as estimativas sobre as savanas tropicais (GIRI, et al., 2005).

### 1.5.2. MUDANÇAS DE COBERTURA DA TERRA NO CERRADO

O Cerrado ocupa aproximadamente dois milhões de quilômetros quadrados, equivalendo a mais de um quinto da área do país, ocupando a maior parte do Brasil Central (RIBEIRO, et al., 1998; SILVA, et al., 2002). Dentre as savanas, apresenta a maior biodiversidade, além de pronunciada heterogeneidade de suas paisagens naturais (RATTER, et al., 1997; SILVA, et al., 2002; SILVA, et al., 2006).

Possui uma vegetação xeromórfica, sendo podendo ser encontradas as maiores variações estruturais, incluindo o estrato florestal (Cerradão) com árvores entre 12 e 15m de altura, associações de arbustos e árvores (Cerrado *sensu stricto*) com árvores entre 2 e 8m cobrindo entre 20 e 70% da área, e regiões campestres (Campo Cerrado), além de florestas ripárias, veredas, campos rupestres e florestas decíduais (EITEN, 1972; RIBEIRO & WALTER, 1998; FELFILI, et al., 2000).

O Cerrado possui um clima tropical com precipitação variando entre 750 e 2000 mm (média anual), denominado Köppen Aw, contrastando dois períodos climáticos bem distintos: um verão quente e úmido e um inverno mais frio e seco (EITEN, 1972).

Durante o período seco é comum a ocorrência de fogo, sendo considerado um dos fatores ambientais de mudança do Cerrado (MISTRY, 1998). As queimadas são recorrentes nessas áreas há pelo menos 32.000 anos (SALGADO-LABOURIAU, 1997), desempenhando grande influencia na estrutura do ecossistema e ciclagem de nutrientes (KAUFFMAN, et al., 1994).

Os solos desse bioma são altamente intemperizados e ácidos, apresentando altas concentrações de alumínio, requerendo a aplicação de técnicas de correção para implantação de agricultura e pecuária (RATTER, et al., 1997). A maior parte de sua extensão está situada em planaltos cristalinos ou blocos sedimentares contínuos, quebrados por uma rede de depressões inter e intraplanáltica (BRASIL & ALVARENGA, 1989). Nesse sentido, seu relevo é dominado por planaltos planos apresentando elevações que variam entre 500 e 1700m.

Em sua extensão foram identificadas cinco unidades de paisagens, sendo que a drenagem, topografia e tipo dominante de fisionomia ou fenologia mostram-se os principais fatores discriminantes (SILVA, et al., 2006). Esta classificação espacial evidenciou a separação entre distribuição florística e biogeográfica, além de indicar a localização de áreas com condições ecológicas gerais similares dentro do Cerrado.

Considerando a similaridade geomorfológica e botânica, foram identificadas e descritas 22 Ecorregiões dentro deste bioma (ARRUDA et al. 2008). Esta definição levou em consideração a representação ecossistemas e habitats presentes nesta região, visando subsidiar o planejamento para a conservação da biodiversidade dentro do contexto de unidades biogeográficas.

Mesmo com os atributos naturais, estima-se que entre 40 e 65% da área do Cerrado tenha sido convertida ou modificada, basicamente para usos agropecuários (KLINK, et al., 2005; SANO, et al., 2009; MANTOVANI, et al., 1998). Essas constatações evidenciam a necessidade do conhecimento das dinâmicas de ocupação e transformações ambientais decorrentes da ação antrópica.

Trabalhos de estruturação de bases de dados geográficos para avaliar a dinâmica de longa duração da cobertura da terra mostram-se relevantes para o conhecimento dos padrões de ocupação desse bioma (BATISTELLA, et al., 2002). Ao longo de 15 anos, observou-se que a cobertura agrícola passou de 14,6 % para 27 %, sendo que as áreas irrigadas apresentaram o maior acréscimo relativo (526%). Por outro lado, as coberturas vegetais naturais apresentaram redução de sua área (11,5%), e dentre suas fitofisionomias, o cerrado apresentou a maior redução de área (21 %).

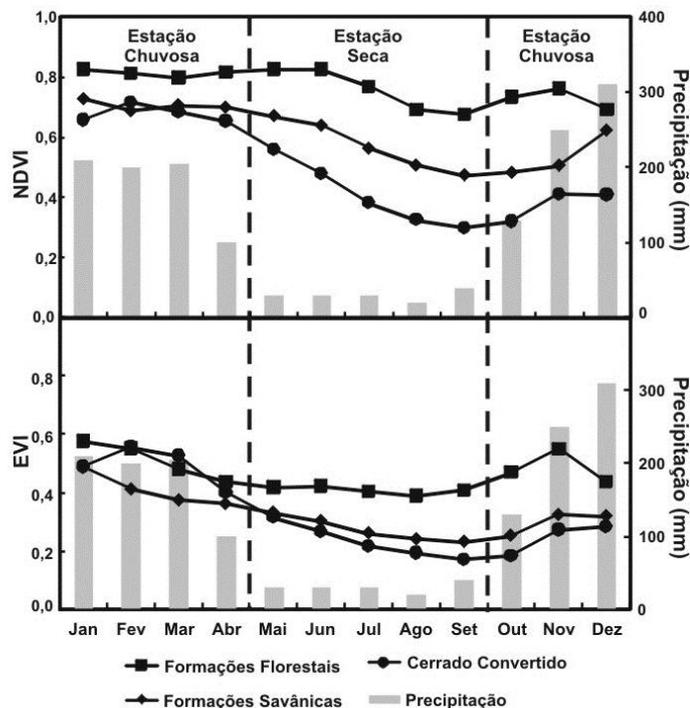
As conversões ou modificações do Cerrado mostram-se atreladas aos modernos usos agro-pastorais, particularmente voltados para a produção de soja e criação de gado (JENPSON, 2005). A autora realizou um estudo abrangendo 13 anos (1986-1999) no Estado de Mato Grosso, uma das principais fronteiras agrícolas do país. Foi detectada uma conversão total de 1338 km<sup>2</sup> durante o período, com um decréscimo anual de 103 km<sup>2</sup>, representando uma perda de 5,39% ao ano.

Atualmente, o Mato Grosso e a mesorregião do Extremo Oeste Baiano destacam-se como as duas maiores fronteiras agrícolas do Brasil, sendo importante a descrição de sua dinâmica de ocupação (BRANNSTROM, et al., 2008). Visando descrever esse processo esses autores analisaram um período de 16 anos (1986 e 2002), utilizando dados orbitais Landsat TM e ETM+, referentes ao primeiro e ao último ano, através de classificação não supervisionada em cada uma delas separadamente. Evidenciou-se uma conversão de Cerrado para Agropecuária da ordem de 31% no Oeste Baiano e 24 % em Mato Grosso.

Outra abordagem de análise temporal evidencia que a caracterização das modificações mais sutis permitem inferências sobre expansão ou intensificação agrícola (GALFORD, et al., 2008). Esses autores destacaram a importância dessa caracterização do

perfil temporal como alternativa para alcançar a sustentabilidade econômica das atividades agrícolas em áreas do Cerrado. Foram utilizadas séries temporais orbitais do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), referentes aos períodos de safras compreendidas entre 2001 e 2006. Visando reduzir o efeito atmosférico, foram retirados os pixels contaminados por nuvens e substituídos através de interpolação linear. Os resultados indicaram que a área colhida cresceu durante o período avaliado, passando de 6255 km<sup>2</sup> em 2001, para 9535 km<sup>2</sup> em 2006.

O sensor MODIS potencializou o uso de séries temporais para o monitoramento da superfície terrestre, especialmente no bioma Cerrado (COUTO JUNIOR et al., 2011). Nesse estudo foram avaliadas duas fisionomias vegetais do Cerrado (Formação Florestal e Formação Savânica) e Área de Cerrado convertido em área agrícola. Observou-se que os valores de NDVI e de EVI das Formações Florestais foram superiores em relação às demais coberturas e sua sazonalidade mostrou-se menos influenciada pela variação da precipitação ao longo do ano, por relacionados a cursos d'água (Fig 1.2). O dossel das Formações Savânicas apresentou redução entre os meses de janeiro e fevereiro e mostrou-se mais fechado que as Áreas Convertidas durante a estação seca. As áreas agrícolas apresentaram as maiores variações anuais de NDVI e EVI, evidenciando a atividade fotossintética dos cultivos durante a safra e a exposição do solo após a colheita.



**Fig. 1.2** - O comportamento da atividade fotossintética (NDVI) e a cobertura do dossel (EVI) de cada cobertura ao longo do ano e sua relação com a precipitação. [Adaptado (COUTO JUNIOR, et al., 2011)]

## 1.6. SÉRIES TEMPORAIS ORBITAIS E SUAS LIMITAÇÕES

Séries temporais são observações sendo organizadas em um tempo  $T$ , podendo ser discreta, quando observações são tomadas em intervalos de tempo fixos, ou contínua, onde as observações são armazenadas continuamente em um dado intervalo de tempo (BROCKWELL, et al., 2006).

Considerando séries temporais dentro do contexto de detecção de mudança para ecossistemas, essas definições assumem as seguintes acepções (COPPIN, et al., 2004): 1) análise bi-temporal; 2) análise de trajetórias temporais. Para a primeira, observa-se que a seleção apropriada das datas de aquisição das imagens mostra-se tão importante quanto a escolha do sensor, categorias de mudança e algoritmos. Desta forma, diferenças fenológicas decorrentes de variações ambientais, como precipitação, apresentam-se com sérios problemas. Além desses, pode-se destacar as variações de reflectância, efeitos sazonais locais e diferenças de estações. A análise de trajetórias temporais traz consigo o conceito de perfis ou séries temporais para contornar os problemas inerentes da análise bi-temporal.

A análise de trajetórias revela os padrões anuais, inter-anuais e de longo prazo provenientes dessas séries temporais, que são úteis para a distinção entre a variabilidade natural da cobertura e suas mudanças (BRADLEY, et al., 2007). Para aprimorar o entendimento dessas variabilidades são requeridas medições das dinâmicas da vegetação desde a escala regional até global (ZHANG, et al., 2003).

Essas variações da dinâmica da vegetação mostram-se diretamente relacionadas aos impactos sobre os fluxos de matéria e energia, especialmente o carbono (DEFRIES, et al., 2002; ZHANG, et al., 2003; LAWRENCE, et al., 2004; OSBORNE, et al., 2004). A aquisição dessas informações relevantes para o monitoramento de longa duração dos padrões globais de vegetação passa pela obtenção de indicadores de atributos terrestres advindos de sensores orbitais. Essa obtenção deve ser quantificada com acurácia, considerando as datas de aquisição e a duração de seus intervalos de mudança, em outras palavras, resolução temporal (COPPIN, et al., 2004).

O aumento da resolução temporal dos sensores orbitais, como, por exemplo, o MODIS, proporcionou o incremento do conhecimento referente às dinâmicas da superfície terrestre, especialmente os estádios fenológicos e estimativas de cobertura natural (ZHANG, et al., 2003; JIN, et al., 2005; HANSEN, et al., 2005; HANSEN, et al., 2008; CARVALHO JUNIOR, et al., 2006, 2008, 2009; COUTO JUNIOR et al., 2011). A agricultura também foi beneficiada com informações relativas ao manejo e produtividade agrícola (SAKAMOTO, et

al., 2005; WARDLOW, et al., 2007; GALFORD, et al., 2008; SOARES, et al., 2008; OZDOGAN, 2010).

### 1.6.1. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DO SENSOR MODIS

Um avanço no sentido de aumentar a resolução temporal foi o lançamento do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que obtém a radiância da terra, da atmosfera, da criosfera e do oceano (JUSTICE, et al., 2002). É um espectroradiômetro com 36 bandas, abrangendo desde as radiações do visível até o infravermelho termal (Tab. 1.1), definidos para destacar as propriedades da vegetação, as propriedades das nuvens e a temperatura da superfície dos oceanos. Sua concepção proporcionou a avaliação das mudanças terrestres e suas consequências para a vida neste planeta, ampliando a visão sistêmica e integrada para a compreensão dos processos. Além disso, são oferecidos produtos georreferenciados e corrigidas dos efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis, entre outros (Tab. 1.2) (WOLFE et al., 1998; VERMOTE et al., 2002).

**Tab. 1.1** - Abrangência espectral e espacial do sensor MODIS.

Uso Primário	Banda	Comprimento de Onda <sup>1</sup>	Uso Primário	Banda	Comprimento de Onda <sup>1</sup>
Limites entre terra/nuvens/aerosol	1	0,620 - 0,670		20	3,660 - 3,840
	2	0,841 - 0,876	Temperatura superfície/nuvens	21	3,929 - 3,989
Propriedades da terra/nuvens/aerosol	3	0,459 - 0,479		22	3,929 - 3,989
	4	0,545 - 0,565		23	4,020 - 4,080
	5	1,230 - 1,250	Temperatura Atmosférica	24	4,433 - 4,498
	6	1,628 - 1,652		25	4,482 - 4,549
	7	2,105 - 2,155	Vapor de água em nuvens Cirrus	26	1,360 - 1,390
	8	0,405 - 0,420		27	6,535 - 6,895
	9	0,438 - 0,448		28	7,175 - 7,475
Cor do Oceano/Fitoplancton/ Biogeoquímica	10	0,483 - 0,493	Propriedades nuvens Ozônio	29	8,400 - 8,700
	11	0,526 - 0,536		30	9,580 - 9,880
	12	0,546 - 0,566	Temperatura superfície/nuvens	31	10,780 - 11,280
	13	0,662 - 0,672		32	11,770 - 12,270
	14	0,673 - 0,683		33	13,185 - 13,485
	15	0,743 - 0,753	Nuvens no topo da atmosfera	34	13,485 - 13,785
	16	0,862 - 0,877		35	13,785 - 14,085
Vapor de água na atmosfera	17	0,890 - 0,920		36	14,085 - 14,385
	18	0,931 - 0,941			
	19	0,915 - 0,965			

<sup>1</sup> Comprimento de Onda em  $\mu\text{m}$

\*Resolução espacial: 250 m (Bandas 1-2)

500 m (Bandas 3-7)

1000 m (Bandas 8-36)

**Tab. 1. 2** - Produtos específicos disponibilizados ao usuário final gratuitamente pela NASA.

CALIBRAÇÃO		PRODUTO	CRIOSFERA		PRODUTO
MOD 01	Nível 1-A		MOD 10	Cobertura de Gelo	
MOD 02	Nível 1-B		MOD 29	Cobertura de Gelo no Oceano	
MOD 03	Geolocation		<hr/>		
ATMOSFERA		PRODUTO	OCEANO		
MOD 04	Aerosol		MOD 18	Radiancia Normalizada da Água	
MOD 05	Vapor de Água		MOD 19	Concentração de Pigmentos	
MOD 06	Nuvens		MOD 20	Fluorescência de Clorofila	
MOD 07	Perfis Atmosféricos		MOD 21	Concentração de Pigmentos de Clorofila_A	
MOD 08	Grade Atmosférica		MOD 22	Radiação Fotossinteticamente Disponível	
MOD 35	Máscara de Nuvens		MOD 23	Concentração de Sólidos Suspensos	
<hr/>			MOD 24	Concentração de Matéria Orgânica	
TERRA		PRODUTO	MOD 25	Concentração de <i>Coccolith</i>	
MOD 09	Reflectância da Superfície		MOD 26	Coefficiente de Atenuação da Água do Oceano	
MOD 11	Temperatura e Emissividade da Superfície Terrestre		MOD 27	Produtividade Primária do Oceano	
MOD 12	Cobertura / Mudança da Cobertura da Terra		MOD 28	Temperatura da Superfície do Oceano	
MOD 13	Índices de Vegetação		MOD 36	Coefficiente de Absorção Total	
MOD 14	Anomalias Térmicas, Incêndios e Queima de Biomassa		MOD 37	Propriedades do Aerosol do Oceano	
MOD 15	Índice de Área Foliar e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa		MOD 39	Água Clara Epsilon	
MOD 16	Evapotranspiração				
MOD 17	Rede Fotossintética e Produtividade Primária				
MOD 43	Reflectância da Superfície				
MOD 44	Conversão da Cobertura Vegetal				

Este sensor está a bordo das plataformas TERRA e AQUA, lançadas, respectivamente, em 1999 e 2002, com ampla cobertura espacial e espectral, apropriadas para pesquisas referentes a mudanças globais (JUSTICE, et al., 2002). As imagens geradas por este sensor proporcionam o monitoramento da cobertura global quase em tempo real, com resolução espacial entre 250 e 1000 m e temporal entre 1 e 2 dias (JUSTICE, et al., 2002). Seus dados são disponibilizadas gratuitamente pela NASA, como mosaicos das melhores imagens encontradas dentro de intervalos temporais a cada oito dias até intervalos anuais (JUSTICE, et al., 2002). Essas imagens são disponibilizadas em formato *Hierarchical Data Format* (HDF) na projeção sinusoidal, demandando o MRTOOLS, também disponibilizado gratuitamente pela NASA, para sua conversão para o formato TIF e para projeção apropriada.

A riqueza de informações provenientes da alta resolução temporal deste sensor traz consigo as interferências atmosféricas, cobertura de nuvens, variação radiométrica (oscilação do sensor, iluminação solar, entre outros) ou presença de outros ruídos prejudica a consistência das séries temporais orbitais (HALL, et al., 1991; HILL, et al., 1991; DU, et al., 2001; FURBY, et al., 2001). Neste contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de tratamentos digitais visando reduzir a influencia destes ruídos.

Durante a década de 1980, o monitoramento de culturas agrícolas impulsionou o desenvolvimento em estudos voltados para a redução da razão ruído/sinal (VANDIJK, et al., 1987). O principal requisito para esse trabalho era a atenuação dos efeitos atmosféricos e de ângulos de visada, sendo testados seis algoritmos suavizadores em perfis de índices de vegetação. Foi constatado que quando os perfis são suavizados, os dois ou três últimos pontos

devem ser usados com restrições. Os autores indicaram que uma alternativa para minimizar esse efeito seria a disposição de perfis de índices de vegetação de anos consecutivos em uma série temporal contínua.

Na década subsequente, observou-se o emprego de séries temporais contínuas de índices de vegetação para a avaliação das características fenológicas de grandes áreas (REED, et al., 1994). Nesse estudo foram utilizadas séries temporais do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) do sensor AVHRR entre o período de 1989 e 1992. A atenuação dos ruídos presentes utilizou a aplicação estatística não linear (mediana), seguida de comparação de médias móveis autoregressivas (ARMA). Foram identificadas as variabilidades inter-anuais como início e máximo de crescimento foliar, bem com suas razões de senescência.

O conhecimento referente a séries temporais evidenciou a presença de artefatos, ou seja, problemas relacionados à atmosfera residual, efeitos bidirecionais, geométricos e sazonais (CIHLAR, et al., 1997). Os autores apresentaram o processamento “ABC3”, desenvolvido pelo Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (CCRS, sigla em inglês), de acordo com as seguintes etapas: a) correção atmosférica; b) identificação de *pixels* contaminados por nuvens, neve e sombra; c) correção da refletância bidirecional e emitância termal; d) restituição através de interpolação linear. Seus resultados apontaram uma redução de alguns dos problemas identificados, porém, servindo apenas como uma primeira aproximação, mostrando ainda limitado quanto às limitações do sensor.

Os conhecimentos acumulados nas duas décadas anteriores favoreceram o desenvolvimento de novos métodos para reduzir a contaminação atmosférica de séries temporais NDVI (CHEN, et al., 2004). A reconstrução dessas séries temporais foi baseada no filtro Savitzky-Golay, que empregam a convolução pelo método dos quadrados mínimos visando aprimorar a informação adquirida. Esse método mostrou-se mais efetivo quando comparado com o *Best Index Slope Extraction* (BISE) e o Ajuste Fourier, destacando-se para futuras aplicações em pesquisas relacionadas às mudanças ambientais globais, por exemplo, a extração da sazonalidade fenológica da vegetação. O entendimento desses ciclos fenológicos mostra-se fundamental para predizer com acurácia suas respostas em relação às variações do clima (ZHANG, et al., 2004).

A compreensão da fenologia da vegetação também se revela relevante para a avaliação da produtividade e manejo de culturas agrícolas (SAKAMOTO, et al., 2005). Esses autores propuseram o Filtro Wavelet para a determinação de Fenologia de Culturas (WFCP,

sigla em inglês), utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS. A partir dos dados tratados foram estimadas as datas de plantio, emergência, colheita e período de crescimento, com um erro médio quadrático de 12, 9, 10 e 11 dias, respectivamente. Este procedimento apresenta o potencial para a determinação das características fenológicas do arroz, necessitando de adaptações para diferentes espécies.

Observa-se que estas séries temporais mostraram-se fortemente influenciadas pelas variações sazonais, sendo necessária a seleção de coberturas específicas, informações dos períodos de referência, limiares e trajetórias de mudanças (VERBESSELT, et al., 2010). Com o propósito de superar este problema, foi apresentado um método de detecção e caracterização de Quebras para Aditivo de Sazonalidade e Tendência (BFAST, sigla em inglês), onde a série temporal é decomposta em tendência, sazonalidade e ruído. Utilizando dados provenientes do sensor MODIS, este método foi capaz de detectar e caracterizar mudanças espaciais e temporais em paisagens florestais da Austrália. Os autores destacam a importância do desenvolvimento de métodos simples, para evidenciar seu potencial de aplicação em sistemas de alerta.

Outro procedimento que apresentou eficiência foi o emprego da transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR), empregada para a atenuação dos ruídos presente em séries temporais mostra-se satisfatória para discriminação de distintos padrões temporais encontrados no bioma Cerrado (CARVALHO JUNIOR et al., 2006; COUTO JUNIOR et al., 2011). Estes trabalhos caracterizaram as variações ao longo do ano de Formações Florestais Perenes e Decíduas, Formações Savânicas e Áreas Convertidas pela ação antrópica. Estes comportamentos ao longo do tempo caracterizam a sazonalidade das coberturas, servindo de subsídio para o planejamento regional e monitoramento dos recursos naturais.

A utilização conjunta do filtro de mediana e a transformação FMR, permitiu a identificação satisfatória de padrões florestais, savânicos e campestres (CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009, 2012). Dentro destas fisionomias do Cerrado, foram identificados padrões temporais de NDVI das principais fitofisionomias presentes no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (CARVALHO JUNIOR et al., 2008). As formações florestais apresentaram as menores variações de NDVI e as maiores variações foram observadas nas formações campestres. Essas assinaturas temporais permitem o desenvolvimento de pesquisas em escala regional.

Estes procedimentos metodológicos permitiram a caracterização de padrões temporais das fitofisionomias, de acordo com a atividade fotossintética (CARVALHO JUNIOR et al., 2009). Esse estudo foi realizado no Campo de Instrução Militar de Formosa, região núcleo do Cerrado e evidenciou a sazonalidade associada à densidade da vegetação (Fig. 1.8). Convergindo com os resultados obtidos na Chapada dos Veadeiros (CARVALHO JUNIOR et al., 2008), as formações florestais, representadas pelas Matas de Galerias, apresentaram os maiores valores de NDVI, bem como as menores variações sazonais, devido à sua proximidade aos cursos d'água.

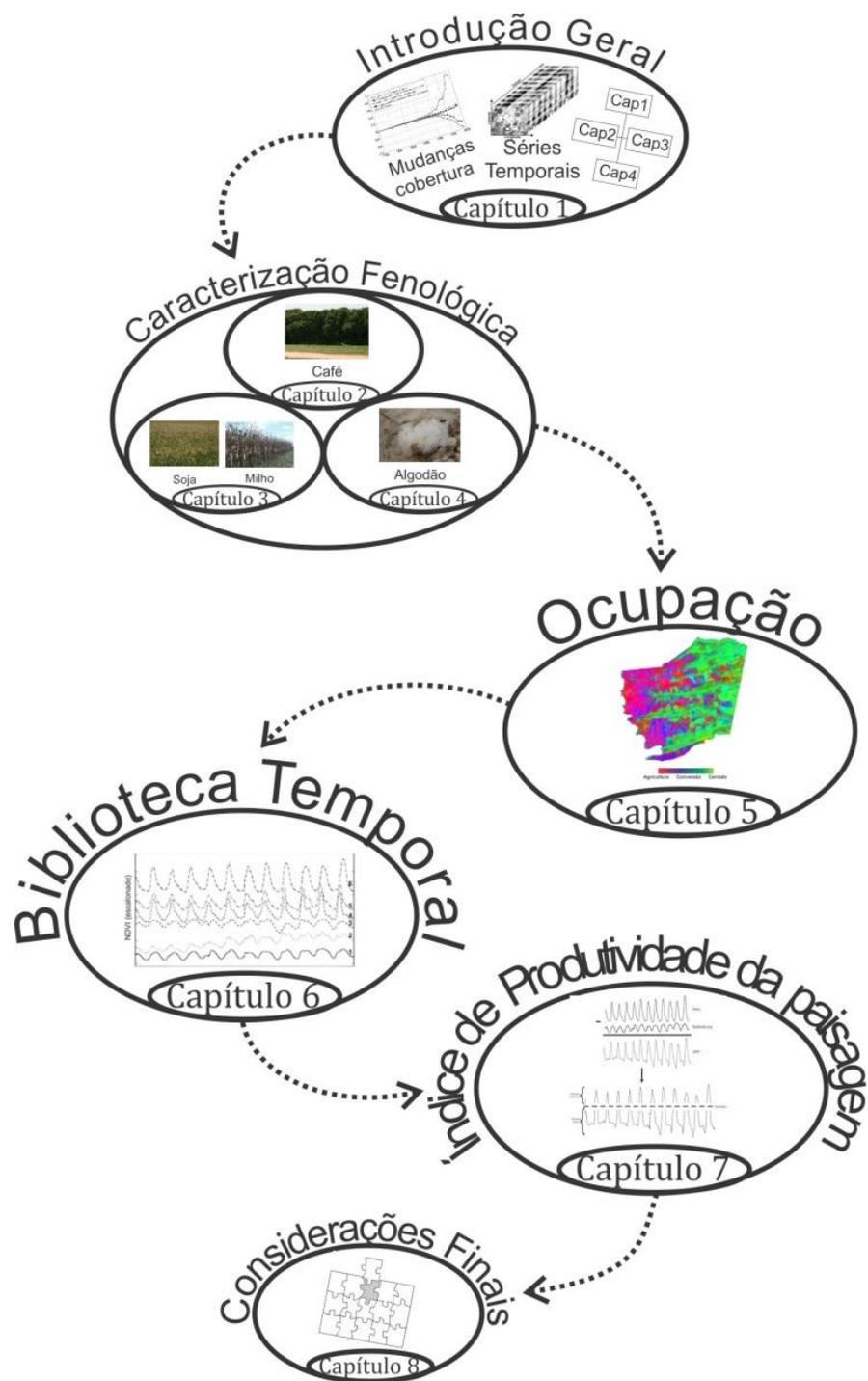
Também foi evidenciada a resiliência do Cerrado quanto a eventos de queimadas, por meio do comportamento de séries temporais NDVI (CARVALHO JUNIOR et al., 2009). Esse trabalho indicou que o classificador de Mínima Distância Euclidiana mostrou-se mais adequado para a classificação das fitofisionomias e o *Spectral Correlation Mapper* (SCM), permitiu evidenciar as feições típicas de eventos, como por exemplo, as queimadas (CARVALHO JUNIOR et al., 2009).

## **1.7. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A presente tese foi composta por artigos, no intuito de proporcionar a difusão do conhecimento científico, fortalecendo as diretrizes estabelecidas para os programas de pós-graduação no Brasil (Fig. 1.3).

No presente capítulo foram apresentadas as principais mudanças da cobertura ocasionadas pelas atividades da sociedade moderna, evidenciando desde os padrões globais até aqueles observados no Cerrado. Também foi destacado o emprego de séries temporais como alternativa para a avaliação da cobertura da terra e os principais avanços para sua utilização, especialmente do sensor *Moderate Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

Considerando a contextualização e a organização da tese, foram utilizadas séries temporais tratadas do sensor MODIS para a caracterização dos estádios fenológicos das principais culturas agrícolas encontradas no Cerrado da Ecorregião do Chapadão do São Francisco: café (Capítulo 2); soja e milho (Capítulo 3); e algodão (Capítulo 4). Estas culturas representam os sistemas de irrigação, plantio direto e convencional, respectivamente. Neste sentido, esses artigos científicos evidenciaram as variações interanuais e a sazonalidade desses sistemas, destacando os eventos fenológicos em função dos tratos culturais.



**Fig. 1.3** - Organização desta tese.

Os comportamentos ao longo do tempo das principais culturas apresentadas nos três primeiros artigos (Capítulos 2 a 4) proporcionaram a descrição da dinâmica da ocupação agrícola no Cerrado da mesorregião do Extremo Oeste Baiano (Capítulo 5). Este artigo evidenciou os comportamentos ao longo do tempo das principais coberturas da terra, destacando o Cerrado, a Conversão e a Agricultura.

A sistematização dos comportamentos da cobertura da terra ao longo do tempo apresentadas nos artigos anteriores proporcionou a estruturação da biblioteca de assinaturas temporais da ecorregião do Chapadão do São Francisco (Capítulo 6). Neste artigo foram identificados três ambientes temporais: Agrícola, Savânico e Floresta Estacional Decidual. Além disso, foram mapeadas as áreas das culturas agrícolas referentes aos principais sistemas de produção, servindo como subsídio para a avaliação de produção.

Os resultados dos artigos anteriores permitiram a geração de um artigo de integração da dinâmica da cobertura da terra e avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção (Capítulo 7). Neste artigo final foi concebido o Índice de Produtividade da Paisagem (IPP), fundamentado no comportamento temporal da vegetação. Esta abordagem favorece o entendimento sobre o funcionamento da paisagem e proporciona a compreensão de agroecossistemas sustentáveis. Por fim, foram apresentadas as considerações referentes aos resultados obtidos nesta tese, bem como os principais avanços e as perspectivas para a gestão dos recursos naturais em futuros empreendimentos dentro do Cerrado (Capítulo 8).

## REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. **Os domínios da natureza do Brasil - potencialidades paisagísticas**. 2ª. ed. São Paulo: Ateliê, 2003. 159 p.
- ARAÚJO, G.; HARIDASAN, M. A comparison of the nutritional status of two forests on dystrophic and mesotrophic soils in the Cerrado region of the central Brazil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, 19, 1988. 1075-1089.
- ARRUDA, M. B.; PROENÇA, C.E.B.; RODRIGUES, S.C.; CAMPOS, R.N.; MARTINS, R.C.; MARTINS, E.S. Ecorregiões, unidades de conservação e representatividade ecológica do bioma Cerrado. In: SANO, M. S.; ALMEIDA, S. M.; RIBEIRO, J. F. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Vol. 1. Planaltina: Embrapa Cerrados, Cap. 8, 2008. p. 230-272.
- BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E.E.; VIEIRA, H.R.; VALLADARES, G.S.; MANGABEIRA, J.A.C.; ASSIS, M.C. **Monitoramento da expansão agropecuária na região Oeste da Bahia**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. Documento 20, 2002. 40 p.
- BRADLEY, B.A.; JACOB, R.W.; HERMANCE, J.F.; MUSTARD, J.F. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, 106, 2007. 137-145.
- BROCKWELL, P.; DAVIS, R. **Time Series: Theory and Methods**. 2ª Edição. ed. Nova Iorque: Springer, 2006. 577 p.
- BRANDÃO, S.; REZENDE, G.; MARQUES, R. Crescimento agrícola no período 1999/2004: a explosão da soja e da pecuária bovina e seu impacto sobre o meio ambiente. **Economia Aplicada**, 10, n. 2, 2006. 249-266.
- BRANNSTROM, C.; JENPSON, W.; FILIPPI, A.M.; REDO, D; XU, Z.;GANESH, S. Land change in the Brazilian savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implication for land-use policy. **Land Use Policy**, 25, 2008. 579-595.

- BRASIL, A.; ALVARENGA, S. Relevô. In: DUARTE, A. **Geografia do Brasil**: Região Centor-Oeste. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. p. 53-72.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; HERMUCHE, P.; GUIMARÃES, R. Identificação regional da floresta decidual na bacia do Rio Paranã (GO/TO) a partir de análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, 24, n. 3, 2006. 319-332.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; SAMPAIO, C.S.; SILVA, N.C.; COUTO JUNIOR, A.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO, A.P.F.; SHIMABUKURO, Y.E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 505-517, 2008.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; COUTO JUNIOR, A.F.; SILVA, N.C.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, p. 399-412, 2009.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; SILVA, N.C.; CARVALHO, A.P.F.; COUTO JUNIOR, A.F.; SILVA, C.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; GOMES, R.A.T. Combining noise-adjusted principal components transform and median filter techniques for denoising modis temporal signatures. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, p. 147-157, 2012.
- CHEN, J.; JÖNSSON, P.; TAMURA, M.; GU, Z.; MATTSUSHITA, B.; EKLUNDH, L. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, 2004. 332-344.
- CIHLAR, J.; LY, H.; LI, Z.; CHEN, J.; POKRANT, H.; HUANG, F. Multitemporal, Multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies - artifacts and corrections. **Remote Sensing of Environment**, 60, 1997. 35-57.
- COUTO JUNIOR, A.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A., MARTINS, E., SANTANA, O.A., SOUZA, V.; ENCINA, J.I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, 35, n. 3, 2011. 699-705.
- COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, 25, n. 9, 2004. 1565-1596.
- DEFRIES, R.; TOWNSHEND, J. NDVI derived land cover classification at global scales. **International Journal of Remote Sensing**, 15, n. 17, 1994. 3567-3586.
- DEFRIES, R.S.; HOUGHTON, R.A.; HANSEN, M.C.; FIELD, C.B.; SKOLE, D.; TOWNSHEND, J. Carbon emission from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. **Proceedings of the National Academy of Science**, 99, n. 22, 2002. 14256-14261.
- DICKSON, B.; TAYLOR, G. Noise reduction of aerial gamma-ray survey. **Exploration Geophysics**, 29, 1998. 324-329.
- DELGADO, G. **Capital financeiro e agricultura no Brasil**. São Paulo: Unicamp, 1985. 240 p.
- DU, Y. CIHLAR, J.; BEAUBIEN, J.; LATIFOVIC, R. Radiometric normalization, composition and quality control for satellite high resolution image mosaic over large areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 39, 2001. 623-634.
- EITEN, G. The Cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Review**, 38, n. 2, 1972. 201-341.
- FELFILI, J.M.; REZENDE, A.V.; SILVA JUNIOR, M.C.; SILVA, M.A. Changes in the floristic composition of cerrado sensu stricto in Brazil over a nine-year period. **Journal of Tropical Ecology**, 16, 2000. 579-590.
- FERREIRA, L.; HUETE, A. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, 25, n. 10, 2004. 1837-1860.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION. **Global foresta resources assessment 2000 (FRA2000)**. Roma: FAO, 2001. 140 p.

FURBY, S.; CAMPBELL, N. Calibrating images from different dates to like-value digital counts. **Remote Sensing of Environment**, 77, 2001. 186-196.

GALFORD, G.; 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**, 112, 2008. 576-587.

GIRI, C.; ZHU, Z.; REED, B. A comparative analysis of the Global Land Cover 2000 and MODIS land cover data sets. **Remote Sensing of Environment**, 94, 2005. 123-132.

GOLDEWIJK, K.; RAMANKUTTY, N. Land cover changes over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data set. **GeoJournal**, 61, 2004. 335-344.

GREEN, A.A. BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 26, 1988. 65-74.

GUIMARÃES, E.; LEME, H. **Caracterização histórica e configuração espacial da estrutura produtiva do Centro-Oeste**. Campinas: Textos NEPO 33 - NEPO/UNICAMP, 1997. 85 p.

HALL, F.G.; STREBEL, D.E.; NICKESON, J.E.; GOETZ, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, 35, 1991. 11-27.

HANSEN, M.C.; TOWNSHEND, J.R.G.; DEFRIES, R.S.; CARROLL, M. Estimation of tree cover using MODIS data at global, continental and regional/local scales. **International Journal of Remote Sensing**, 26, n. 19, 2005. 4359-4380.

HELFAND, S.; REZENDE, G. **Padrões Regionais de Crescimento da Produção de grãos e o Papel da Região Centro-Oeste**. Brasília: IPEA. Textos para Discussão N° 731, 2000. 25 p.

HELFAND, S.; REZENDE, G. Mudanças na distribuição espacial da produção de grãos, aves e suínos no Brasil: o papel do Centro-Oeste. In: HELFAND, S.; REZENDE, G. **Região e espaço no desenvolvimento agrícola brasileiro**. Rio de Janeiro: IPEA, 2003. Cap. 1, p. 13-56.

HILL, J.; STURM, B. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural landcover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, 12, 1991. 1471-1491.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25, n. 3, 1988. 295-309.

JENPSON, W. A disappearing biome? Reconsidering land-cover change in the Crazilian savanna. **The Geographical Journal**, 171, n. 2, 2005. 99-111.

JIN, S.; SADER, S. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects. **Remote Sensing of Environment**, 99, 2005. 462-470.

JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and products status. **Remote Sensing of Environment**, 83, n. 1-2, 2002. 3-15.

KASPERSON, J.; KASPERSON, R. International Workshop on Vulnerability and Global Environmental Change: A workshop summary. 2001-01. Estocolmo: Stockholm Environment Institute (SEI). 2001.

KAUFFMAN, J.; CUMMINGS, D.; WARD, D. Relationship of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **The Journal of Ecology**, 82, n. 3, 1994. 519-531.

- KLINK, C.; MACHADO, R. Conservation of Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, 19, 2005. 707-713.
- LAMBIN, E.F.; TURNER, B.L.; GEIST, H.L.; AGBOLA, S.B.; ANGELSEN, A.; BRUCE, J.W.; COOMES, O.T.; DIRZO, R.; FISCHER, G.; FOLKE, C.; GEORGE, P.S.; HOMEWOOD, K.; IMBERNON, J.; LEEMANS, R.; LI, X.; MORAN, E.F.; MORTIMORE, M.; RAMAKRISHNAN, P.S.; RICHARDS, J.F.; SKANES, H.; STEFFEN, W.; STONE, G.D.; SVEDIN, U.; VELDKAMP, T.A.; VOGEL, C.; XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. **Global Environment Change**, 11, 2001. 261-269.
- LAMBIN, E.; GEIST, H.; LEPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover changes in tropical regions. **Annual Review of Environment Resources**, 28, 2003. 205-241.
- LAWRENCE, D.M.; SLINGO, J.M. An annual cycle of vegetation in a GCM. Part II: global impacts on climate and hydrology. **Climate Dynamics**, 22, 2004. 10-122.
- MANTOVANI, J.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura vegetal de Cerrado através de dados TM/landsat, Santos, 1998. 1455-1466.
- MISTRY, J. Fire in the Cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. **Progress in Physical Geography**, 22, n. 4, 1998. 425-448.
- OSBORNE, T.M.; LAWRENCE, D.M.; SLINGO, J.M.; CHALLINOR, A.J.; WHEELER, T.R. Influence of vegetation on the local climate and hydrology in the tropics: sensitivity to soil parameters. **Climate Dynamics**, 23, 2004. 45-61.
- OZDOGAN, M. The spatial distribution of crop types from MODIS data: temporal unmixing using Independent Component Analysis. **Remote Sensing of Environment**, 114, 2010. 1190-1204.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. **Global Biogeochemistry Cycles**, 13, n. 4, 1998. 997-1027.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J. Estimating historical changes in global land cover: croplands from 1700 to 1992. **Global Biogeochemistry Cycles**, 13, n. 4, 1999. 997-1027.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J.; OLEJNICZAK, N. People on the land: changes in global population and cropland during the 20th century. **Ambio**, 31, n. 3, 2002. 251-257.
- RATANA, P.; HUETE, A.; FERREIRA, L. Analysis of Cerrado physiologies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, 9, 2005. 1-21.
- RATTER, J.; RIBEIRO, J.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, 80, 1997. 223-230.
- REED, B.C.; BRWON, J.F.; VANDERZEE, D.; LOVELAND, T.R.; MERCHANT, J.W. OHLEN, D.O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of Vegetation Science**, 5, 1994. 703-714.
- REZENDE, G. **Ocupação agrícola e estrutura agrária no Cerrado: o papel dos recursos naturais e da tecnologia**. Brasília: IPEA. Texto para Discussão N°913, 2002. 28 p.
- RIBEIRO, J.; WALTER, B. Fitofisionomia do Bioma Cerrado. In: SANO, S.; ALMEIDA, S. **Cerrado: Ambiente e Flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. p. 89-166.
- ROERINK, G.; MENENTI, M.; VERHOEF, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, 21, n. 9, 2000. 1911-1917.
- RUNNING, S.W.; LOVELAND, T.R.; PIERCE, L.L.; NEMANI, R.R.; HUNT JR, E.R. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. **Remote Sensing of Environment**, 51, n. 1, 1995. 39-48.
- SALGADO-LABOURIAU, M. Late quaternary palaeoclimate in the savannas of South America. **Journal of Quaternary Science**, 12, 1997. 371-379.

- SAKAMOTO, T. YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, 96, 2005. 366-374.
- SALA, O.E.; CHAPIN III, F.S.; ARMESTO, J.J.; BERLOW, E.; BLOOMFIELD, J.; DIRZO, R.; HUBER-SANWAÇD, E.; HUENNEKE, L.F.; JACKSON, R.B.; KINZIG, A.; LEEMANS, R.; LODGE, D.M.; MOONEY, H.A.; OESTERHELD, M.; POFF, N.L.; SYKES, M.T.; WALKER, B.H.; WALKER, M.; WALL, D.H. Global diversity scenarios for the year 2100. **Science**, 287, 2002. 1770-1774.
- SANO, E.; PINHATI, F. Espaço rural do oeste baiano: identificação de áreas agrícolas sob sistema de plantio direto por meio de dados obtidos por câmera digital e satélite CBERS-2 CCD. **Geografia**, 34, n. 1, 2009. 117-129.
- SCHWARTZ, M.; REED, B. Surface phenology and satellite sensor-derived onset of greenness: an initial comparison. **International Journal of Remote Sensing**, 20, n. 17, 1999. 3451-3457.
- SELLERS, P.J.; LOS, S.O.; TUCKER, C.J.; JUSTICE, C.O.; DAZLICH, D.A., COLLATZ, G.J.; RANDALL, D.A. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameter from satellite data. **Journal of Climate**, 9, 1996. 706-737.
- SILVA, F. et al. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, 33, 2006. 536-548.
- SILVA, J.; BATES, J. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A tropical savanna hotspot. **Bioscience**, 52, 2002. 225-233.
- SINGH, A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, 10, n. 6, 1989. 989-1003.
- SOARES, D.M.; GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R. Crop area estimate from original and simulated spatial resolution data and landscape metrics. **Scientia Agricola**, 65, n. 5, 2008. 459-467.
- TOWNSHEND, J.; GOFF, T.; TUCKER, C. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing**, GE-23, n. 6, 1995. 888-895.
- TRIMBLE, S.; CROSSON, P. and use US soil erosion rates: myth and reality. **Science**, 289, 2000. 248-250.
- VANDIJK, A.; CALLIS, S.L.; SAKAMOTO, C.M.; DECKER, W.L. Smoothing vegetation index profiles: an alternative method for reducing radometric disturbance in NOAA/AVHRR data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 53, n. 8, 1987. 1059-1067.
- VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote Sensing of Environment**, 114, 2010. 105-115.
- VERBUG, P. VELDKAMP, A.; WILLEMEN, L.; OVERMARS, K.P.; CASTELLA, J.C. Landscape level analysis of the spatial and temporal complexity of land-use change. In: DEFRIES, R.; ASNER, G.; HOUGHTON, R. **Ecosystems and Land Use Change**. Washington: Geophysical Monograph Series, v. 153, 2004. p. 217-230.
- VERMOTE, E.; EL SALALEOUS, N.Z.; JUSTICE C.O. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, 83, 2002. 97-111.
- VIOVY, N.; ARINO, O.; BELWARD, A. The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series. **International Journal of Remote Sensing**, 13, n. 8, 1992. 1585-1590.
- VITOUSEK, P.; MOONEY, H.A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J.M. Human domination of earth's ecosystems. **Science**, 277, 1997. 494-499.

WARDLOW, B.; EGBERT, S.; KASTENS, J. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, 108, 2007. 290-310.

WESSELS, K.J.; PRINCE, S.D.; FROST, P.E.; VANZYL, D. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. **Remote Sensing of Environment**, 91, 2004. 47-67.

WOLFE, R.E.; ROY, D.P.; VERMOTE, E. MODIS land data storage, gridding, and compositing methodology: Level 2 grid. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36, 1998. 1324-1338.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 84, 2003. 471-475.

ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; SCHAAF, C.B.; STRAHLER, A.H. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. **Global Change Biology**, 10, 2004. 1133-1145.

## **CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DO CAFEIEIRO (*Coffea arabica* L.) UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO DO SENSOR MODIS**

**Resumo** – O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) possui um ciclo fenológico de dois anos, sendo importante seu conhecimento para a previsão de safra no Brasil. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a fenologia do cafeeiro utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS. Para este estudo foi utilizada uma cultura de café na microrregião do Extremo Oeste da Bahia, devido ao seu marcante desenvolvimento agroindustrial. Foram utilizadas séries temporais de 10 anos do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI). Essas séries mostraram-se limitadas por ruídos ocasionados por efeitos atmosféricos que prejudicam a discriminação dos alvos da superfície. Nesse sentido, foram utilizados em conjunto o filtro de mediana e a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) como procedimentos de tratamento dos dados. Os resultados evidenciaram o comportamento fenológico do cafeeiro, ou seja, sua assinatura temporal. A amplitude (sazonalidade) e a frequência (comprimento do ano fenológico) mostraram-se as principais variações entre os anos. A assinatura temporal do café mostrou-se similar à vegetação natural, porém, com valores maiores e com uma sazonalidade mais pronunciada. Observou-se que a atividade fotossintética e a fitomassa do dossel variaram pouco, de acordo com os valores de NDVI e EVI, mesmo durante os períodos de repouso e autopoda.

**Palavras-chave:** fisiologia do *Coffea arabica* L., índices de vegetação, assinaturas temporais, sensoriamento remoto.

### **PHENOLOGICAL CHARACTERIZATION OF *Coffea arabica* L. USING MODIS TIME SERIES**

**Abstract** – The *Coffea arabica* L. shows a two-year phenological cycle, important for this crop forecast in Brazil. This work aimed to characterize the coffee phenology using MODIS vegetation index time series. The study area is located in the western Bahia state due to its remarkable agroindustrial development. The time series comprehended 10-year Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI). However, these time series are usually contaminated by noise caused by atmospheric variations that are harmful to the surface discrimination. In this sense, a median filter and the Minimum Noise Fraction (MNF) were used together to smooth the original dataset. The results evidenced the phenological behavior, in other words, the coffee temporal signature. The amplitude (seasonality) and the frequency (phenological year length) were the main variation among the years. The coffee temporal signature was similar to the natural vegetation, but with higher vegetation index values and seasonality. The photosynthetic activity (NDVI) showed low variation and its canopy (EVI) seemed to be dependent on the senescence of the phenological cycle.

**Keywords:** *Coffea arabica* L. physiology, vegetation index, temporal signature, remote sensing.

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

O conhecimento referente aos diversos tipos de culturas agrícolas apresenta crescentes implicações econômicas, sociais, políticas e ambientais (Ozdogan, 2010). Estas características biofísicas e seus estádios fenológicos são informações relevantes para o planejamento de irrigação, a compreensão das trocas sazonais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), além da avaliação e modelagem da produtividade e da estimativa da rede primária de produção (Sakamoto et al., 2010; Kimball et al., 2004; Baunman et al., 2001).

Estes estudos fenológicos foram realizados com maior detalhamento nas zonas temperadas, sendo que nos trópicos mostra-se ainda incipiente, devido, principalmente, à falta de padronização dos métodos e de estudos de longa duração (Newstrom et al., 1994).

No caso das culturas agrícolas, seu acompanhamento é realizado a partir avaliações de campo, que apresentam alto custo e não fornecem informações suficientemente detalhadas referentes à sua distribuição espacial (Ozdogan, 2010). Visando minimizar essas limitações, o sensoriamento remoto vem sendo utilizado como ferramenta complementar para a detecção dessas variações sazonais, destacando-se os índices de vegetação (Galford et al., 2008; Wardlow & Egbert, 2008; Xavier et al., 2006; Sakamoto et al., 2005).

Os índices de vegetação mostram-se relacionados às variações biofísicas das plantas (Huete, 1985), sendo essas associadas à sazonalidade dos períodos dos eventos do ciclo da vida, caracterizando-se por sua duração, ocorrência, sincronia e simetria (Rathcke & Lacey, 1985). Em se tratando desses eventos, observa-se que a maioria das plantas emite suas inflorescências no mesmo ano fenológico, ao contrário do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), que leva dois anos para completar seu ciclo fenológico (Camargo & Camargo, 2011).

Tendo em vista a singularidade do ciclo do café e o potencial dos sensores orbitais de discriminar alvos na superfície terrestre, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a fenologia do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) utilizando série temporal de índices de vegetação do sensor MODIS.

### **2.1.1. Fenologia do cafeeiro (*Coffea arabica* L.)**

O cafeeiro arábica é uma planta nativa dos sub-bosques das florestas da Etiópia e sul do Sudão, em altitudes que variam entre 1.600 m e 2.000 m, em que a temperatura do ar oscila entre 18 °C e 20 °C e as chuvas anuais variam de 1.500 mm a 1.800 mm, sendo bem distribuídas, com um período seco de 4 a 5 meses ao ano (Livramento, 2010; Meireles et al., 2009).

No Brasil, toda a cafeicultura está situada em áreas com latitudes superiores a 4°, encontrando-se fenologicamente em condições tropicais/subtropicais, não equatoriais (Assad et al., 2001). O Bioma Cerrado já responde por cerca de 40% da produção nacional, contudo, é importante ressaltar a necessidade de aumentar a produtividade e a qualidade e alcançar a sustentabilidade da cafeicultura (Guerra et al., 2005a). Nesse bioma, estudos recentes estabeleceram o período e a magnitude do estresse hídrico para a sincronização e obtenção de florada uniforme em cafeeiros (Guerra et al., 2005b).

O café destaca-se por apresentar um ciclo fenológico que leva dois anos para se completar, sendo formados os ramos vegetativos no primeiro ano e no segundo ocorre a florada, formação dos chumbinhos, que precede a expansão dos grãos (Camargo & Camargo, 2001). Dentro os diversos modelos desenvolvidos para a esquematização da sequência das fases do café, o mais racional é dividido em seis fases (Camargo & Camargo, 2001), com duas fases no primeiro ano fenológico e quatro no segundo.

O esquema das fases fenológicas do café está relacionado às condições agrometeorológicas de cada ano, permitindo identificar quais as mais exigentes em água e as que necessitam de estresse hídrico para condicionar uma florada abundante (Camargo & Camargo, 2001). No primeiro ano fenológico, a primeira fase pode ser conhecida pela formação das gemas vegetativas, ocorrendo normalmente entre setembro e março, por serem meses de dias mais longos (Camargo, 1985). A segunda fase é caracterizada pela indução, diferenciação, crescimento e dormência das gemas florais, de abril a agosto, sendo que nos dois últimos meses as gemas dormentes produzem um par de folhas pequenas, marcando o primeiro ano fenológico (Camargo & Camargo 2001).

No segundo ano fenológico, a terceira fase (setembro a dezembro) inicia-se com a florada depois do choque hídrico, chegando até a expansão dos frutos (Camargo e Franco, 1981). A quarta fase ocorre entre janeiro e março com a granação (formação dos grãos), momento em que um estresse hídrico pode ser prejudicial ao desenvolvimento desses grãos (Meireles et al., 2009). A fase seguinte corresponde à maturação dos frutos, entre abril e junho, depende de um somatório de evapotranspiração potencial (ETp) de cerca de 700 mm, quando uma deficiência hídrica moderada beneficia o produto. A última fase é marcada pelo repouso e senescência (julho a agosto), sendo caracterizada pela autopoda, ou seja, ramos produtivos secam e morrem, limitando seu crescimento vegetativo (Camargo e Camargo, 2001).

No decorrer de suas fases fenológicas, o cafeeiro é afetado pela variação fotoperiódica, além da distribuição pluviométrica e temperatura do ar, que também interferem na produtividade e qualidade do produto. Dentre esses eventos climáticos, destacam-se as geadas, os veranicos frequentes e as deficiências hídricas prolongadas, que ocasionam grandes perdas na cafeicultura, tornando fundamental o monitoramento agrometeorológico (Meireles et al., 2009).

### **2.1.2. Monitoramento orbital do cafeeiro**

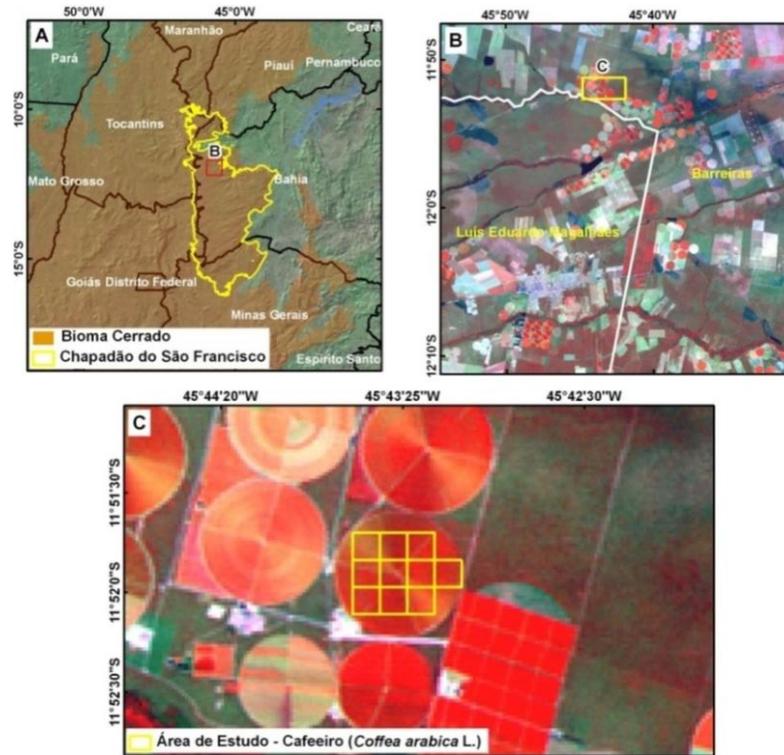
As culturas agrícolas tem seu desenvolvimento acompanhado a partir de avaliações de campo, que apresentam alto custo e não fornecem informações detalhadas de sua distribuição espacial (Ozdogan, 2010). Visando minimizar essas limitações, o sensoriamento remoto vem sendo utilizado como ferramenta de detecção e monitoramento de variações sazonais, com especial destaque aos índices de vegetação (Galford et al., 2008; Wardlow & Egbert, 2008; Xavier et al., 2006; Sakamoto et al., 2005). Os índices de vegetação mostram-se relacionados às variações biofísicas das plantas, integrando a atividade fotossintética e permitindo medição da variabilidade espacial e temporal (Asner, 1998; Huete, 1988; Huete et al., 1985).

No caso do cafeeiro, observa-se que até década de 1990 poucos estudos sobre utilização de imagens orbitais para a discriminação de café foram realizados (Tardin et al., 1992). Mesmo com a perenidade do café, a obtenção de uma melhor caracterização espectral está condicionada à subdivisão em classes, devido à sua heterogeneidade, e a realização de mapeamento nos meses mais secos (Moreira et al., 2004; Tardin et al., 1992).

O comportamento espectral de lavouras de café-formação (com idade inferior a cinco anos) pelo sensor Landsat 5-TM mostrou-se semelhante à pastagem nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho médio. O café-produção (com idade acima de cinco anos) apresentou variações tanto entre lavouras quanto entre anos, sendo importante destacar a necessidade da realização da análise espectral e temporal da reflectância para a identificação da variação da fitomassa (Moreira et al., 2004). As formas de monitoramento das lavouras cafeeiras e suas estimativas de safras mostram-se cada vez mais avançadas, especialmente em relação à dinâmica espaço-temporal de áreas cafeeiras (Moreira et al., 2011a), estudos dos parâmetros espectrais (Vieira et al., 2006; Machado et al., 2010) e a integração de diferentes sensores, como MODIS (Bernardes et al., 2011) e até mesmo o Google Earth (Moreira et al., 2011b).

## **2.2. ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo (Fig. 2.1C) está inserida dentro da Ecorregião do Chapadão do São Francisco (Arruda et al., 2006), dentro do Bioma Cerrado (Fig. 2.1A), com alto potencial para expansão da cafeicultura, desde que sistemas de produção sejam aperfeiçoados (Guerra et al., 2007). Grande parte dos plantios de café está localizada entre os municípios de Luis Eduardo Magalhães (LEM) e Barreiras (Fig. 2.1B), que, em conjunto, superam R\$ 1,5 bilhão de Produto Interno Bruto (PIB) da agricultura, além do marcante desenvolvimento da agroindústria (IBGE, 2008).



**Fig. 2.1** - Abrangência da Ecorregião Chapadão do São Francisco (linha branca) em relação ao Bioma Cerrado (A); Região com grande parte dos plantios de café (B); Plantio de café em pivô central, cada quadrado branco corresponde ao pixel (250x250m) do sensor MODIS (C).

Os solos são profundamente intemperizados e com baixa fertilidade natural, geralmente bem drenado, e com baixa capacidade de retenção de água, destacando-se os Latossolos Vermelhos, Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos (Batistella *et al.*, 2002).

A temperatura média anual varia entre 21,3° e 27,2°C e regime pluviométrico típico dos trópicos semi-úmidos, com duas estações definidas e precipitação média anual de 1500 mm, concentrada na estação chuvosa de outubro a abril (Meirelles, 2009).

## 2.3. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.3.1. Dados do sensor MODIS

O sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) está a bordo das plataformas TERRA e AQUA, disponibilizando imagens com alta resolução temporal, entre 1 e 16 dias, (Justice *et al.*, 2002), corrigidas dos efeitos atmosféricos (nuvens, aerossóis etc.) e georreferenciadas (Wolfe *et al.*, 1998). Dentre seus principais produtos, destaca-se o MOD13 referente aos índices de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), gerados a partir dos dados obtidos pela reflectância diária

de superfície (MOD09), nível 2, corrigidos para o espalhamento molecular, absorção de ozônio e aerossóis (Vermote et al., 2002). O MOD13 é uma composição temporal de 16 dias e gera os índices de vegetação, a partir das reflectâncias bidirecionais diárias em 250m, 500m e 1 km de resolução espacial.

A principal função da utilização de índices de vegetação e a atenuação das interferências advindas das variações do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, evidenciados quando são consideradas séries temporais. Se por um lado o NDVI mostra-se sensível à clorofila, por outro, o EVI é mais sensível às variações do Índice de Área Foliar (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete et al., 2002). Neste trabalho foram utilizados esses dois índices de vegetação, sendo que o NDVI pode ser apresentado pela seguinte formulação (Rouse et al., 1973):

$$\text{NDVI} = (r_{\text{IVP}} - r_{\text{V}}) / (r_{\text{IVP}} + r_{\text{V}}),$$

onde, “ $r_{\text{IVP}}$ ” é o valor da reflectância no infravermelho próximo (800-1100 nm) e “ $r_{\text{V}}$ ” é a reflectância na faixa do vermelho (600-700 nm). Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1, mostrando-se adequado para ambientes de cerrado (cerrado típico), cujo valor de IAF fica em torno de 1 (Miura et al., 2003).

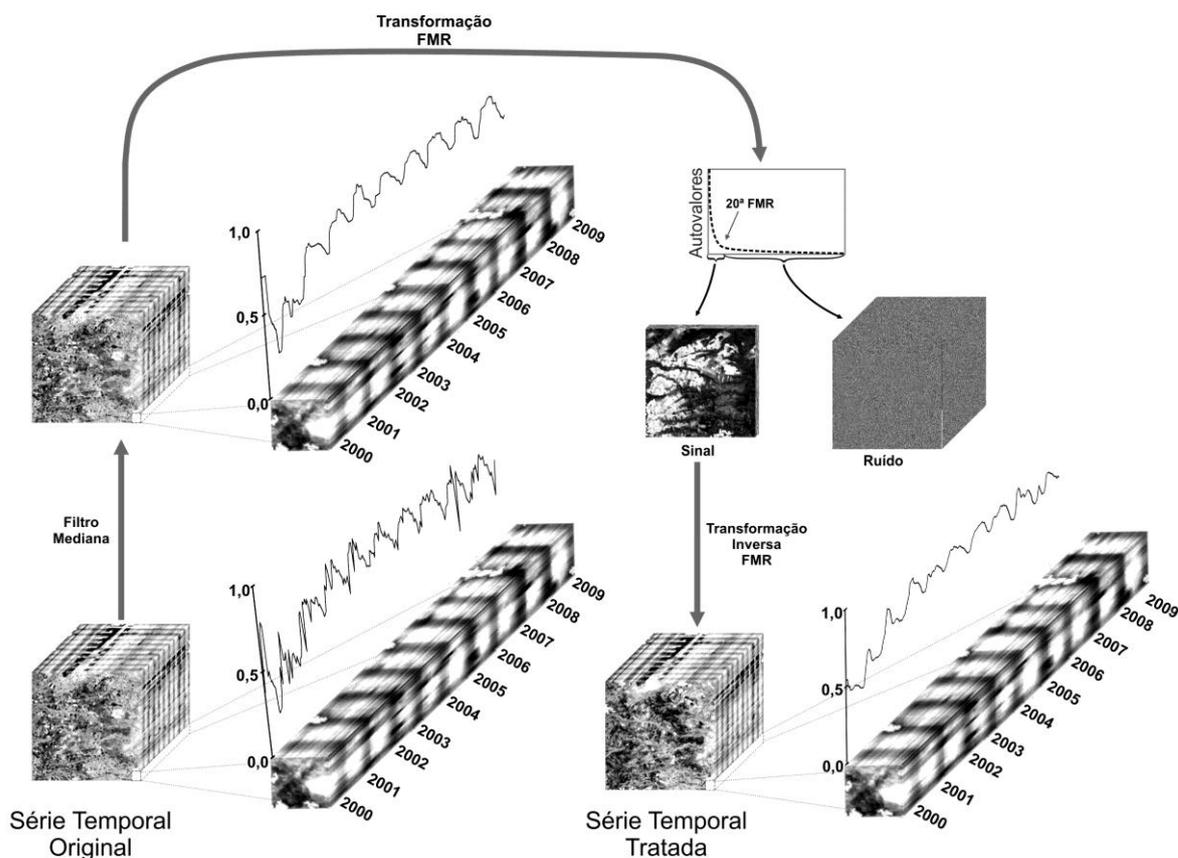
O EVI foi desenvolvido para evidenciar as regiões com alta biomassa, reduzindo a influência do solo e da atmosfera, sendo expresso pela seguinte formulação (Justice et al., 1998):

$$\text{EVI} = G \times [(r_{\text{IVP}} - r_{\text{V}}) / (r_{\text{IVP}} + C1r_{\text{V}} - C2r_{\text{A}} + L)]$$

em que:  $r_{\text{IVP}}$  e  $r_{\text{V}}$  são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do MODIS e o  $r_{\text{A}}$ , a reflectância da banda 3 (azul: 459-479 nm); C1 e C2 coeficientes de resistência atmosférica; L é o fator de correção de brilho do dossel; e G é o fator de ganho. Para o MODIS, esses valores são C1= 6; C2 = 7,5; L = 1; e G = 2,5 (Justice et al., 1998; Huete et al., 1994; 1997).

### **2.3.2. Construção das séries temporais e tratamento do ruído**

Foram organizadas séries temporais a partir dos índices de vegetação, com resolução espacial de 250 metros, relativa a um período de 10 anos de 2000 até 2010, totalizando 224 cenas. Para a obtenção dos espectros temporais, as imagens foram ordenadas uma forma tridimensional, onde os eixos X e Y representam as coordenadas geográficas e o eixo Z, o espectro temporal dos índices de vegetação (Fig. 2.2).



**Fig. 2.2** - Etapas do procedimento metodológico para geração de séries temporais tratadas.

Com o intuito de reduzir a influencia de ruídos oriundos de interferências atmosféricas (principalmente, nuvens e suas sombras) que prejudicam a discriminação dos alvos, foram aplicados os seguintes procedimentos: (a) emprego do filtro de mediana ao longo do espectro, e (b) emprego da transformação Fração Mínima de Ruído (FMR). O filtro de mediana utilizou uma janela móvel sobre as séries temporais e gerando valores de mediana. Organizando as observações em ordem crescente, a mediana será o valor central janela, requerendo operações não lineares simples. Complementarmente, foi aplicada a transformação FMR sobre as imagens de séries temporais, que concilia tanto os procedimentos de segregação da componente ruído como também de redução da dimensionalidade dos dados (Green et al., 1988). Essa sequencia metodológica foi aplicada com sucesso em séries temporais de índices de vegetação MODIS para a caracterização da vegetação do Cerrado (Carvalho Júnior et al., 2008, 2009). Também foram observados resultados satisfatórios utilizando apenas a transformação FMR para a caracterização de matas secas (Carvalho Júnior et al., 2006) e a caracterização temporal de áreas naturais e antrópicas (Couto Junior et al., 2011)

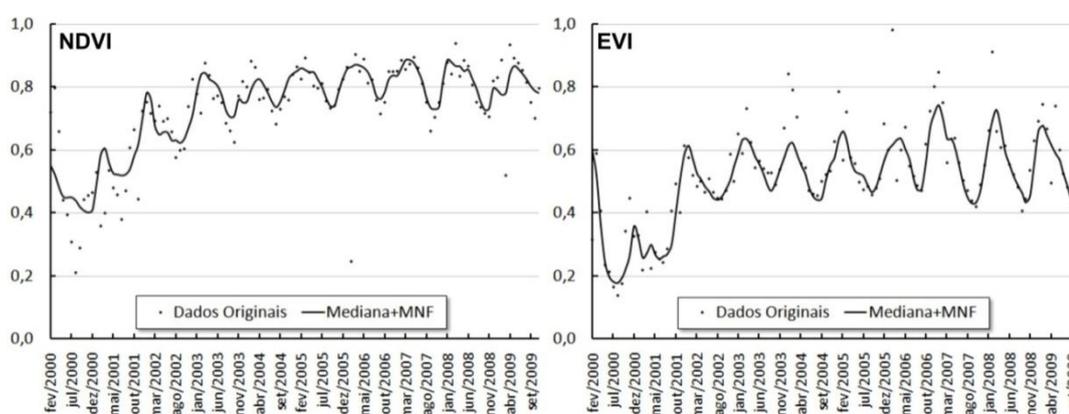
### 2.3.3. Séries temporais utilizadas para a caracterização fenológica do cafeeiro

Após a obtenção dessas séries temporais suavizadas, foram coletados os espectros temporais médios da área de estudo (Fig. 6.1) para cada índice de vegetação, correspondendo a uma área de 625.000 m<sup>2</sup>. A caracterização fenológica do cafeeiro foi realizada a partir dessas assinaturas temporais, tomando como referência o esquema das seis fases (Camargo & Camargo, 2001).

## 2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.4.1. Resultados do tratamento de ruído

Os resultados apontaram que o emprego do filtro de mediana ocasionou uma diminuição significativa da presença de ruídos de impulso, ou seja, áreas cobertas por nuvens ou suas respectivas sombras (Fig. 2.3). Complementarmente, o emprego da transformação FMR permitiu a eliminação dos ruídos brancos ainda persistentes, uma vez que o ordenamento é realizado de acordo com a razão sinal/ruído. As primeiras componentes são referentes à fração sinal e, as últimas, a fração ruído, evidenciado pelo gráfico de autovalores. Utilizando apenas a parte referente ao sinal (20ª componente FMR) foi realizada a transformação inversa do FMR, onde os espectros dos índices de vegetação retomam seus valores originais, porém com suas feições suavizadas, ou seja, com menor variação de ruídos.



**Fig. 2.3** - Efeito dos procedimentos metodológicos utilizados para tratar os dados originais (pontos pretos) e gerar séries temporais suavizadas (linhas pretas), para cada um dos índices de vegetação.

É possível observar que a utilização conjunta desses dois métodos permitiu a caracterização do comportamento temporal do cultivo de café (Fig. 2.3). Foi observado que os valores de NDVI apresentaram-se maiores que os de EVI, devido à saturação pela presença da

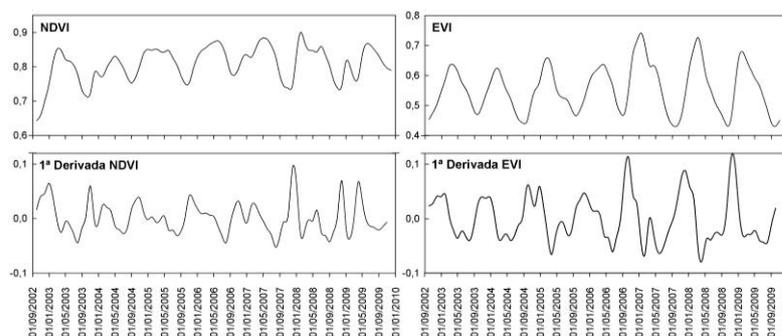
clorofila. Por outro lado, sua variação sazonal mostrou-se menor que a do EVI, evidenciando-se uma atividade fotossintética contínua. Infere-se pelos valores de NDVI que o cafeeiro mantém o processo de fotossíntese mesmo com a redução de sua fitomassa de dossel (Moreira et al., 2004), ocasionada pelos períodos de repouso ao final de cada ano fenológico (Camargo & Camargo, 2001).

#### 2.4.2. Resultado da caracterização fenológica do cafeeiro utilizando séries temporais

A partir das séries temporais dos índices de vegetação é possível destacar o café-formação e o café-produção (Moreira et al., 2001), sendo que o NDVI destaca-se dentre diversos processamentos, apresentando os Índices Global e Tau de acerto para as classificações de 0,42 e 0,31, respectivamente. O NDVI permite a visualização do café-formação, compreendido entre 2000 e 2002 (Fig. 2.3), representando atividade fotossintética crescente até o fim do segundo ano fenológico.

Desses 24 meses iniciais, o EVI apresentou incremento em seus valores apenas durante o primeiro ano fenológico, significando que seu dossel estava formado ao final desse período, recebendo uma menor influencia do solo. O café-produção manteve valores médios similares para cada índice de vegetação a partir de setembro de 2002. Em meados de 2007, observa-se maior variação entre os valores máximos e mínimos do EVI, ou seja, maior efeito da sazonalidade. Esse comportamento mostra-se associado ao adensamento do dossel, seguido por menor crescimento folha durante o repouso e senescência dos ramos terciários e quaternários por autopoda (Camargo & Camargo, 2001).

Além dessa variação de amplitude (sazonalidade), o comportamento dos índices de vegetação para o café-produção também apresentou variações em suas frequências (anos fenológicos). Considerando o NDVI, observa-se que o ciclo fenológico 2004-2006 apresentou comprimento proporcional entre os anos, com pequenas variações em sua fase de repouso ou autopoda, ao final de cada ano fenológico (Fig. 2.4).

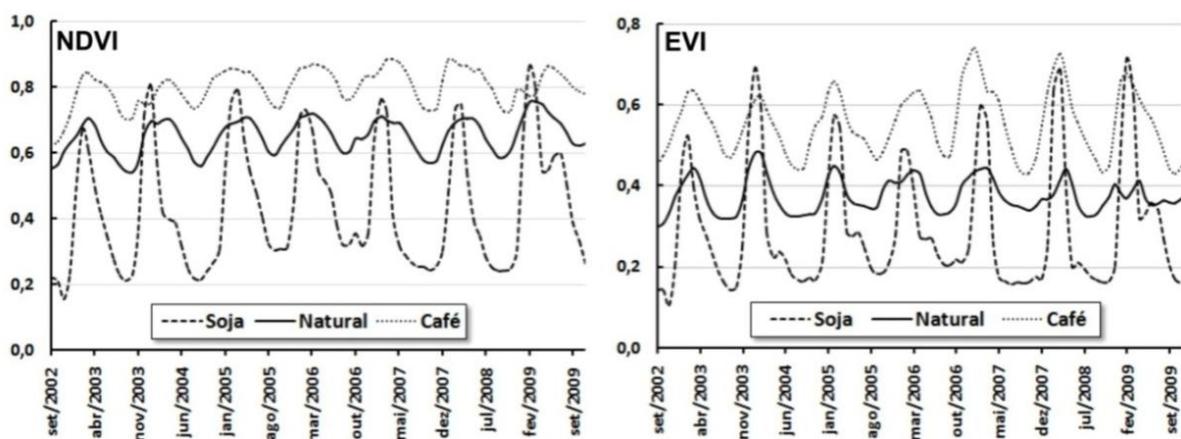


**Fig. 2.4** - Série temporal dos índices de vegetação referente ao café-produção (parte superior), acompanhada por suas respectivas derivadas (parte inferior).

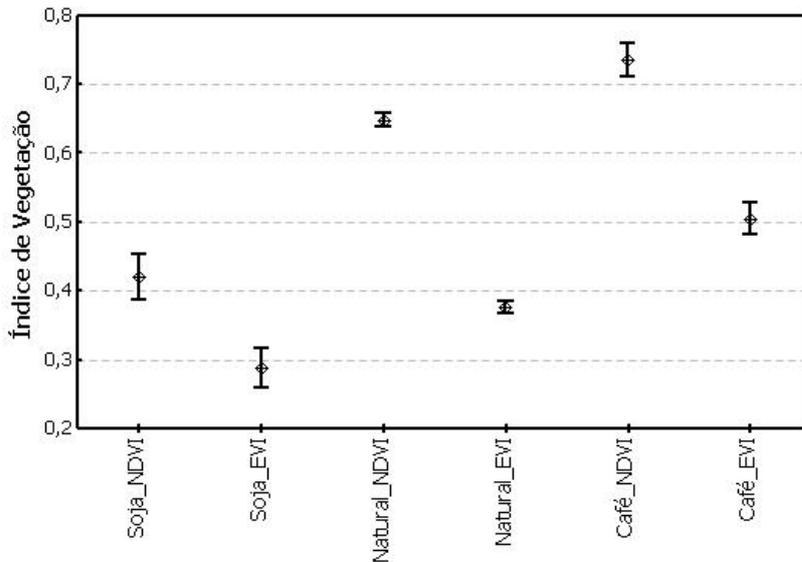
Observa-se que os valores de NDVI foram maiores no ano de 2006, indicando uma atividade fotossintética mais intensa de sua fitomassa (Fig. 2.4). Por outro lado, apresentou uma queda mais acelerada, ocasionada pela autopoda, ao final desse período e evidenciada por sua primeira derivada. Nos ciclos seguintes, a maior variação da atividade fotossintética ocorreu no segundo ano agrícola do ciclo 2006-2008, com rápido incremento influenciado por períodos com altas temperaturas e uma distribuição hídrica favorável (Livramento, 2010). Ainda segundo esse autor, a atividade fotossintética produz carboidratos para atender ao crescimento dos frutos, formação de novas folhas e ramos e crescimento radicular.

A alta similaridade de fitomassa de dossel observada durante o ciclo 2002-2004 é representada por pequenas variações na sazonalidade e comprimento do ano fenológico, destacadas tanto pelos valores de EVI, quanto por sua primeira derivada (Fig. 2.4). O ciclo 2004-2006 evidencia bienalidade do cafeeiro, onde os valores maiores desse índice apresentados no primeiro ano fenológico ocasionaram um maior comprimento do ano subsequente. Esse fato evidencia a bienalidade do cafeeiro, onde o crescimento vegetativo (formação de novas folhas) de um ano reflete na produção do ano seguinte (Livramento, 2010).

A assinatura temporal desses dois índices de vegetação mostra-se distinta quando relacionada a outros alvos encontrados na região (Fig. 2.5 e 2.6). Em comparação com a vegetação natural, seus valores de NDVI e EVI do café mostraram-se maiores e apresentaram variação sazonal pouco mais alta. Isso significa que sua atividade fotossintética manteve-se superior, mesmo com a senescência de ramos devido à autopoda (Camargo & Camargo, 2001). O plantio de soja destaca-se com as maiores variações entre as estações nos dois índices, sendo mais clara sua discriminação através das assinaturas temporais (Fig. 2.5 e 2.6).

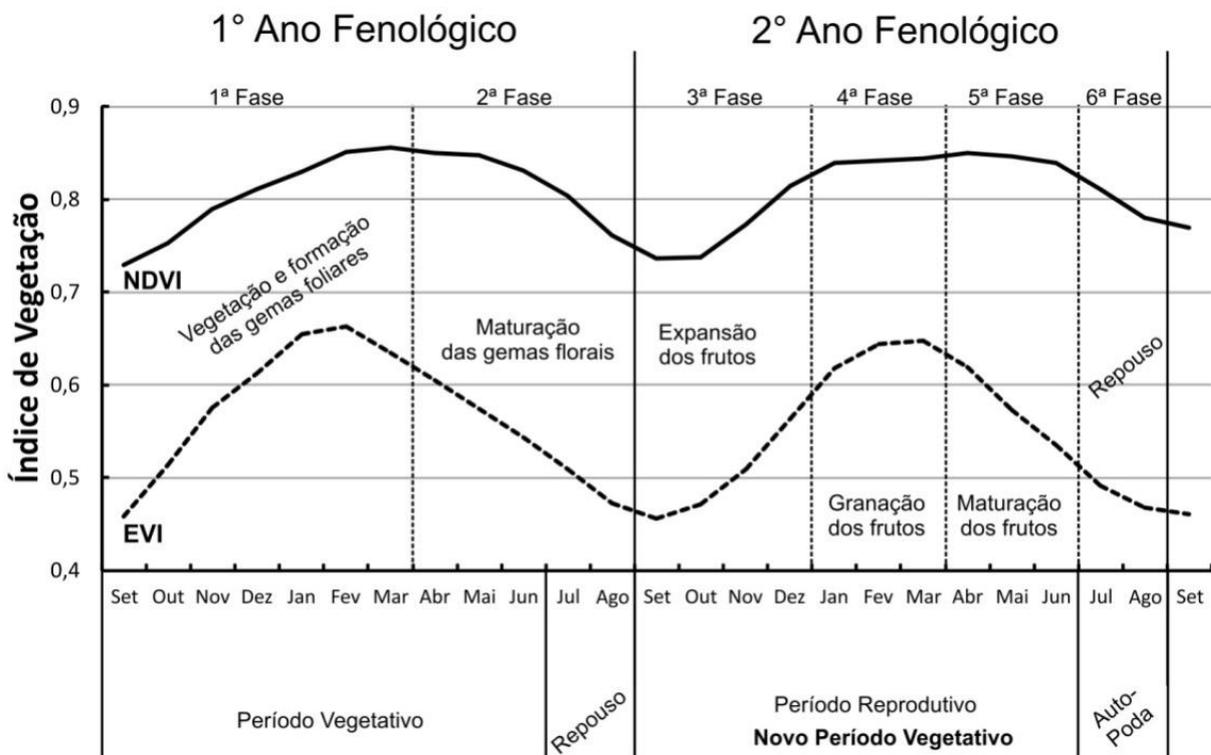


**Fig. 2.5** - Comparação entre a assinatura temporal do café, soja e vegetação natural.



**Fig. 2.6** - Valores médios de NDVI e EVI para o café, soja e área natural, acompanhado de seus respectivos desvios-padrão.

A partir das características dos dois índices de vegetação foi possível relacionar seus valores às seis fases fenológicas desenvolvido por Camargo & Camargo (2001) (Fig. 2.7). Para essa caracterização foi utilizada a média dos três biênios completos de café-produção (2002 a 2004, 2004 a 2006 e 2006 a 2008).



**Fig. 2.7** - Comportamento dos índices de vegetação em relação ao ciclo fenológico de 24 meses do cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.).

Observa-se que o NDVI mostrou-se valores superiores que o EVI e com menores variações sazonais, evidenciando a atividade fotossintética constante que a cobertura do dossel (Fig. 2.7). Nesse sentido, é possível destacar a relação entre o EVI e o dossel, durante o período vegetativo, especialmente na 1ª fase, onde se observa o crescimento vegetativo e formação de gemas foliares. Porém, seus valores tiveram uma redução de cerca de 30% durante os períodos de repouso e autopoda ao final de cada ano fenológico, associada à queda dos ramos terciários e quaternários.

## 2.5. CONCLUSÃO

A aplicação conjunta do filtro de mediana com a transformação Fração Mínima de Ruído (FMR) reduziu a influência dos ruídos presentes nas séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS.

A assinatura temporal para ambos os índices de vegetação (NDVI e EVI) do café apresentou variações em relação à amplitude (sazonalidade) e frequência (comprimento do período fenológico).

Em comparação com vegetação natural, a assinatura temporal do café apresentou valores de índices de vegetação maiores e sazonalidade mais pronunciada, representando maior atividade fotossintética e maior variação de dossel entre as estações, devido à senescência de ramos. O café evidenciou-se como cultura perene apresentando uma baixa amplitude em sazonal quando comparado com outro tipo de cultivo, como por exemplo, a soja, uma cultura anual.

Em relação ao esquema de seis fases fenológicas do cafeeiro, observa-se uma atividade fotossintética (NDVI) constante, mesmo com a redução da fitomassa do dossel (EVI), ocasionada pelos períodos de repouso e autopoda.

## REFERÊNCIAS

- ASSAD ED, EVANGELISTA BA, SILVA FAM, CUNHA SAR, ALVES ER, LOPES TSS, PINTO HS, ZULLO JUNIOR J. 2001. Zoneamento agroclimático para a cultura de café (*Coffea arabica* L.) no estado de Goiás e sudoeste do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Agroclimatologia**, 9:510-518.
- ASNER GP. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 64:234–253.
- ARRUDA MB, PROENÇA CEB, RODRIGUES S, MARTINS ES, MARTINS RC & CAMPOS RN. 2006. Ecorregiões, Unidades de Conservação e Representatividade Ecológica do Bioma Cerrado. In: SANO S, ALMEIDA SP (Org.). Cerrado: ambiente e flora 2 ed. Brasília: Embrapa, 2006, v. 1, 5-35.

- BATISTELLA M, GUIMARÃES M, MIRANDA, EE, VIEIRA HR, VALLADARES GS & MANGABEIRA JAC. 2002. Monitoramento da expansão agropecuária na Região Oeste da Bahia. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20, 39 pp.
- BERNARDES T, MOREIRA MA, ADAMI M. 2011. Aplicabilidade de dados MODIS no monitoramento de lavouras cafeeiras no Estado de Minas Gerais, Brasil. 2011. In: Simp. Bras. Sens. Remoto, XV: 2011, Curitiba. Anais... INPE: 2011. p. 637-637.
- BOUMAN BAM, KROPFF MJ, TUONG TP, WOPEREIS MCS, BERGE HFM & VAN LAAR HH. 2001. ORYZA2000: Modeling lowland rice. In: Manila, Philippines, International Rice Research Institute, p. 23-76.
- CAMARGO AP & CAMARGO MBP. 2001. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, 60:65-68.
- CAMARGO AP & FRANCO CF. 1985. Clima e fenologia do cafeeiro. In: Cultura de café no Brasil: manual de recomendações. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, Ministério da Indústria e Comércio, p.19-50.
- CAMARGO AP. 1998. As oito fases fenológicas da frutificação do cafeeiro. In: Congr. Bras. Pesq. Cafeeiras, 24: 1998, Poços de Caldas. Anais... Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1998, p.41-42.
- CARVALHO JUNIOR OA, HERMUCHE PM & GUIMARÃES RF. 2006. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÃ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, 24:319-332.
- CARVALHO JUNIOR OA, SAMPAIO CS, SILVA NC, COUTO JUNIOR AF, GOMES RAT, CARVALHO APF & SHIMABUKURO YE. 2008. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, 26:505-517.
- CARVALHO JUNIOR OA, COUTO JUNIOR AF, SILVA NC, MARTINS ES, CARVALHO APF & GOMES RAT. 2009 Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, 61:399-412.
- COUTO JUNIOR AF, CARVALHO JUNIOR OA, MARTINS ES, SANTANA OA, SOUZA VV & ENCINA JI. 2011. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, 35:699-705.
- GALFORD G, MUSTARD JF, MELILLO J, GENDRIN A, CERRI CC & CERRI CEP. 2008. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, 112:576-587.
- GREEN AA, BERMAN M, SWITZER P & CRAIG MD. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 26:65-74.
- GUERRA AF, ROCHA OC & RODRIGUES GC. 2005a. Manejo do cafeeiro irrigado no Cerrado com estresse hídrico. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, 65/66:42-45.
- GUERRA AF, ROCHA OC, RODRIGUES GC, SANZONOWICZ C, SAMPAIO JBR, SILVA HC & ARAÚJO MC. 2005b. Irrigação do cafeeiro no Cerrado: estratégia de manejo de água para uniformização de florada. Planaltina: Embrapa CPAC. Comunicado Técnico, 122, 4pp.
- GUERRA AF, ROCHA OC, RODRIGUES GC, SANZONOWICZ C, MERA AC & CORDEIRO A. 2007. Comportamento de três cultivares de café submetidas a diferentes espaçamentos entre linhas e regimes hídricos no Cerrado. Planaltina: Embrapa CPAC. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 188, 17pp.

- HUETE AR, JACKSON RD & POST DF. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, 17:37-53.
- HUETE AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25:295-309.
- HUETE, AR, JUSTICE C, LIU H. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, 49:224-234.
- HUETE AR, LIU HQ, BATCHILY K & VAN LEEUWEN W. 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, 59:440-451.
- HUETE AR, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ P, GAO X & FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 83:195-213.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 1990 a 2008. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). acesso em 26/09/2011.
- JUSTICE CO, TOWNSHEND JRG, VERMOTE EF, MASUOKA E, WOLFE RE, SALEOUS N, ROY DP & MORISETTE JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, 83:3-15.
- JUSTICE CO, VERMOTE E, TOWNSHEND JRG, DEFRIES R, ROY PD, HALL DK, SALOMONSON V, PROVETTE JL, RIGGS G, STRHALER A, LUCHT W, MYNENI B, KNYAZIKHIN Y, RUNNING WS, NEMANI RR, WAN Z, HUETE AR, LEEUWEN WV, WOLFE R E, GIGLIO L, MULLER JP, LEWIS P & BARNSLEY M 1998. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36(4):1228-1247.
- KIMBALL JS, MCDONALD KC, RUNNING SW & FROLKING SE. 2004. Satellite radar remote sensing of seasonal growing seasons for boreal and subalpine evergreen forests. **Remote Sensing of Environment**, 90:243-258.
- LIVRAMENTO DE. 2010. Morfologia e fisiologia do cafeeiro In: REIS PR, CUNHA RL (Ed). *Café Arábica do plantio à colheita* Lavras: EPAMIG, p 87-162
- MACHADO ML, ALVES HMR, VIEIRA TGC, FILHO EIF, LACERDA MPC. 2010. Mapeamento de áreas cafeeiras (*Coffea arábica* L.) da Zona da Mata Mineira usando sensoriamento remoto. **Coffee Science**, 5:113-122.
- MEIRELES E JL, CAMARGO MBP, PEZZOPANE JRM, THOMAZIELLO RA, FAHL JI, BARDIN L, SANTOS, JAPIASSÚ LB, GARCIA AWR, MIGUEL AE & FERREIRA RA. 2009. Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005 Embrapa Informação Tecnológica Brasília, 128p
- MIURA T, HUETE AR, FERREIRA LG & SANO EE. 2003 Discrimination and biophysical characterization of cerrado physiognomies with EO-1 hyperspectral hyperion In: Simp. Bras. Sens. Remoto, XI: 2003, Belo Horizonte. Anais... INPE: 2003. p. 1077-1082.
- MOREIRA MA, ADAMI M, RUDORFF BFT. 2004. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:223-231.
- MOREIRA MA, ADAMI M, BERNARDES T, RUDORFF BFT. 2011. Análise da dinâmica espaço-temporal da área cafeeira na região sul/sudeste de Minas Gerais nos anos safras 2006 a 2008. 2011. In: Simp. Bras. Sens. Remoto, XV: 2011, Curitiba. Anais... INPE: 2011. p. 489-496.
- MOREIRA MA, ADAMI M, RUDORFF BFT, BERNARDES T. 2011. Uso de imagens do Google Earth capturadas através do software stich map e do TM/Landsat-5 para mapeamento de lavouras cafeeiras – nova abordagem metodológica. In: Simp. Bras. Sens. Remoto, XV: 2011, Curitiba. Anais... INPE: 2011. p. 481-488.

- NEWSTROM LE, FRANKIE GW, BAKER HG. 1994. A new classification for plant phenology based on flowering patterns in lowland tropical rain forest trees at La Selva, Costa Rica. **Biotropica**, 26:141-159.
- OZDOGAN M. 2010. The spatial distribution of crop types from MODIS data: temporal unmixing using independent component analysis. **Remote Sensing of Environment**, 114:1190-1204.
- RATHCKE B & LACEY EP. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, 16:179-214.
- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium Greenbelt: NASA SP-351 301-317.
- SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, SHIBAYAMA M, ISHITSUKA N & OHNO HA. 2005. Crop detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, 96:366-374.
- SAKAMOTO T, WARDLOW BD, GITELSON AA, VERMA SB, SUYKER AE & ARKEBAUER TJ. 2010. A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, 114:2146-2159.
- TARDIN AT, ASSUNÇÃO GV, SOARES JV. 1992. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 27:1355-1361.
- VERMOTE E, EL SALEOUS N, & JUSTICE C. 2002. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. **Remote Sensing of Environment**, 83(1-2):97-111.
- VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M.; LACERDA, M. P. C.; VEIGA, R. D.; EPIPHANIO, J. C. N. 2006. Crop parameters and spectral response of coffee (*Coffea arábica* L.) areas within the state of Minas Gerais, Brazil. **Coffee Science**, 1:111-118.
- WARDLOW BD & EGBERT SL. 2008. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: an assessment for the US Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, 112:1096-1116.
- WOLFE RE, ROY DP & VERMOTE E. 1998. MODIS land data storage gridding and compositing methodology: level 2 grid. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36:1324-1338.
- XAVIER AC, RUDORFF BFT, SHIMABUKURO YE, BERKA LMS & MOREIRA MA. 2007. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, 27:755-768.

### **CAPÍTULO 3 – SÉRIES TEMPORAIS MODIS APLICADAS PARA CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DA SUCESSÃO SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) e MILHO (*Zea mays* L.) EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

**Resumo** – Os sensores orbitais com alta resolução temporal proporcionam identificar as etapas fenológicas dos cultivos agrícolas. O presente artigo teve como objetivo analisar séries temporais do sensor Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS) para a descrição das sucessões soja-milho e milho-soja em sistema de plantio direto. As imagens utilizadas são os produtos de reflectância de superfície composição de oito dias (MOD09), contendo sete bandas sobre um período de 12 anos (200-2011). A metodologia adotada pode ser subdividida nas seguintes etapas: (a) eliminação dos ruídos das séries temporais a partir da combinação do filtro de mediana com a Fração Mínima de Ruído (FMR), (c) elaboração dos índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Enhanced Vegetation Index (EVI) e Normalized Difference Water Index (NDWI); (c) análise estatística com o propósito de identificar a correspondência das séries temporais com as fases de sucessão de culturas soja e milho. Os dados temporais NDVI, EVI, e NDWI apresentam respostas sazonais similares para o cultivo de sucessão de milho e soja, mostrando-se consistentes com a fenologia das culturas. Os perfis temporais tratados evidenciaram os comportamentos ao longo do tempo, sendo que a soja como primeira cultura apresentou maiores valores para todos os índices avaliados. A soja apresentou em média um ciclo de 143 dias, com início da semeadura em 23 de outubro. O ciclo produtivo médio do milho como cultura principal foi 127 dias, com início em 08 de novembro.

**Palavras-chave:** Perfil temporal, dados orbitais, sucessão cultural, índices de vegetação.

#### **MODIS TIME SERIES APPLIED FOR PHENOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SOYBEAN-CORN SUCCESSION**

**Abstract** – The orbital sensors with high temporal resolution allowed improvements in the phenological stages characterization. This paper aimed to analyze time series from Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor for the soybean-corn rotation in the Cerrado biome. The images used are the MODIS surface reflectance 8-day composite products (MOD09), containing seven-band over a 12-year period (2000-2011). The methodology can be subdivided into the following steps: (a) noise elimination of time series combining the median filter with a Minimum Noise Fraction (MNF); (c) application of vegetation indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI); and (c) statistical analysis in order to identify the correspondence of the time series with the phases of crop rotation soybeans and corn. EVI, NDVI and NDWI temporal profiles show similar seasonal responses to crop rotation of corn and soybeans. Temporal signatures were consistent with the general phenological characteristics. The smoothed temporal profiles evidenced the behavior through the time and that the soybean as first crop showed the highest values for all vegetation indices evaluated. The soybean had an average 143-days cycle, beginning in October 23th. The average productive cycles of the maize as main crop was 127-days, starting in November 8th.

**Keywords:** Temporal profile, orbital data, crop succession, vegetation index.

### **3.1. INTRODUÇÃO**

A sustentabilidade dos agroecossistemas depende de manejos que minimizem a exposição do solo à erosão durante a entressafra e proporcionem cobertura da terra, como por exemplo, a adubação verde (CARVALHO et al., 2004). Esses adubos verdes promovem incrementos na produtividade das culturas subsequentes em cerca de 65 % (ARF et al., 1999). Neste contexto a sucessão de cultivos proporciona a manutenção do equilíbrio de nutrientes no solo, reduz a demanda por insumos agrícolas, além de permitir o aumento da área cultivada

no sistema de plantio direto (PASQUALETTO & COSTA, 2001; CARVALHO et al. 2004; REZENDE, 2011).

Dentre os principais produtos agrícolas produzidos no Brasil Central, destaca-se a soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e o milho (*Zea mays* L.), correspondendo a 41,2 % e 40,9 %, respectivamente, no acompanhamento de safra 2011/2012 (CONAB, 2012).

A produção de soja no Cerrado foi resultante de sua adaptação genética às baixas latitudes, por ser considerada uma planta de dia curto (EMBRAPA, 2010). Sua escala fenológica é fundamentada no desenvolvimento da haste principal, apresentando estádios vegetativos e reprodutivos (FEHR & CALVINNESS, 1977). A produção é dependente de fatores climáticos, em que: (a) a ocorrência de altas temperaturas e alta umidade ocasiona diminuição da qualidade da semente; (b) altas temperaturas e baixa umidade predis põem as sementes a danos mecânicos durante a colheita; e (c) baixa temperatura e alta umidade atraso na colheita (EMBRAPA, 2010).

O milho é plantado em praticamente todo o território nacional, sendo que mais de 70% da área plantada encontra-se nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (CRUZ et al., 2011). Considerando o aspecto fenológico, observa-se que subperíodos (vegetativos e reprodutivos) mostram-se relacionados às variações das condições ambientais, especialmente, a temperatura média do ar (GADIOLI et al., 2000). O método mais satisfatório para a determinação das etapas de desenvolvimento leva em consideração as exigências térmicas ou calóricas (FANCELLI & DOURADO-NETO, 1997).

Devido à importância dessas culturas na produção agrícola nacional torna-se fundamental desenvolver métodos para descrever seu comportamento biofísico no espaço ao longo temporal em escala regional. No entanto, esse monitoramento é baseado em relatórios de campo, mostrando-se insuficientes para evidenciar os padrões espaço-temporais. As observações visuais de fenologia em campo apresentam alto custo e são demoradas.

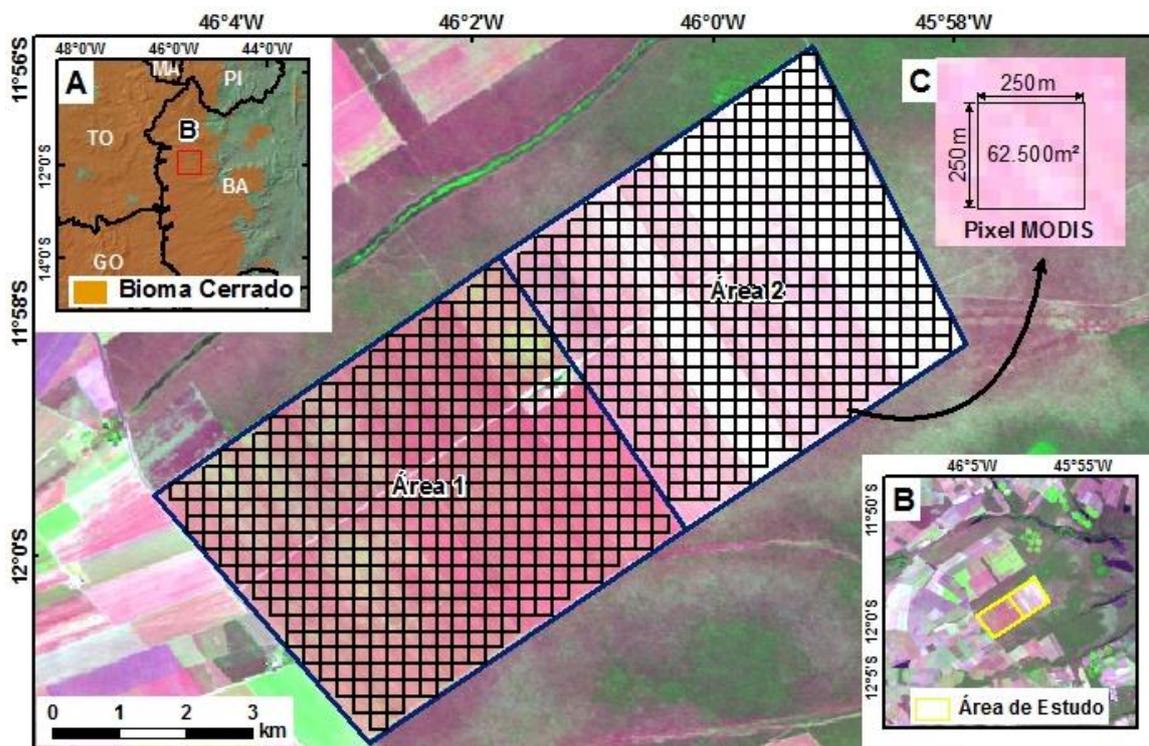
Nesse contexto, o sensoriamento remoto destaca-se neste processo de descrição regional dos padrões espaço-temporais do milho e soja. O emprego do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) possibilita este monitoramento por combinar resolução temporal elevada (cobertura repetição quase diária) com resoluções espaciais moderadas (ou seja, 250 m e 500 m). Este sensor vem sendo empregado para análise espaço-temporal tanto de áreas naturais (CARVALHO JÚNIOR et al., 2006, 2008, 2009; COUTO JUNIOR et al. 2011, JONATHAN et al. 2007; LACRUZ & SOUZA JÚNIOR, 2007, KANG et al., 2003; LATORRE et al. 2007; SANTANA et al., 2010; ZHANG et al., 2003),

como também, de áreas agrícolas (GALFORD et al., 2008; WARDLOW & EGBERT, 2008; OZDOGAN, 2010). Neste sentido, séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS têm sido utilizadas com sucesso para descrever os estágios fenológicos de diversos cultivos agrícolas: arroz (SAKAMOTO et al, 2005, 2006; XIAO, et al. 2005), cana de açúcar (AGUIAR et al. 2008; RAMME et al. 2010, XAVIER et al., 2006), batatas (ISLAM & BALA, 2008), milho e soja (SAKAMOTO et al. 2010).

O presente artigo teve como objetivo avaliar o comportamento temporal da sucessão soja e milho no sistema de plantio direto na região do Oeste da Bahia (bioma Cerrado) utilizando séries temporais de índice de vegetação do sensor MODIS.

### 3.2. ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho utilizou informações referentes à Fazenda Alvorada, localizada no município de Luís Eduardo Magalhães (LEM), inserido na mesorregião do Extremo Oeste da Bahia e dentro do Bioma Cerrado (Fig. 3.1).



**Fig. 3. 1** - Área de estudo dividida em Área 1 e 2, com a projeção dos quadrantes referentes aos pixels do sensor MODIS em relação à imagem Landsat TM5 (RGB-543), adquirida no dia 14 de julho de 2010; localização aproximada em relação ao Bioma Cerrado (A); entorno da área de estudo dentro do município de Luis Eduardo Magalhães (B); detalhe do pixel do sensor MODIS (250mx250m).

O clima predominante dessa região é úmido, apresentando duas estações bem definidas: estação seca e fria (maio a setembro) e chuvosa e quente (outubro a abril). A precipitação média anual é de cerca de 1500 mm e a temperatura média anual fica entre 21° e 27°C (INMET, 2012). No contexto geológico, a área encontra-se sobre o Grupo Urucuia, formado durante o Cretáceo e constituído quase que exclusivamente por arenitos de origem eólica (CAMPOS & DARDENNE, 1997). Os solos são bem intemperizados e drenados, apresentando baixa fertilidade natural, em um relevo plano (BATISTELLA et al., 2002). A vegetação é tipicamente de Cerrado (SANTANA et al. 2011).

A propriedade avaliada emprega o sistema de plantio direto em cerca de 5000 hectares, sendo dividida em duas áreas de acordo com a sucessão das culturas (Fig. 1). Ao longo do período avaliado, a Área 1 empregou a sucessão soja-milho com espaçamento entre linha de 0,76 m até 2008 e, de 2009 em diante, 0,5. A Área 2 (milho-soja) passou de um espaçamento entre linha de 0,9 até 2006 para 0,45, desta ano em diante. Considerando a projeção dos pixels do sensor MODIS, foram encontrados 428 pixels cobrindo a sucessão soja-milho e 386 a milho-soja.

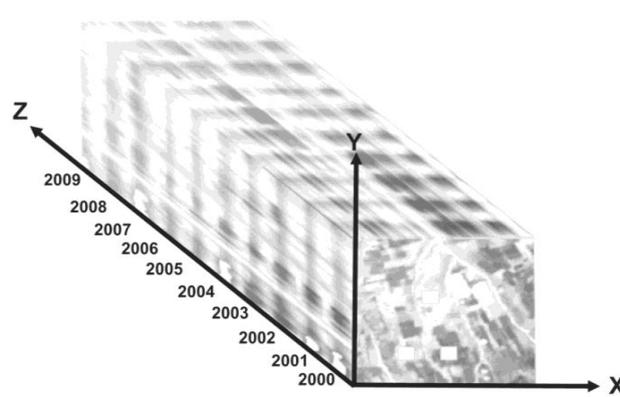
### **3.3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.3.1. Séries temporais do sensor MODIS**

Os dados orbitais oriundos do sensor MODIS proporcionam maior compreensão do funcionamento dos sistemas globais, principalmente, devido à sua alta resolução temporal (JUSTICE et al., 2002). Esses dados são disponibilizados gratuitamente pela *National Aeronautic Space Administration* (NASA) georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis, entre outros (VERMOTE, et al., 2002; WOLFE et al., 2002).

Neste trabalho foi utilizado o produto MOD09 (reflectância da superfície) composto por sete bandas: 1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm), 3 (459-479), 4 (545-565 nm), 5 (1230-1250 nm), 6 (1628-1652 nm), and 7 (2105-2155 nm). Os produtos utilizados são uma composição das melhores imagens dentro do período de 8 dias. As bandas 1 e 2 possuem uma resolução espacial de 250 metros, enquanto as demais possuem uma resolução de 500 metros. As bandas com menor resolução espacial foram reamostradas para 250 metros, com o propósito de padronizar as bandas em uma mesma dimensão. No presente trabalho foi avaliado o período de 12 anos, entre 2000 e 2011.

Para cada banda foram construídas séries temporais, onde a longitude é representada pelo eixo X, a latitude pelo eixo Y; e o tempo pelo eixo Z (Fig. 3.2). Isso permite estabelecer para cada pixel um perfil temporal, analogamente a curva espectral em dados hiperespectrais.



**Fig. 3.2** - Série temporal MODIS gerado a partir das imagens corrigidas dispostas em sequencia crescente.

Neste trabalho foram elaborados a partir das bandas MODIS três índices de vegetação: *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI (ROUSE et al., 1973); *Enhanced Vegetation Index* - EVI (HUETE et al., 1997) e *Normalized Difference Water Index* - NDWI (GAO, 1996). O NDVI é representado pela seguinte formulação:

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_{Ver}) / (\rho_{IVP} + \rho_{Ver}) \quad (1)$$

Em que,  $\rho_{IVP}$  é o valor da refletância no infravermelho próximo (banda 2: 841-876nm) e  $\rho_{Ver}$  é a refletância na faixa do vermelho (banda 1: 620-670 nm).

O EVI reduz a influencia do solo e da atmosfera, sendo expresso pela seguinte formulação (HUETE et al., 1997):

$$EVI = G \cdot [(\rho_{IVP} - \rho_{Ver}) / (\rho_{IVP} + C1 \cdot \rho_{Ver} - C2 \cdot \rho_{Azul} + L)] \quad (2)$$

Em que,  $\rho_{IVP}$  e  $\rho_{Ver}$  são as refletâncias das bandas 1 e 2 do MODIS e o  $\rho_{Azul}$ , a refletância do azul (banda 3: 459-479 nm); C1 e C2 coeficientes de resistência atmosférica; L é o fator de correção de brilho do dossel; e G é o fator de ganho. Para o MODIS, esses valores são C1= 6; C2 = 7,5; L = 1; e G = 2,5.

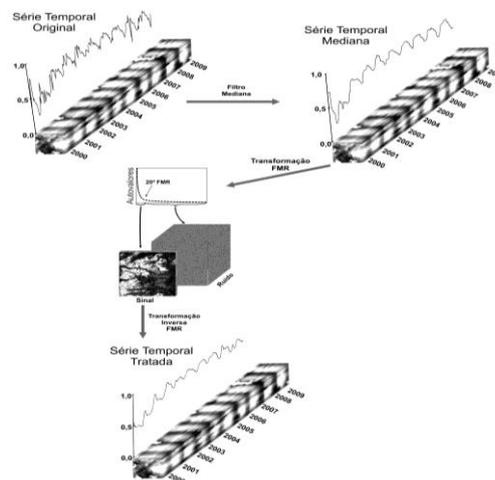
O NDWI evidencia o conteúdo de água na estrutura interna da folha, sendo expresso pela seguinte equação (GAO, 1996):

$$NDWI = (\rho_{IVP} - \rho_{IVC}) / (\rho_{IVP} + \rho_{IVC})$$

Em que,  $\rho_{IVP}$  é o valor da refletância no infravermelho próximo (banda 2: 841-876 nm) e  $\rho_{IVC}$  é o valor da refletância no infravermelho médio (banda 5: 1230-1250nm). O valor de  $\rho_{IVP}$  mostra-se afetado pela estrutura interna da folha e teores de matéria seca, e não pelo conteúdo de água. Por outro lado, a  $\rho_{IVC}$  reflete as mudanças tanto no conteúdo de água da vegetação como da estrutura do mesófilo esponjoso no dossel da vegetação. Nesse sentido, essa combinação remove as variações induzidas pela estrutura interna da folha e os teores de matéria seca, melhorando a precisão na recuperação do teor de água de vegetação (CECCATO et al., 2001). Esse índice foi utilizado com intuito de evidenciar o conteúdo de água em cultivos de soja e milho, sendo constatado que a utilização do comprimento de onda do infravermelho médio permitiu melhor monitoramento dos padrões de crescimento (CHEN et al. 2005). A sensibilidade do NDWI permitiu a separação de fitofisionomias do Cerrado segundo seus estratos vegetativos em ordem crescente, de acordo com o conteúdo de água (COUTO JUNIOR et al., 2010).

### 3.3.2. Tratamento do ruído

Mesmo após a geração de índices de vegetação, as séries temporais originadas na etapa anterior apresentaram limitações oriundas de cobertura de nuvens e outros tipos de ruídos. Visando reduzir a influência desses ruídos, foram realizadas três etapas de acordo com CARVALHO JUNIOR et al. (2012): (a) aplicação de um filtro móvel de mediana ao longo do tempo, (b) emprego da transformação Fração Mínima de Ruído (FMR), e (c) emprego da FMR inversa para a restituição dos parâmetros originais utilizando a fração sinal (Fig. 3).



**Fig. 3.3** - Sequencia metodológica aplicada para o tratamento das séries temporais MODIS.

O filtro de mediana é um método não linear, que realiza uma organização das observações em ordem crescente identificando o valor central. Considerando um ordenamento estatístico de  $N$  números reais,  $x(1) \cdots x(N)$ , em que  $N$  representa a janela do filtro digital, se o valor mínimo é  $x(1)$ , o máximo  $x(N)$ , sua mediana será  $M((N + 1) / 2)$ .

A Fração Mínima de Ruído (FMR) foi desenvolvida originalmente para o processamento de imagens hiperespectrais (GREEN et al., 1988). A FMR é uma transformação semelhante à Análise de Componentes Principais (ACP), porém possui a característica de maximizar a razão sinal/ruído para o ordenamento das imagens de acordo com a qualidade (CARVALHO JÚNIOR et al., 2002).

Para a transformação inversa FMR foi considerado o ponto de inflexão dos autovalores e a qualidade das imagens. Essa transformação tem o objetivo de retornar os valores referentes aos parâmetros das séries temporais, eliminando a presença do ruído branco (não-correlacionados e com baixa variância), bem como atenuação de possíveis níveis oriundos da filtragem de mediana.

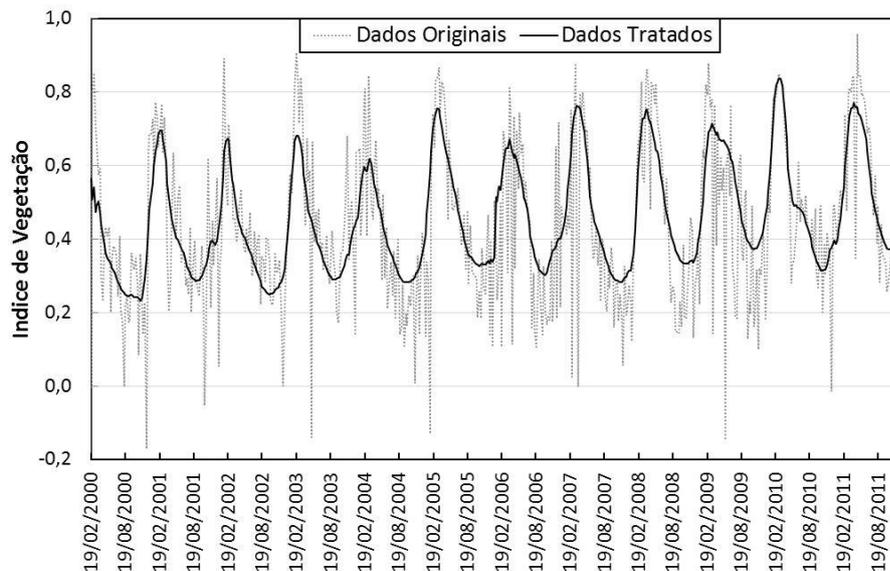
### **3.3.3. Análise estatística dos perfis temporais e a fenologia de sucessões culturais**

A partir dos perfis temporais tratados foi realizada análise estatística descritiva, por meio de histogramas de frequência referentes aos índices de vegetação avaliados dentro de cada sucessão (soja-milho e milho-soja). Complementarmente, foi realizada análise de correlação entre essas sucessões e entre os índices de vegetação. Após esta etapa descritiva foi gerado o comportamento temporal médio de ambas as sucessões, além de identificadas suas transições fenológicas e seus estádios fenológicos por meio da 1ª e 2ª derivadas, respectivamente.

## **3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.4.1. Resultados do tratamento de ruído**

Os resultados indicaram uma redução significativa da presença de ruídos relativos à presença de nuvens e de sombra (Fig. 3.4). O filtro de mediana com a janela 9x9 e passo um proporcionou a redução desses ruídos de impulso, no entanto, promoveu a geração de patamares devido à repetição de valores.

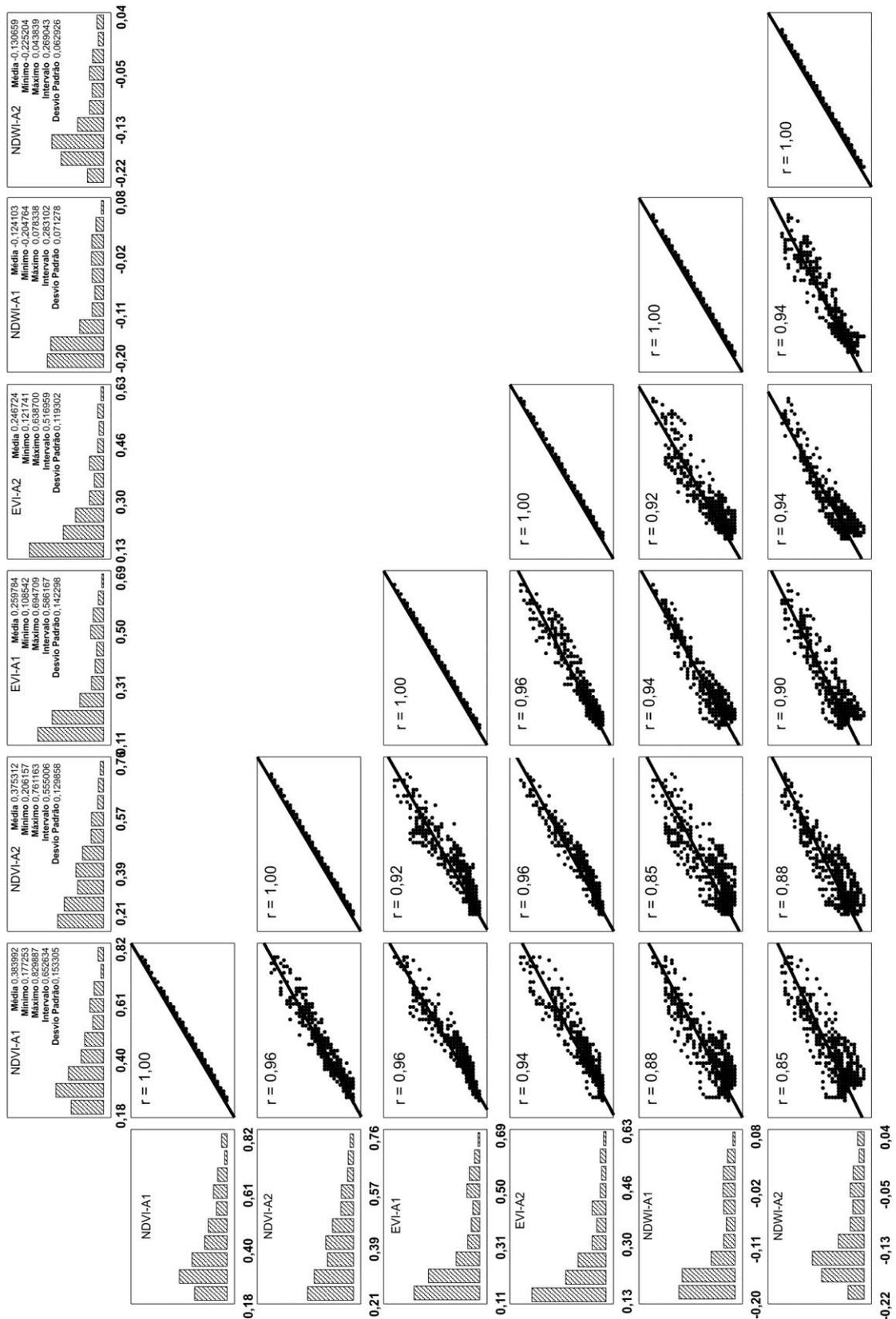


**Fig. 3.4** - Comparação entre os dados originais (linha pontilhada) e os dados tratados (linha preta).

O ordenamento dos dados seguiu a razão sinal/ruído, segregando a fração sinal nas 20 primeiras componentes, utilizada para a aplicação da transformação inversa da FMR, gerando um espectro suavizado sem a presença de ruídos brancos (ruídos sem correlação e de baixa variância) e dos eventuais pequenos patamares (sucessão de valores repetidos) gerados após a filtragem de mediana.

### 3.4.2. Resultados da análise estatística dos perfis temporais

Os histogramas evidenciaram a distribuição de frequência dos pixels ao longo de um período de 12 anos (Fig. 3.5). O eixo “Y” representou a número de pixels em uma determinada classe de valores de índices de vegetação (área) e o “X”, os comportamentos dos valores dos índices de vegetação ao longo do tempo. De uma forma geral, foi observada maior frequência de pixels com menores valores de índices de vegetação, com decréscimo em função do aumento dos valores dos índices de vegetação. Neste sentido, os valores inferiores caracterizaram o comportamento dos índices durante as estações secas ao longo dos anos estudados, e, conseqüentemente, os valores mais elevados, representaram o comportamento das estações chuvosas dentro intervalo avaliado. Esta tendência foi observada tanto na sucessão milho-soja (NDVI-A2 e EVI-A2), quanto na soja-milho (EVI-A1 e NDWI-A1) (Fig. 3.5). Por outro lado, nas sucessões soja-milho (NDVI-A1) e milho-soja (NDWI-A2) foram observados valores mais elevados na segunda e terceira classe de distribuição, respectivamente. Este fato indica que os valores destes índices, correspondentes às estações secas, apresentaram incremento de área com maior cobertura vegetal.



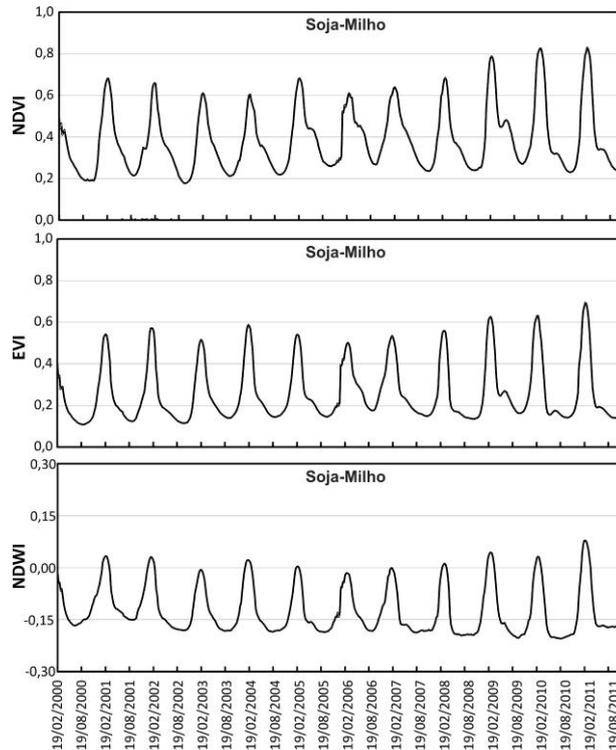
**Fig. 3.5** - Estatística descritiva considerando a distribuição de frequência dos pixels referentes à sucessão soja-milho (A1) e milho-soja (A2) em função do comportamento dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI), considerando um período de 12 anos; análise de correlação entre os índices de vegetação em uma determinada sucessão e entre sucessões.

Os valores máximos de todos os índices foram observados na sucessão soja-milho (Fig. 3.5), devido à arquitetura do dossel, fechamento do dossel e produção de biomassa. Essas características biofísicas também explicam os menores desvios padrões, para todos os índices, na sucessão milho-soja. Os valores de NDVI foram superiores aos de EVI em ambas as sucessões, devido à saturação pela clorofila.

A análise de correlação proporcionou tanto a avaliação do comportamento ao longo do tempo de um índice de vegetação em uma determinada sucessão, quanto a comparação entre diferentes sucessões. Observou-se forte correlação para todos os padrões dos índices, independente da ordem da sucessão (Fig. 3.5).

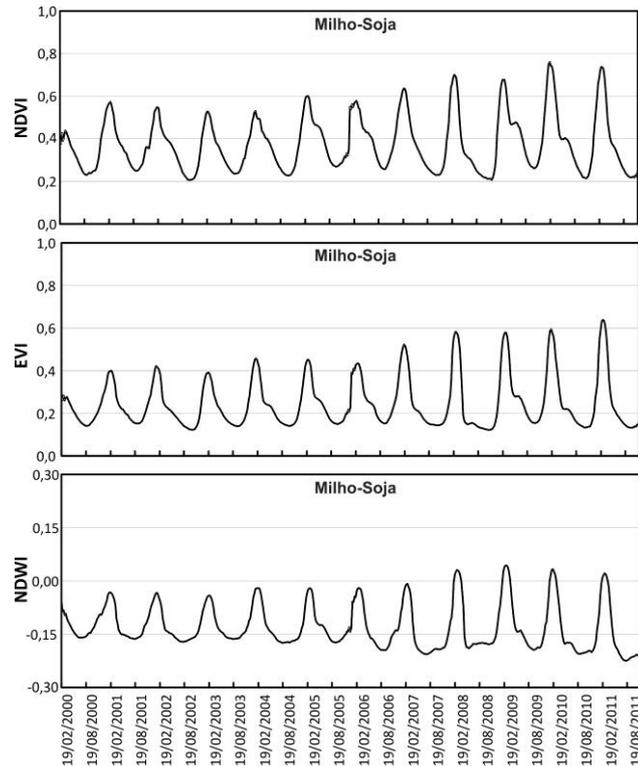
### **3.4.3. Resultados da fenologia das sucessões culturais**

As distribuições de frequência sintetizaram a dinâmica da fenologia em ambas as sucessões avaliadas e seus comportamentos fenológicos médios de foram apresentados em perfis temporais. Nesses perfis a amplitude representou a alternância entre os estágios dos tratos culturais, onde os picos representaram a época chuvosa, e os vales, a seca. Neste sentido, observou-se que durante a época chuvosa, a sucessão soja-milho apresentou valores de NDVI próximos a 0,75 até o ano de 2008, tendo sido observada uma elevação para 0,8 a partir de 2009, devida à redução do espaçamento entrelinhas (Fig. 3.6). Este incremento na densidade confirma o comportamento evidenciado pelo histograma de frequência NDVI relativos aos 12 anos (Fig. 3.5). Nesta distribuição foi observada uma redução na classe de valores inferiores a 0,25 na sucessão soja-milho e aumento no intervalo de valores entre 0,25 e 0,31 NDVI. Este aumento foi de 8 % na superfície coberta durante o período de menor produção de biomassa (maio a setembro) para a sucessão soja-milho, passando a cobrir 650 hectares. Considerando a estação chuvosa (outubro a abril), período de maior produção de biomassa, observou-se um incremento de pelo menos 2% da cobertura (78 ha). O padrão do EVI da sucessão soja-milho também acompanhou o comportamento identificado pelo perfil do NDVI, porém, com valores médios, mínimos e máximos inferiores, devido à redução do efeito de fundo do solo e interferência atmosférica. Também foi observado aumento nos valores de NDWI nos três últimos anos avaliados, ocasionando incremento no conteúdo de água foliar na sucessão soja-milho (Fig. 3.6).



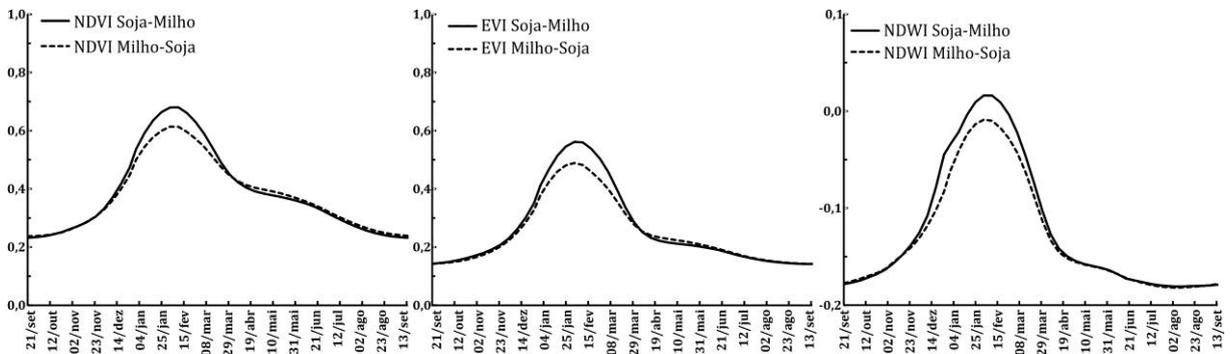
**Fig. 3.6** - Comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para a sucessão soja-milho.

Os perfis temporais (NDVI, EVI e NDWI) da sucessão milho-soja apresentaram padrões similares aos observadas na sucessão soja-milho, porém, com valores inferiores (Fig. 3.7). Além disso, também foi identificado o aumento da densidade do plantio a partir de 2008, quando foram observados maiores valores máximos dos índices de vegetação avaliados. Este incremento pode ser confirmado com a redução de cerca de 10 % da distribuição de valores de NDWI inferiores a -0,17, evidenciado no histograma de frequência (Fig. 3.5). Por outro lado, foi observado crescimento de 26 % dos pixels encontrados na classe de valores de NDWI entre -0,17 e -0,13. Este fato evidencia um aumento no conteúdo de água foliar na cobertura desta sucessão nos 12 anos avaliados. Neste sentido, foi possível destacar que a sucessão milho-soja, empregada em sistema de plantio direto, apresentou maior potencial de aumento da umidade da cobertura vegetal.



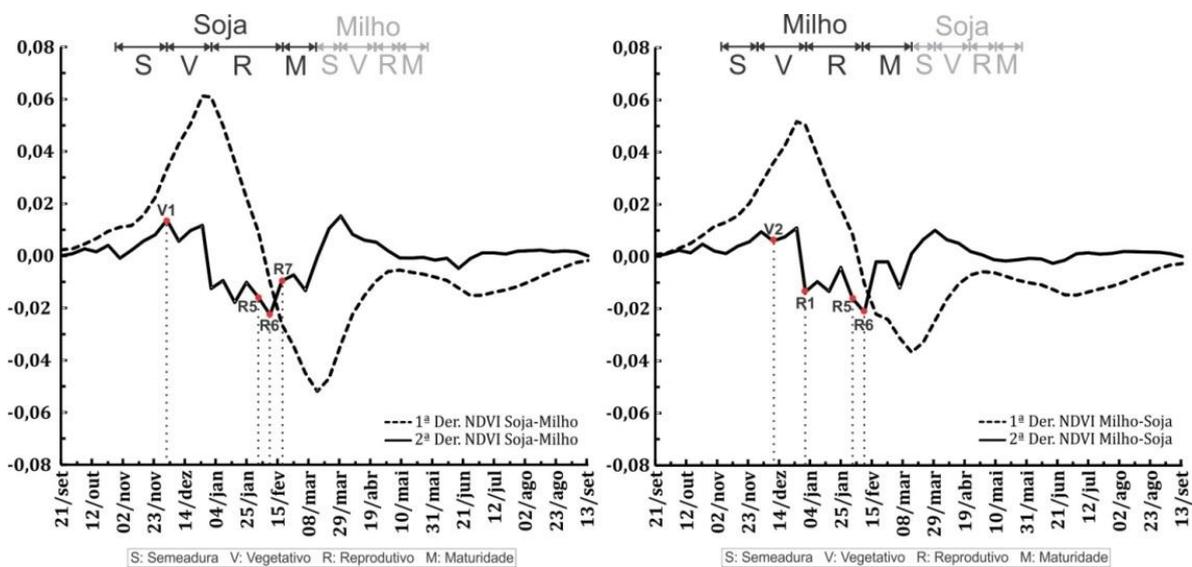
**Fig. 3.7** - Comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para a sucessão milho-soja.

Considerando os padrões ao longo de 12 anos estudados, foram gerados os perfis médios dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI) das sucessões avaliadas (Fig. 3.8). Nestes perfis, podem ser identificadas duas elevações, sendo que a primeira representa a primeira cultura da sucessão, e a segunda, mais suave, corresponde à segunda cultura. Para todos os índices a soja (primeira cultura) apresentou valores mais elevados do que os observados no milho, evidenciando sua maior produção de biomassa. Este comportamento também foi observado, porém, pouco acentuado, para o NDVI e o EVI da soja como segunda cultura.



**Fig. 3.8** - Comportamento temporal médio dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI referentes às sucessões soja-milho e milho-soja.

Dada a alta correlação entre os índices de vegetação, foram utilizados os perfis temporais médios de NDVI, de ambas as culturas, para caracterizar as principais transições fenológicas, por meio da 1ª derivada. As primeiras culturas, independente da sucessão, apresentaram maior amplitude em suas transições fenológicas do que as observadas nas segundas culturas (Fig. 9). A soja como primeira cultura apresentou maior variação entre o período vegetativo e a maturidade, confirmando o comportamento temporal médio caracterizado anteriormente (Fig. 8). As segundas culturas apresentaram comportamento similar entre si, sendo que as divergências mostraram-se relacionadas às diferenças entre as estruturas de seus dosséis.



**Fig. 3 9** - Fenologia das sucessões avaliadas, soja-milho (esquerda) e milho-soja (direita), considerando o comportamento médio do NDVI ao longo de 12 anos, as transições fenológicas foram evidenciada com a 1ª Derivada (linha segmentada) e os estádios fenológicos caracterizados pela 2ª Derivada (linha preta).

Os estádios fenológico foram identificados por meio da 2ª derivada, que evidenciou as taxas de variação entre os estádios (Fig. 9). Em ambas as sucessões, seus períodos vegetativos (V) foram marcados por taxas positivas e ascendentes, indicando um incremento biomassa. Os períodos reprodutivos (R) foram assinalados taxas negativas, que corresponderam à queda da produção de biomassa e maior investimento das estruturas reprodutivas. As segundas culturas, independente da sucessão, apresentaram taxas próximas à zero, evidenciando suas funções no sistema de plantio direto, principalmente para evitar a exposição do solo após a colheita. Além disso, este comportamento evidencia funções específicas, como repouso da terra (milho) e a incorporação de nitrogênio (soja).

Neste sentido, foi possível identificar o comportamento fenológico médio das sucessões, especialmente, das primeiras culturas (Tab. 3.1). Constatou-se que em média a soja como primeira cultura teve um ciclo de 143 dias e o milho, 127 dias. Dentro dos 12 anos estudados, a semeadura da soja ocorreu em período de 40 dias, com início no dia 23 de outubro. O milho apresentou um intervalo menor de semeadura, 24 dias, com início, em média, no dia 08 de novembro. Ambas as sucessões tiveram o mesmo intervalo em relação ao período vegetativo (V), com início, em média, no dia 2 de dezembro. O período reprodutivo (R) da soja foi, em média, de 40 dias, sendo considerado um dos momentos mais sensíveis em relação ao estresse ambiental (SAKAMOTO et al., 2010). Este período (R) teve um intervalo médio de 32 dias para o milho, sendo que durante o estágio R1 mostra-se sensível ao estresse hídrico. A maturidade (M) da soja teve início em 10 de fevereiro ao longo de 33 dias. O milho teve sua maturidade (M) a partir do dia 2 de fevereiro e com duração média de 41 dias.

**Tab. 3. 1** - Períodos fenológicos da 1ª cultura das sucessões avaliadas.

1ª Cultura	Transição Fenológica	Início	Término	Dias	Estádio	Data	Descrição
Soja	S	23/out	02/dez	40			
	V	02/dez	01/jan	30	V1	02/dez	Nós unifoliados completos
	R	01/jan	10/fev	40	R5	02/fev	Início da sementes
					R6	10/fev	Sementes completas
M	10/fev	14/mar	33	R7	18/fev	Início da maturidade	
Milho	S	08/nov	02/dez	24			
	V	02/dez	01/jan	30	V2	10/dez	Segunda folha completa
	R	01/jan	02/fev	32	R1	01/jan	Espigamento
					R5	02/fev	Granação
M	02/fev	14/mar	41	R6	10/fev	Peso seco máximo	

(S) Semeadura; (V) Período Vegetativo; (R) Período Reprodutivo; (M) Maturidade

### 3.5. CONCLUSÃO

O emprego conjunto do filtro de mediana combinado com a transformação inversa da Fração Mínima de Ruído (FMR) proporcionou ganhos para a caracterização o comportamento temporal dos índices de vegetação avaliados (NDVI, EVI, NDWI).

Os perfis temporais tratados evidenciaram os comportamentos ao longo do tempo das sucessões soja-milho e milho-soja, dentro do sistema de plantio direto. A soja como primeira cultura apresentou maiores valores para todos os índices avaliados. A soja apresentou em média um ciclo de 143 dias, com início da semeadura em 23 de outubro. O ciclo produtivo médio do milho foi 127 dias, com início em 08 de novembro.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, D.A.; RUDORFF, B.F.T., RIZZI, R., SHIMABUKURO, Y.E. 2008. **Monitoramento da colheita da cana-de-açúcar por meio de imagens MODIS**. Revista Brasileira de Cartografia, n 60/04, 375-383.
- ARF, O.; SILVA, L.S.; BUZZETTI, S.; ALVES, M.C.; SÁ, M.E.; RODRIGUES, R.A.F.; HERNANDEZ, F.B.T. Efeitos na cultura do trigo da rotação com milho e adubos verdes, na presença e na ausência de adubação nitrogenada. **Bragantia**, vol.58, p.323-334, 1999.
- BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E.E.; VIEIRA, H.R.; VALLADARES, G.S.; MANGABEIRA, J.A.C.; ASSIS, M.C. **Monitoramento da expansão agropecuária da Região Oeste da Bahia**. Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20, 41p., 2002.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 27, p. 269-282, 1997.
- CARVALHO JÚNIOR OA, CARVALHO APF, MENESES PR & GUIMARÃES RF. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise seqüencial da transformação por fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 20, n. 1, p. 31-41, 2002.
- CARVALHO JUNIOR, O.; HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F. Identificação regional da Floresta Estacional Decidual na Bacia do Rio Paranã a partir da Análise Multitemporal de imagem MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 319-332, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, O.; SAMPAIO, C.S, SILVA, N.C.; COUTO JUNIOR, A.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO, A.P.F.; SHIMABUKURO, Y.E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 26, p.505-517, 2008.
- CARVALHO JUNIOR, O.; COUTO JUNIOR, A.F.; SILVA, N.C.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, p. 399-412, 2009.
- CARVALHO, M.A.C.; ATHAYDE, M.L.F.; SORATTO, R.P.; ALVES, M.C.; ARF, O. Soja em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 39, n.11, p.1141-1148, 2004.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S; JACQUEMOUD, S.; GREGOIRE, J.M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote sensing of Environment**, vol. 77, p. 22-33, 2001.
- CHEN, D.; HUANG, J.; JACKSON, T.J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote sensing of Environment**, vol. 98, 225-236, 2005.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: grãos sétimo levantamento. 37p. 2012.
- COUTO JUNIOR, A.F., SOUZA, V.V.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; SANTANA, O.A.; FREITAS, L.F.; GOMES, R.A.T. Integração de parâmetros morfométricos e imagem ASTER para a delimitação das fitofisionomias da Serra da Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 11, n.1, p.57-68, 2010.
- COUTO JUNIOR, A., CARVALHO JUNIOR, O., MARTINS, E., SANTANA, O., SOUZA, V., & ENCINA, J. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, vol. 35, p.699-705, 2011.
- CRUZ, J.C.; CAMPANHA, M.M.; COELHO, A.M.; KARAM, D.; PEREIRA FILHO, I.A.; CRUZ, I.; GARCIA, J.C.; PIMENTEL, M.A.G.; GONTIJO NETO, M.M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COSTA, R.V.; ALVARENGA, R.C.; QUEIROZ, V.A.V. Boas práticas agrícolas: milho. **Documentos 199**, Embrapa – Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, 48 p., 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SOJA 2011. **Tecnologia de produção de soja – região central do Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 255 p., 2010.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Milho: ecofisiologia e rendimento. In: GALVÃO, J.C.C. & MIRANDA, G.V. (Org.) **Tecnologia da produção de milho**. 1. ed. Piracicaba: Editora UFV, 1997. p.157-170.

FEHR, W.R.; CALVINESS, C.E. Stages of soybean development. **Special Report**, n.80, Iowa, ISU, 1977.

GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCIA, A.G.; BASANTA, M.V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agricola**, vol. 57, n.3, p.377-383, 2000.

GALFORD, G.; 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**, vol.112, p.576-587, 2008.

GAO, B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, vol.58, p.257-266, 1996.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol.26, n.1, p.65-74, 1988.

HUETE, A.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol.59, p.440-451, 1997.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Climatologia. Disponível em <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em 09 de setembro de 2012.

JONATHAN, M.; MEIRELLES, M.S.P.; BERROIR, J.P.; HERLIN, I. Considerações para o monitoramento do uso do solo com dados MODIS para longos períodos e em escala regional, e sua aplicação na bacia do alto Taquari, MS/MT. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/01, p.1-7, 2007.

JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, p. 3-15, 2002.

KANG, S.; RUNNING, S.W.; LIM, J., ZHAO, M.; PARK, C.; LOEHMAN, R. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: An application of MODIS leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, vol. 86, p. 232– 242, 2003.

LACRUZ, M.S.P.; SOUSA JÚNIOR M.A. 2007. Uso de séries temporais EVI/MODIS e análise harmônica para o estudo da bacia do rio Taquari. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/01, p. 9-15.

LATORRE, M.L.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; SANTOS, J.R.; SHIMABUKURO, Y.E. Integração de dados de sensoriamento remoto multi-resoluções para a representação da cobertura da terra utilizando campos contínuos de vegetação e classificação por árvores de decisão. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.25, n.1, p. 63-74, 2007.

OZDOGAN, M. The spatial distribution of crop types from MODIS data: temporal unmixing using independent component analysis. **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, p.1190-1204, 2010.

PASQUALETO, A.; COSTA, L.M. Influencia de sucessão de culturas sobre características agrônômicas do milho (*Zea mays* L.) em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, vol. 31, p.61-64, 2001.

RAMME, F.L.P.; LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Engenharia Agrícola**, vol. 30, n. 3, p. 480-494, 2010

RESENDE, A.V. O sistema de plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes. **Documentos da Embrapa – Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 118, 25 p., 2011.

RITCHIE, S.; HANWAY, J.J & BENSON, G.O. **How a Corn Plant Develops**. Special Report No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Ames, Iowa. 1993.

- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1973. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 301–317
- SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 96, p.366-374, 2005.
- SAKAMOTO, T.; NGUYEN, N.V. OHNO, H.; ISHITSUKA, N.; YOKOZAWA, M. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. **Remote Sensing of Environment**, vol. 100, p.1-16, 2006.
- SAKAMOTO, T.; WARDLOW, B.D.; GITELSON, A.A.; VERMA, S.B., SUYKER A.E., ARKEBAUER, T.J. A Two-Step Filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, p.2146-25159, 2010.
- SANTANA, O.A.; CARVALHO JUNIOR, PIMENTEL, C.M.M.; GOMES, R.A.T. & OLIVEIRA, S.N. Modelagem de espectros temporais NDVI-MODIS, no período de 2000 a 2008, na bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 28, p.47-60, 2010.
- SANTANA, O.A.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; CARDOSO, W.S.; MARTINS, E.S; PASSO, D.P.; GUIMARÃES, R.F.. Distribuição de espécies vegetais nativas em distintos macroambientes na região do Oeste da Bahia. Espaço e Geografia (UnB), v. 13, p. XX-XX, 2010.
- VERMOTE, E.; EL SALEOUS, N.; JUSTICE, C. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, n. 1-2, p. 97-111, 2002.
- WARDLOW, B.D. & EGBERT, S.L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: an assessment for the US Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, vol. 112, p.1096-1116, 2008.
- WOLFE, R.E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A.J.; KUYPER, J.A.; ROY, D. P.; STOREY, J.C.; PATT, F. S. Achieving Sub-Pixel geolocation accuracy in Support of MODIS Land Science. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, n.1-2, p. 31-49, 2002.
- XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; BERKA, L.M.S. & MOREIRA, M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, vol.27, p.755-768, 2006.
- ZHANG, X.; FRIEDL, M.A.; STRAHLER, A.H.; HODGES, J.C.F.; GAO, F.; REED, B.C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol. 84, p. 471-475, 2003.
- XIAO, X. M., BOLES, S., LIU, J., ZHUANG, D., FROLKING, S., LI, C. S., SALAS, W., 2005. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images, **Remote Sensing of Environment**, vol. 95, p. 480-492, 2005.
- ISLAM, A. S. & BALA, S. K. Assessment of potato phenological characteristics using MODIS-derived NDVI and LAI information. **Giscience & Remote Sensing**, vol. 45, p. 454-470, 2008.

## CAPÍTULO 4 – SÉRIES TEMPORAIS DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO MODIS PARA CARACTERIZAÇÃO FENOLÓGICA DO ALGODÃO

**Resumo** – O desenvolvimento agrícola brasileiro mostrou-se atrelado aos avanços tecnológicos e eficiência na alocação dos recursos, proporcionando essa competitividade. A utilização de dados de sensores orbitais destaca-se como ferramenta para o acompanhamento dos cultivos, a avaliação dos sistemas de produção e a previsão de safra. Esse potencial dos sensores orbitais foi impulsionado pelos avanços da resolução temporal, destacando-se o sensor *Moderate Imaging Spectroradiometer* (MODIS). A utilização efetiva dessas séries temporais mostra-se dependente do tratamento dos ruídos gerados durante o processo de obtenção das imagens. O presente trabalho teve como objetivo caracterizar os estádios fenológicos do algodão no Cerrado utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS. O emprego conjunto do filtro de mediana e da transformação inversa da Fração Mínima de Ruído (FMR) apresentou-se como eficiente alternativa para o tratamento dos ruídos. Essas séries temporais tratadas permitiram a geração do comportamento temporal da cultura do algodão, em outras palavras, sua assinatura temporal. A assinatura temporal proporcionou evidenciar uma variação sazonal de cerca de 70 % nos valores de NDVI e EVI. Além disso, na última década foi observado um aumento no conteúdo de água foliar (NDWI). Utilizando o comportamento temporal médio desses índices foi possível separar as fases fenológicas do algodão. Dentro dessas fases, foram caracterizadas as taxas de variação dos estádios fenológicos desse cultivo.

**Palavras chaves:** Assinatura temporal, sensor orbital, cultura agrícola, estágio fenológicos.

### MODIS VEGETATION INDEX TIME SERIES FOR COTTON PHENOLOGICAL CHARACTERIZATION

**Abstract** – The Brazilian agricultural development was related to the technological advances and resources allocation efficiency, providing this competitive. The use of orbital sensor data stands as an important tool for the crops monitoring, production system evaluation and forecasting. This potential was driven by the improving of the temporal resolution specially the Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS). However, the effective utilization of this time series is dependent of the noise reduction. This work aimed to characterize the phenological stages of cotton in the Cerrado biome using MODIS vegetation index time series. The employment of the median filter and inverse transformation of Minimum Noise Fraction (MNF) proved to be efficient as noise reduction procedures. These smoothed time series allowed the generation of temporal behavior of the cotton crop, in other word, the temporal signature. The temporal signature evidenced around 70 % in the NDVI and EVI values. Besides that, in the last decade was observed an increase in the leaf water content (NDWI). From the annual average temporal behavior of these indices the phenological period were characterized. In these periods were characterized the phenological stages and the variation taxes of the cotton crops.

**Keywords:** Temporal signature, orbital sensor, crops, phenological stages.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

A competitividade da agricultura brasileira mostra-se fundamentada no incremento de sua produtividade, tendo sido alcançada pelos avanços tecnológicos e pela eficiência de alocação de recursos (SPOLADOR & FREITAS, 2007; VIEIRA FILHO, et al., 2011). Nas últimas décadas, esse crescimento foi consolidado no Brasil Central, com destaque para o Cerrado, considerado a mais recente frente agrícola do país (HELFAND et al., 2000). É nesse bioma que o algodão destaca-se como importante produto do agronegócio brasileiro, tendo o sucesso atrelado às condições climáticas, a topografia favorável para a mecanização, além de incentivos governamentais e aplicação de tecnologias modernas de usos intensivos (EMBRAPA, 2001; MOTOMIYA et al., 2011).

Nesse contexto, o Cerrado possui a maior produtividade da cultura de algodão no Brasil e no mundo, considerando as áreas não irrigadas (EMBRAPA, 2001; MOTOMIYA et al., 2011). Sua produção encontra-se principalmente nos estados do Mato Grosso e Bahia, que juntos respondem a mais de 80 % da área estimada da safra 2010/2011 (CONAB, 2012). O algodão necessita de temperaturas entre 18 e 30 °C, elevada radiação solar e insolação, além de considerar o ciclo (considera-se da emergência até a primeira colheita) do cultivar (AZEVEDO & SILVA, 2007). Dependendo da duração do ciclo, o algoeiro necessita de 700 a 1300 mm de água, sendo que entre 50 e 60 % dessa água é necessária durante o período de floração (50 a 70 dias), considerando a cobertura foliar completamente fechada (EMBRAPA, 2012). Seus estádios fenológicos são caracterizados em função de sua fase vegetativa (V), formação de botões florais (B), abertura da flor (F) e abertura do capulho (C), sendo subfases de desenvolvimento, respectivamente,  $V_n$ ,  $B_n$ ,  $F_n$  e  $C_n$  (MARUR & RUANO, 2001).

Sabendo que as atividades agrícolas apresentam crescentes implicações econômicas, sociais e ambientais, demanda-se informações mais detalhadas sobre sua distribuição espacial (OZDOGAN, 2010). A variabilidade espacial e temporal dos cultivos está relacionada à caracterização de seus estágios fenológicos, que são caracterizados por sua duração, ocorrência, sincronia e simetria (RATHCKE & LACEY, 1985; HUETE, 1988). Esses parâmetros biofísicos da vegetação mostram-se relacionados com suas variações espectrais e podem ser obtidos através de índices de vegetação de sensores orbitais (ASNER, 1998; HUETE et al., 2002). Dentre os principais índices, destaca-se o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al., 1973), *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE et al., 1997), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (GAO, 1996).

O NDVI é considerado um dos mais simples e difundidos para monitoramento, mostrando-se relacionado aos parâmetros biofísicos da vegetação (HUETE et al., 1997). Porém, sua utilização plena depende da redução do efeito de fundo, contaminação atmosférica e seu problema de saturação (HUETE et al., 1985, 1994).

O EVI minimiza o efeito dos aerossóis atmosféricos pixel por pixel (HUETE et al., 1997). Esse índice é baseado em um modelo mais preciso de transferência radiativa do infravermelho próximo para dosséis incompletos, visando a remoção do efeito do ruído de fundo (HUETE, 1988). Além disso, a contaminação atmosférica foi minimizada pela utilização da diferença de radiância entre o canal azul e vermelho, proporcionando a estabilização perante variações atmosféricas temporais e espaciais.

O NDWI mostra-se relevante para o monitoramento do conteúdo de água na vegetação, que é utilizado na agricultura para decisões sobre irrigação e estimativas de produtividade (PENUELAS et al., 1993). Além disso, mantém a sensibilidade para água líquida na vegetação verde, mesmo quando é observada a saturação dos valores de NDVI (GAO, 1996). No Bioma Cerrado, o NDWI foi utilizado para a separação de fitofisionomias, permitindo o ordenamento dos estratos vegetativos em ordem crescente, segundo o conteúdo de água foliar.

Os avanços da caracterização temporal da vegetação foram impulsionados pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), devido à sua alta resolução temporal (HUETE et al., 2002). Neste contexto os índices de vegetação vêm sendo utilizados para a detecção das variações sazonais da vegetação (CARVALHO JUNIOR, 2006, 2008, 2009; COURA, 2010; COUTO JUNIOR et al., 2011; ROSEMBACK, 2010; SANTANA et al., 2010; SANTOS et al., 2009; SHIMABUKURO, 2009; SILVA et al. 2010). Seu potencial também tem sido aplicado na agricultura, identificando os estágios fenológicos dos cultivos agrícolas (SAKAMOTO et al., 2005, 2010; XAVIER et al., 2007; GALFORD et al., 2008; WARDLOW & EGBERT, 2008; OZDOGAN, 2010).

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar os estádios fenológicos do algodão no Cerrado utilizando séries temporais de NDVI, EVI e NDWI do sensor MODIS.

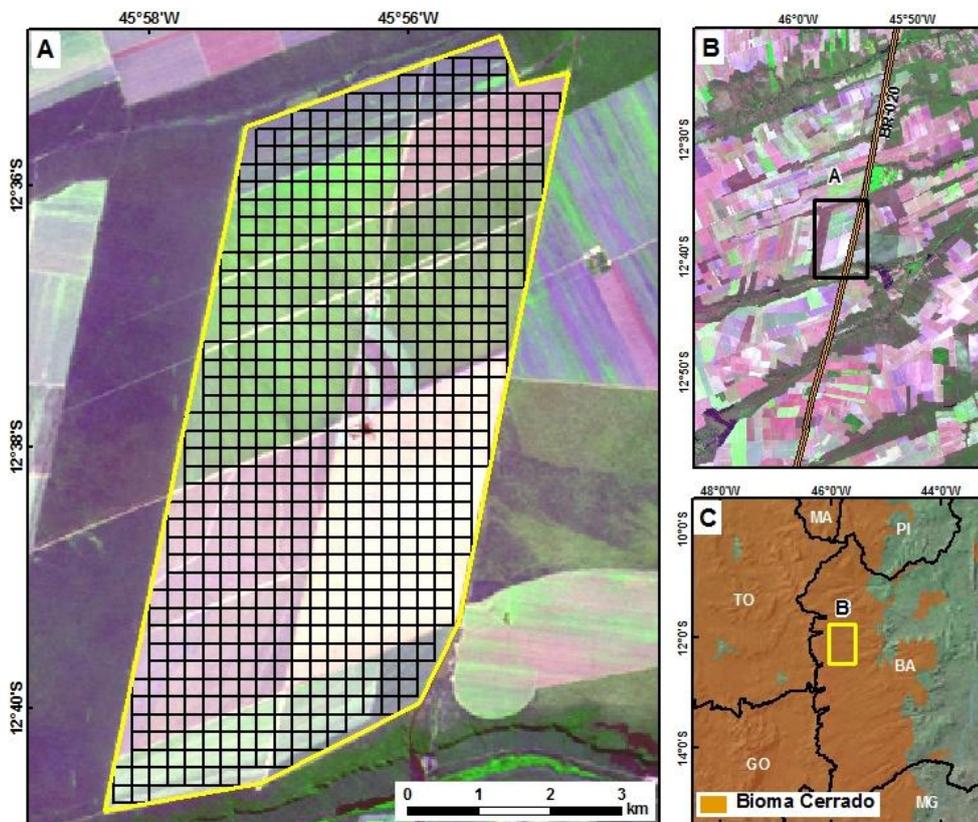
#### **4.2. ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo está localizada à esquerda da BR-020 no sentido sul-norte, em direção ao município de Luís Eduardo Magalhães (LEM), inserido na mesorregião do Extremo Oeste da Bahia e na porção leste do Bioma Cerrado (Fig. 4.1). Esta região apresenta uma expressiva expansão agrícola (MENKE et al. 2009). Essa propriedade possui uma área de cerca de 4200 hectares, destinados ao cultivo de algodão, sendo empregado o sistema convencional de produção a mais de 10 anos. Essa superfície foi coberta por 618 pixels, considerando a projeção do sensor MODIS, o que representa uma área de 3862 hectares.

A área de estudo encontra-se sob o clima úmido, sendo duas estações bem definidas, uma seca e fria (maio a setembro) e, outra, chuvosa e quente (outubro a abril). A temperatura média anual da região varia entre 21° e 27°C, com precipitação média anual de cerca de 1500 mm (BATISTELLA et al., 2002).

A mesorregião do Extremo Oeste Baiano encontra-se sobre o Grupo Urucuia, formado durante o Cretáceo e constituído por arenitos de origem eólica (CAMPOS & DARDENNE, 1997). Os solos dessa região são bastante intemperizados, profundos e bem drenados, porém,

apresentam baixa fertilidade natural (BATISTELLA et al., 2002). Sua superfície encontra-se em relevo plano a suave ondulado e altitude média de 900 metros, onde predominam os Latossolos e Neossolos.



**Fig. 4.1** - Detalhe da área de estudo com a projeção dos pixels do sensor MODIS (250mx250m), em relação a imagem Landsat 5-TM, do dia 14 de julho de 2010 e composição colorida RGB/543 (A); entorno da área de estudo localizada ao longo da BR-020, no sentido do município de Luis Eduardo Magalhães (B); localização regional em relação ao Bioma Cerrado (C).

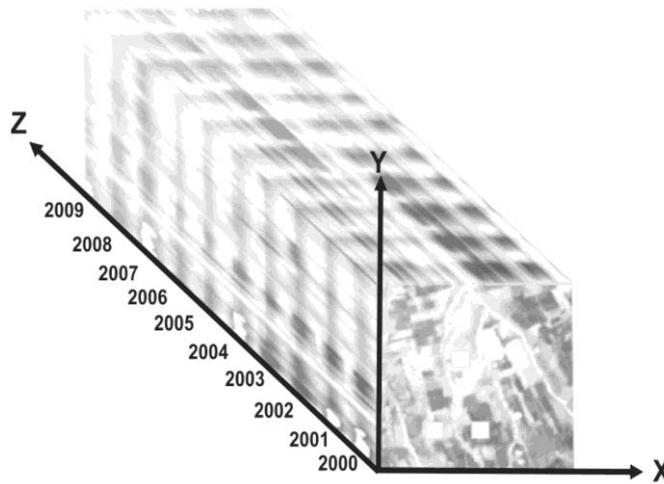
### 4.3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.3.1. Dados do sensor MODIS

Neste trabalho foi utilizado o produto MOD09, obtido do sensor MODIS, referente à reflectância da superfície terrestre obtidas a cada oito dias entre os anos de 2000 e 2011. Esses dados possuem alta resolução temporal, sendo georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos, contribuindo para melhor compreensão sobre os sistemas globais (WOLFE et al., 2002; JUSTICE et al., 2002).

Esses dados são corregistrados e foram inseridos em ordem crescente formando as séries temporais representadas por cubo temporal (Fig. 4.2), onde o eixo X representa a longitude, o eixo Y, a latitude, e o eixo Z, o parâmetro espectral (reflectância ou índices de vegetação). Essa estrutura gera o comportamento dos parâmetros da superfície terrestre ao

longo do tempo, correspondendo à sua assinatura temporal, analogamente à assinatura espectral em dados hiperespectrais.



**Fig. 4.2** - Série temporal MODIS gerado a partir das imagens corrigidas dispostas em sequência crescente.

Os dados foram reamostrados para 250 metros e gerados três índices de vegetação, dentre eles, o NDVI, representado pela seguinte formulação (ROUSE ET AL., 1973):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Ver}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{Ver}}),$$

onde,  $\rho_{\text{IVP}}$  é o valor da reflectância no infravermelho próximo (banda 2: 841-876 nm) e  $\rho_{\text{Ver}}$  é a reflectância na faixa do vermelho (banda 1: 620-670 nm). Seus valores variam entre -1 e 1 e mostrando-se adequado para ambientes de cerrado, cujo valor de Índice de Área Foliar (IAF) é próximo de 1 (MIURA et al., 2003).

Outro índice gerado para este trabalho foi o EVI, com o potencial de evidenciar as regiões com alta biomassa, reduzindo a influencia do solo e da atmosfera, de acordo com a seguinte formulação (HUETE et al., 1997):

$$\text{EVI} = G \cdot [(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Ver}}) / (\rho_{\text{IVP}} + C1 \cdot \rho_{\text{Ver}} - C2 \cdot \rho_{\text{Azul}} + L)]$$

em que:  $\rho_{\text{IVP}}$  e  $\rho_{\text{Ver}}$  são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do MODIS e o  $\rho_{\text{Azul}}$ , a reflectância do azul (banda 3: 459-479 nm); C1 e C2 coeficientes de resistência atmosférica; L é o fator de correção de brilho do dossel; e G é o fator de ganho. Para o MODIS, esses valores são C1= 6; C2 = 7,5; L = 1; e G = 2,5 (JUSTICE et al., 1998; HUETE et al., 1994; 1997).

A partir das bandas referentes aos comprimentos de onda do infravermelho próximo (banda 2: 841-876 nm) e de ondas curtas (banda 5: 1230-1250nm), foi obtido o NDWI, com o objetivo de evidenciar o conteúdo de água na estrutura interna da folha, sendo expresso pela seguinte equação (GAO, 1996):

$$\text{NDWI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{IVC}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{IVC}}),$$

onde,  $\rho_{\text{IVP}}$  é o valor da reflectância no infravermelho próximo e  $\rho_{\text{IVC}}$  é o valor da reflectância no infravermelho de ondas curtas.  $\rho_{\text{IVP}}$  mostra-se afetado pela estrutura interna da folha e teores de matéria seca, e não pelo conteúdo de água. Por outro lado, a  $\rho_{\text{IVC}}$  reflete as mudanças tanto no conteúdo de água da vegetação como da estrutura do mesófilo esponjoso no dossel da vegetação. Nesse sentido, essa combinação remove as variações induzidas pela estrutura interna da folha e os teores de matéria seca, melhorando a precisão na recuperação do teor de água de vegetação (CECCATO et al., 2001). Esse índice foi utilizado com intuito de evidenciar o conteúdo de água em cultivos de soja e milho, sendo constatado que a utilização do comprimento de onda do infravermelho de ondas curtas permitiu melhor monitoramento dos padrões de crescimento (CHEN et al. 2005).

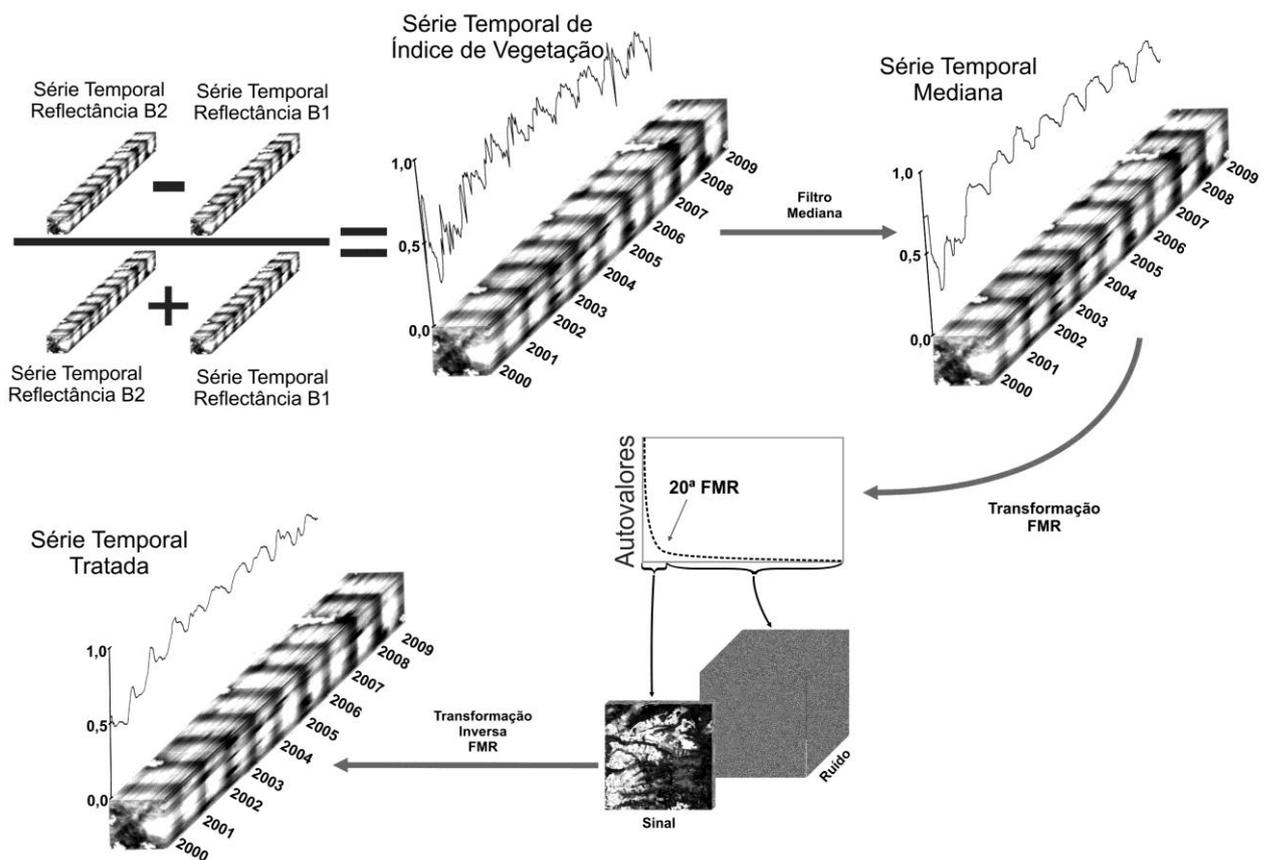
#### **4.3.2. Tratamento das séries temporais e caracterização dos estágios fenológicos do algodão**

Essas séries temporais de índices de vegetação ainda apresentam restrições ocasionadas por interferências atmosféricas, principalmente cobertura de nuvens e suas sombras (DU et al., 2001; FURBY & CAMPBELL, 2001). A redução desses ruídos passou pelas etapas apresentadas na Fig. 8.3, de acordo com CARVALHO JUNIOR et al. (2008, 2009): (a) aplicação de um filtro móvel de mediana, (b) separação da fração sinal pela transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR) e (c) restituição dos parâmetros originais utilizando a fração sinal.

O filtro de mediana proporcionou a obtenção do valor central da janela através de operações não lineares simples, uma vez que as observações foram dispostas em ordem. Considerando esse ordenamento estatístico de  $N$  números reais,  $x(1) \cdots x(N)$ , onde  $N$  representa a janela do filtro digital, se o valor mínimo é  $x(1)$ , o máximo  $x(N)$ , sua mediana será  $M((N + 1) / 2)$ .

A segunda etapa desta sequência metodológica, marcada pela transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR), utilizou o conhecimento originalmente utilizado para o processamento de imagens hiperespectrais (GREEN et al., 1988). Esse procedimento também

foi utilizado para a redução das interferências presentes em mapeamentos aéreos de raios-gama (DICKSON & TAYLOR, 1998). A FMR é uma transformação semelhante à Análise de Componentes Principais (ACP), sendo linear, porém, sua principal característica é a maximização da razão sinal/ruído, seguida do ordenamento das imagens segundo sua qualidade (GREEN et al., 1988). Esse ordenamento segregou a fração sinal nas primeiras componentes, tendo sido utilizada para proceder a transformação inversa FMR (Fig. 4.3). Esse procedimento visa eliminar da presença do ruído branco (não correlacionado e com baixa variância) e atenuar possíveis patamares gerados durante a passagem do filtro de mediana, retornando a escala de valores originais dos parâmetros das séries temporais.



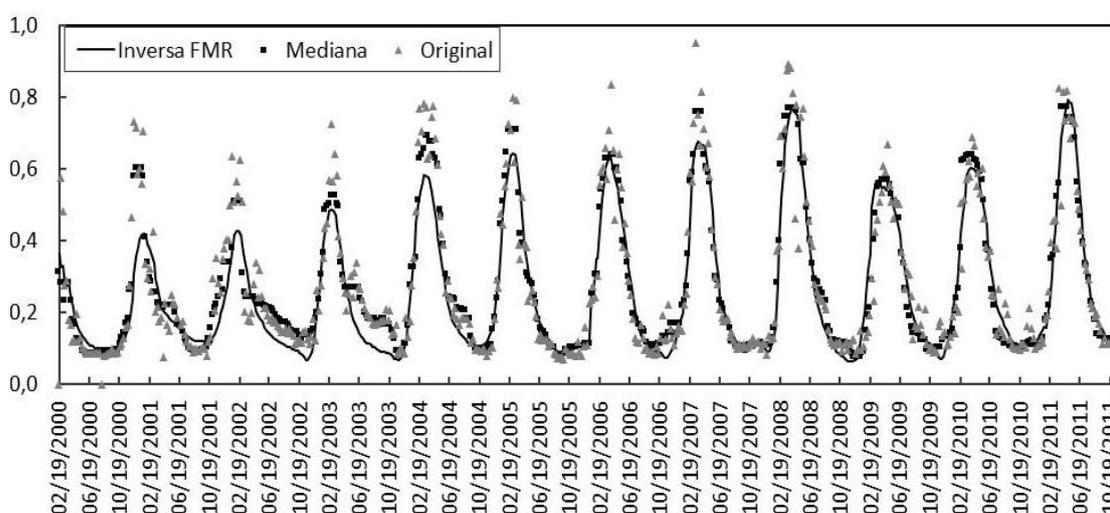
**Fig. 4.3** - Geração das séries temporais dos índices de vegetação MODIS e sequencia metodológica utilizada para o tratamento dos ruídos, nesse caso, o exemplo do NDVI.

A partir das séries temporais dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI tratadas foi realizada estatística descritiva, utilizando histograma de frequência referente ao período de 12 anos avaliado. Considerando o intervalo estudado, foram obtidos os perfis médios dos índices de vegetação referentes ao ano agrícola. As transições fenológicas do algodão foram evidenciadas por meio da 1ª derivada e, seus estádios fenológicos, pela 2ª derivada.

## 4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.4.1. Resultados do tratamento de ruído

Foi possível constatar uma redução significativa da presença de ruídos ocasionados pela cobertura de nuvens ou sombra pela utilização do filtro de mediana (Fig. 4.4). A segunda etapa do procedimento proporcionou o ordenamento dos dados, tendo sido a fração sinal segregada nas 20 primeiras componentes, segundo o gráfico de autovalores (Fig. 4.3). Essa fração foi utilizada para a aplicação da transformação inversa da FMR, restaurando o espectro temporal suavizado na escala dos índices de vegetação (Fig. 4.4).



**Fig. 4. 4** - Perfil temporal original (triângulos cinzas), perfil após a aplicação da mediana (quadrados pretos) e o perfil tratado pela transformação inversa da Fração Mínima de Ruído (linha preta).

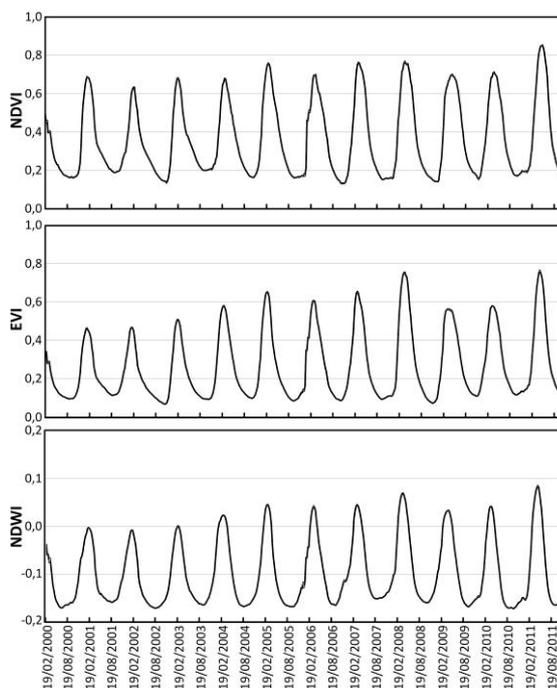
Após a eliminação ruídos sem correlação e de baixa variância e dos eventuais patamares gerados pela repetição de valores após a filtragem de mediana, ocasionando melhoria na qualidade das imagens (Fig. 4.5).



**Fig. 4.5** - Qualidade crescente das imagens referentes ao dia 305 do ano de 2000, original (esquerda), após o filtro de mediana (centro) e após a transformação inversa FMR (direita).

### 4.4.2. Resultado da comparação entre os índices de vegetação

A caracterização fenológica do algodão utilizou os comportamentos temporais da NDVI, EVI e NDWI ao longo do período de 12 anos (Fig. 4.6). Nesse período, a biomassa apresentou a maior amplitude, variando cerca de 70 % entre as estações, de acordo com os valores de NDVI e EVI. Os períodos secos foram marcados por valores inferiores a 0,2 e os chuvosos, inferiores a 0,8, exceto no ano de 2011, quando esse valor foi ultrapassado (Fig. 4.6).



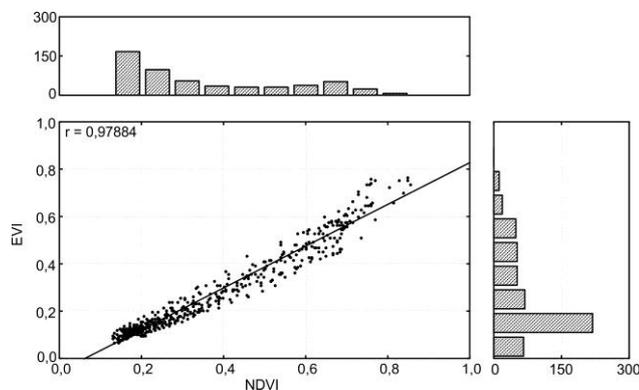
**Fig. 4.6** - Comportamento temporal do algodão entre os anos de 2000 e 2011, considerando os índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI.

Os valores de EVI indicaram uma variação estacional de quase 70%, podendo ser observado que a estação chuvosa apresentou valores inferiores a 0,6, com exceção aos anos 2005, 2007, 2008 e 2011 (Fig. 4.6). O período seco foi caracterizado por cobertura vegetal inferior a 10 % ( $EVI < 0,1$ ), indicando elevada exposição do solo e a necessidade de práticas conservacionistas do solo durante essa época.

O conteúdo de água nas folhas (NDWI) foi crescente durante as estações chuvosas (outubro a abril), alcançando valores positivos a partir do ano de 2004 (Fig. 4.6). Esse fato indica mais disponibilidade de água nessa época ou um melhor aproveitamento desse recurso pela vegetação. Durante a seca foram encontrados valores de NDWI próximos a -0,2, indicando a ausência de vegetação, pois o valor esperado para vegetação seca é cerca de -0,05 (GAO, 1996).

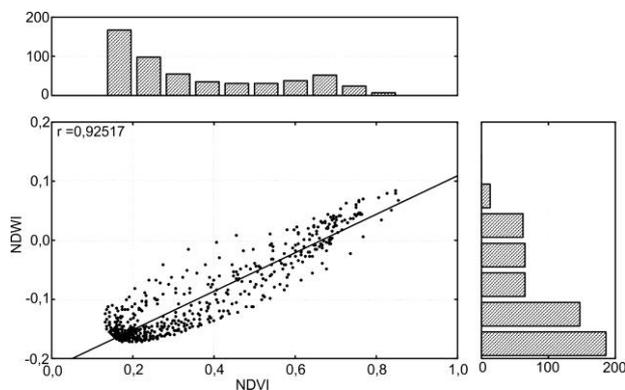
Os valores de EVI em função dos valores de NDVI apresentaram alta correlação (0,97884) durante os anos avaliados (Fig. 4.7). Diante dessa relação, observa-se que a

biomassa produzida apresentou uma distribuição com tendência de J-invertido, isso significa que a área com atividade fotossintética foi mantida ao longo da última década. Mesmo com essa manutenção, foi constatado um incremento de cerca de 30 % de área com cobertura vegetal durante os períodos de seca, quando são observados os menores valores de EVI.



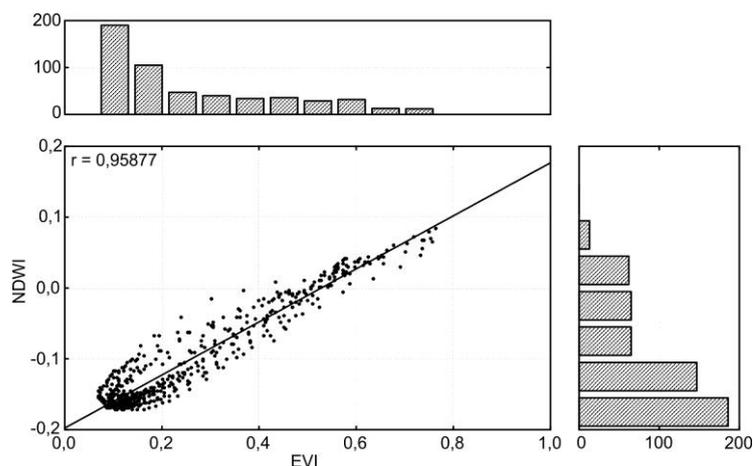
**Fig. 4.7** - Correlação entre EVI e NDVI, acompanhado por suas distribuições de frequência.

O conteúdo de água foliar (NDWI) em função do NDVI apresentou alta correlação (0,9217) ao longo do tempo avaliado (Fig. 4.8). As distribuições de frequência de ambos os índices evidenciaram a manutenção de suas áreas durante o período estudado. Infere-se que tanto a proporção de atividade fotossintética quanto a presença de água nas folhas ao longo dos períodos (secos e chuvosos) foram mantidas.



**Fig. 4.8** - Correlação entre NDWI e NDVI, acompanhado por suas distribuições de frequência.

A relação entre o conteúdo de água foliar (NDWI) e o EVI também apresentou alta correlação (0,95877) ao longo dos anos estudados (Fig. 4.9). A distribuição de frequência em função dessa relação demonstrou que a sazonalidade da cobertura vegetal e da água presente nas folhas foi mantida.



**Fig. 4.9** - Correlação entre NDWI e EVI, acompanhado por suas distribuições de frequência.

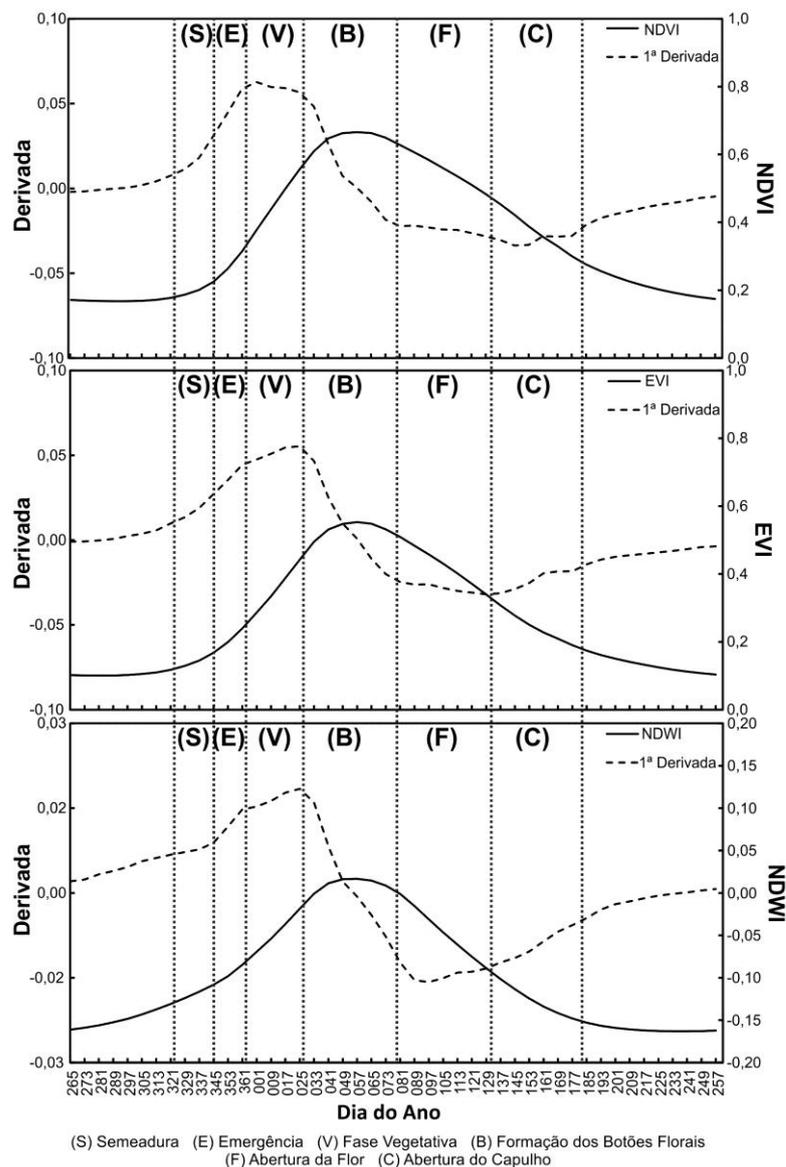
#### 4.4.3. Resultados da caracterização fenológica do algodão

As assinaturas temporais foram utilizadas para a construção do comportamento temporal médio dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI) referentes ao ano agrícola do algodão (Fig. 4.10), bem como as fases fenológicas apresentadas por MARUR & RUANO (2001).

O período de cultivo iniciou-se próximo ao dia 321 (16 de novembro), dentro da 44ª semana do ano, considerado um período favorável à sementeira nessa região (AZEVEDO & SILVA, 2007). Essa fase foi marcada pelo incremento nos valores de NDVI, EVI e NDWI.

A etapa da emergência (dias 345 a 361) foi determinada pela elevação dos valores de NDVI, de acordo com sua 1ª derivada (Fig. 4.10). Isso significa que a produção de biomassa foi destacada mesmo com reduzida cobertura foliar, constada pelas menores inclinações das derivadas do EVI e NDWI.

A Fase Vegetativa (V) foi destacada por meio das 1ª derivadas do NDVI, EVI e NDWI. Esse fato confirma o desenvolvimento quantitativo das estruturas foliares (MARUR & RUANO, 2001), ocasionando maior demanda por água (Fig. 4.10).



**Fig. 4.10** - Comportamento temporal da cultura do algodão em sistema de plantio convencional referente aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI, em dias do ano; a duração das fases fenológicas, destacadas por meio das 1<sup>as</sup> derivadas (linha tracejada).

A fase seguinte é a Formação dos Botões Florais (B), quando os valores de NDVI, EVI e NDWI alcançaram seus valores máximos (Fig. 4.10). Após atingir esse ápice, foi observada uma redução dos valores de todos esses índices, devido à redução da atividade fotossintética e maior investimento nas estruturas reprodutivas, os botões florais.

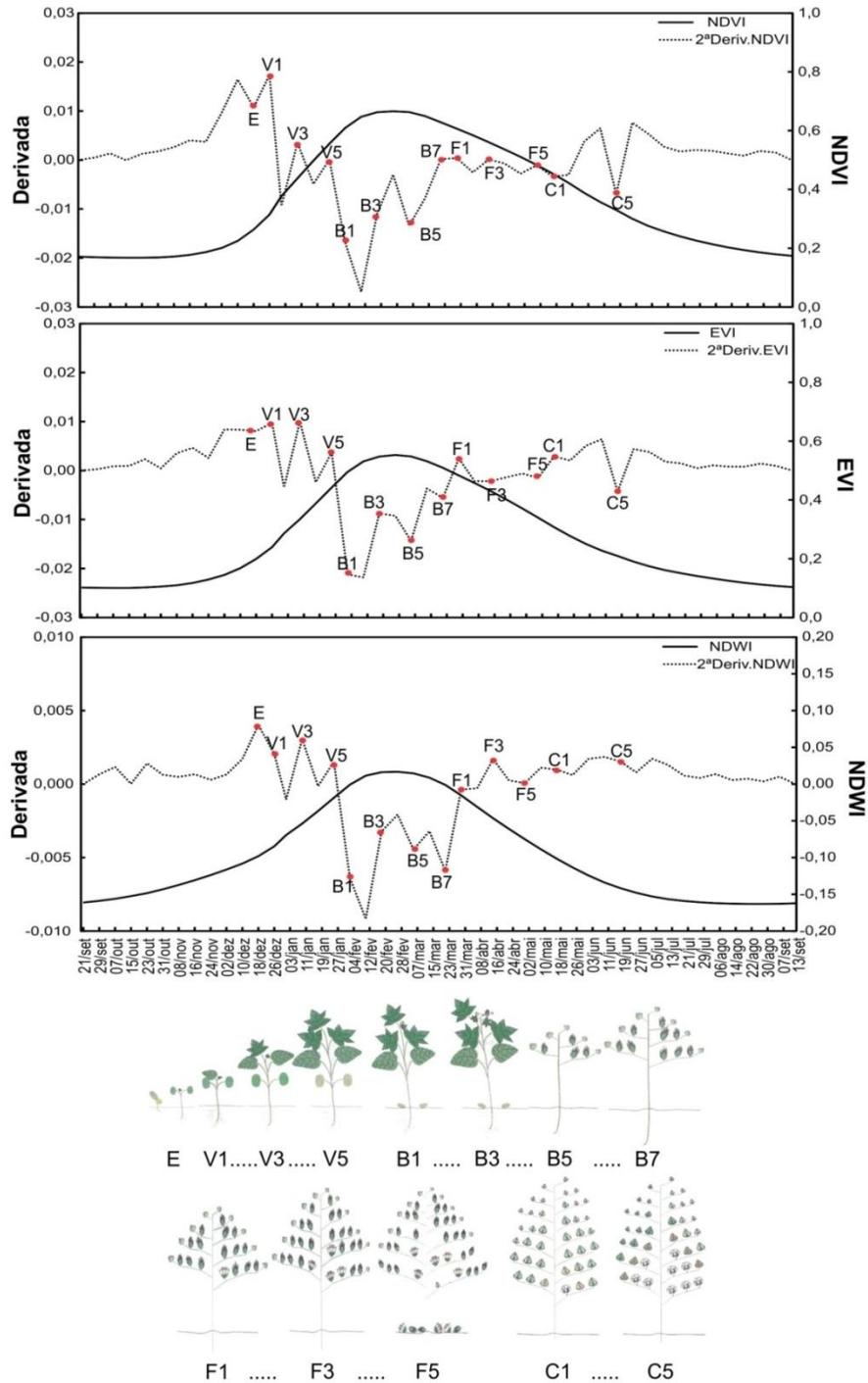
A redução dos valores de todos os índices ocorreu até o final da fase dos botões florais, marcando a fase de Abertura da Flor (F), iniciada por volta do dia 81, meados de março (Fig. 4.10). Durante essa fase, o conteúdo de água foliar (NDWI) apresentou as maiores quedas, confirmando o maior investimento na produção de flores. Por outro lado, foi observada a manutenção dos valores de NDVI e EVI.

A última fase fenológica do algodão é a Abertura do Capulho (C), marcada pelo maior conteúdo de água nas folhas (NDWI), em relação às fases anteriores (Fig. 4.10). Essa fase foi compreendida entre o início de maio (dia 129) e início de julho (dia 185), época dos menores valores de NDWI. Além dessa redução de disponibilidade de água, também foi observada queda nos valores de EVI durante a Abertura do Capulho (C). O final desse intervalo (dia 129 a 185) também é marcado pela redução acentuada dos valores de NDVI. Os padrões desses índices mostraram-se relacionados à colheita, que demanda menor presença de folhas verdes, umidade inferior a 12 % e com 95 % dos capulhos abertos (EMBRAPA, 2012).

Se por um lado a 1ª derivada evidenciou as fases fenológicas, a 2ª derivada gerou a taxa de variação dos estádios fenológicos do algodão (Fig. 4.11). Entre o período de semeadura e emergência foi constatada uma taxa positiva e decrescente nos valores de NDVI, significando que o desenvolvimento inicial do algodão é mantido pelo conteúdo nutricional oriundo da semente. As taxas de EVI e NDWI foram positivas e crescentes, evidenciando o desenvolvimento da parte aérea e a capacidade de utilização de água pelas plantas.

O estágio Vegetativo (V1) foi marcado por uma taxa positiva e crescente de NDVI, indicando o incremento das estruturas foliares (Fig. 4.11). O EVI também apresentou taxa positiva e crescente, porém, com menores taxas que os observados no NDVI. O conteúdo de água nas folhas (NDWI) apresentou crescimento positivo, no entanto, com taxa decrescente. Observou-se que o estágio V3 foi definido pelo incremento de todos os índices de vegetação de acordo com uma taxa positiva e crescente, destacando-se como relevante estágio do desenvolvimento vegetativo do algodão. O último estágio dessa fase (V5) foi atingido por taxas de crescimento positivas e crescentes, para todos os índices, contudo, com valores muito próximos a zero, marcando o final da fase vegetativa.

Após o desenvolvimento vegetativo são formados os botões florais (B1), marcada por taxas de progressão negativas e decrescentes para todos os índices (Fig. 4.11). Esse fato por ser explicado pelo incremento nas estruturas reprodutivas e redução da produção de biomassa, marcado pela redução de todos os índices de vegetação. O estágio B3 apresentou taxas negativas e crescentes, coincidindo com os valores máximos de todos os índices de vegetação. Considerando o conteúdo de água foliar (NDWI), os estádios B5 e B7 resultaram de taxas negativas e decrescentes, indicando a redução da disponibilidade hídrica nas folhas para a geração das flores (F). Os valores de EVI durante o estágio B5 apresentou taxas negativas e decrescentes inferiores às observadas nos valores de NDVI. Por outro lado, o estágio B7 mostrou valores neutros, sendo marcado por taxas negativas e crescentes de NDVI.



**Fig. 4. 11** - Comportamento temporal cultura do algodão considerando o NDVI, EVI e NDWI, em dias do ano; os estádios fenológicos identificados utilizando a segunda derivada (linha pontilhada); ilustrações do desenvolvimento do algodão [Adaptado MARUR & RUANO (2001)].

A abertura das flores (F1) foi marcada por valores da 2ª derivada próximos a zero, gerados por taxas neutras, no caso do NDVI, e por taxas crescentes, como observadas nos valores de EVI e NDWI (Fig. 4.11). Observa-se que ao longo dessa fase de abertura das flores os valores mantiveram-se estáveis e próximos a zero nos demais estádios fenológicos.

A abertura dos capulhos (C1) foi marcada por taxas positivas e neutras para o conteúdo de água foliar (NDWI) e positivas crescentes para os valores de EVI (Fig. 4.11). Por outro lado, foi observada taxa negativa e decrescente de NDVI. O estágio B5 foi marcado por taxa negativa e decrescente tanto para NDVI quanto para EVI. Após esse estágio observa-se redução nas taxas de NDWI, evidenciando a diminuição da umidade das plantas, proporcionando a colheita.

#### 4.5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento agrícola brasileiro mostrou-se atrelado ao desenvolvimento tecnológico e eficiência na alocação dos recursos. Nesse contexto de competitividade, a utilização de dados de sensores orbitais destaca-se como ferramenta para o acompanhamento dos cultivos, a avaliação dos sistemas de produção e a previsão de safra.

Esse potencial dos sensores orbitais foi impulsionado pelos avanços da resolução temporal, destacando-se o sensor *Moderate Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Os índices de vegetação são os principais produtos gerados por esse sensor para o monitoramento terrestre. A utilização efetiva dessas séries temporais mostra-se dependente do tratamento dos ruídos gerados durante o processo de obtenção das imagens.

O emprego conjunto do filtro de mediana e da transformação inversa da Fração Mínima de Ruído (FMR) apresentou-se como eficiente alternativa para o tratamento dos ruídos. Essas séries temporais tratadas permitiram a geração do comportamento temporal da cultura do algodão, em outras palavras, sua assinatura temporal.

A assinatura temporal proporcionou evidenciar uma variação sazonal de cerca de 70 % na produção de biomassa, de acordo com os valores de NDVI e EVI. Além disso, na última década foi observado um aumento no conteúdo de água foliar (NDWI).

Utilizando o comportamento temporal médio desses índices foi possível separar as fases fenológica do algodão. Dentro dessas fases, foram caracterizadas as taxas de variação dos estágios fenológicos desse cultivo.

#### REFERÊNCIAS

- ASNER, G.P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, vol. 64, p.234-253, 1998.
- AZEVEDO, P.V. & SILVA, F.D.S. Risco climático do algodoeiro na região nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 22, p.408-416, 2007.

- BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E.E.; VIEIRA, H.R.; VALLADARES, G.S.; MANGABEIRA, J.A.C.; ASSIS, M.C. **Monitoramento da expansão agropecuária da Região Oeste da Bahia**. Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20, 41p., 2002.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 27, p. 269-282, 1997.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação fração de ruído mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 20, p. 31-42, 2002.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÃ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.24, p.319-332, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, O.; SAMPAIO, C.S, SILVA, N.C.; COUTO JUNIOR, A.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO, A.P.F.; SHIMABUKURO, Y.E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 26, p.505-517, 2008.
- CARVALHO JUNIOR, O.; COUTO JUNIOR, A.F.; SILVA, N.C.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, p. 399-412, 2009.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S. & GREGOIRE, J.M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, vol. 77, p.22-33, 2001.
- CHEN, D; HUANG, J. & JACKSON, T.J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, vol. 98, p.225-236, 2005.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, Indicadores da Agropecuária. Disponível em : <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso: 21 de março de 2012.
- COURA, S.M.C.; SHIMABUKURO, Y. E.; FONSECA, L.M.G. Mapeamento da cobertura vegetal em escala regional do estado de Minas Gerais utilizando imagens MODIS. **Geografia (Rio Claro. Impresso)**, vol. 35, p. 661-681, 2010.
- COUTO JUNIOR, A., CARVALHO JUNIOR, O., MARTINS, E., SANTANA, O., SOUZA, V., & ENCINA, J. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, vol. 35, p.699-705, 2011.
- DU, Y.; CIHLAR, J.; BEAUBIEN, J.; LATIFOVIC, R. Radiometric normalization, composition, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, p. 623-634, 2001.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Algodão: tecnologia de produção**. Embrapa Agropecuária Oeste, 296p. 2001.
- FURBY, S.L. & CAMPBELL, N.A. Calibrating images from different dates to like-value digital counts. **Remote Sensing of Environment**, vol. 77, p. 186-196, 2001.
- GALFORD, G.; 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**, vol.112, p.576-587, 2008.
- GAO, B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, vol.58, p.257-266, 1996.

GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, n.1, p.65-74, 1988.

HELFAND, S.M; RESENDE, G.C. **Padrões Regionais de Crescimento da Produção de grãos e o Papel da Região Centro-Oeste**. Texto para Discussão, n. 731. Rio de Janeiro, IPEA, 2000.

HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, vol. 17, p. 37-53, 1985.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, vol. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUETE, A.R.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, vol.49, p.224-234, 1994.

HUETE, A.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol.59, p.440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, p.195-213, 2002.

JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J.R.G.; DEFRIES, R; ROY, P.D.; HALL, D.K; SALOMONSON, V.; PROVETTE, J.L.; RIGGS, G.; STRHALER, 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. & BARNESLEY M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, p.1228-1247, 1998.

JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, vol.83, p.3-15, 2002.

MARUR, J.M. & RUANO, O. A reference system for determination of developmental stages of upland cotton. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.5, p.313-317, 2001.

MENKE, A.B.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, S.N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade e Natureza**, vol. 21, p.315-326, 2009.

MOTOMIYA, A.V.A; MOLIN, J.P.; MOTOMIYA, W.R. & VIEIRA, S.R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 15, p.996-1001, 2011

OZDOGAN, M. The spatial distribution of crop types from MODIS data: temporal unmixing using independent component analysis. **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, p.1190-1204, 2010.

PENUELAS, J.; FILELLA, I.; BIEL, C.; SERRANO, L. & SAVE, R. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 52, p.1669-1675, 1993.

RATHCKE, B. & LACEY, E.P. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual Review of Ecology Systematics**, vol. 16, p.179-214, 1985

ROSEMBACK, R.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; CONFORTE, J. C. Análise da dinâmica da cobertura vegetal na região sul do Brasil a partir de dados MODIS/Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, p. 401-416, 2010.

- ROUSE JW, HAAS RH, SCHELL JA & DEERING DW. 1973. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 301–317
- SANTANA, O.A.; CARVALHO JUNIOR, PIMENTEL, C.M.M.; GOMES, R.A.T. & OLIVEIRA, S.N. Modelagem de espectros temporais NDVI-MODIS, no período de 2000 a 2008, na bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 28, p.47-60, 2010.
- SAKAMOTO, T.; YOKOZAWA, M.; TORITANI, H.; SHIBAYAMA, M.; ISHITSUKA, N.; OHNO, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 96, p.366-374, 2005.
- SAKAMOTO, T.; WARDLOW, B.D.; GITELSON, A.A.; VERMA, S.B.; SUYKER, A.E. & ARKEBAUER, T.J. A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 114, p.2146-2159, 2010.
- SANTOS, J.S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y.E.; RUDORFF, B.F.T. Identificação de áreas alagadas no bioma Pantanal - Brasil - utilizando dados multitemporais Terra/MODIS. **Geografia (Rio Claro. Impresso)**, v. 34, p. 745-755, 2009.
- SHIMABUKURO, Y.E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R.M.; LIMA, A.; VALERIANO, D.M.; BROWN, I.F.; MALDONADO, M.L.R. . Fraction images derived from Terra MODIS data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 1537-1546, 2009.
- SILVA, G.B.S.; FORMAGGIO, A.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; ADAMI, M.; SANO, E.E. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 186-194, 2010.
- SPOLADOR, H.F.S.; FREITAS, R.E. **Termos de troca para o milho na agricultura brasileira**. Textos para Discussão, n. 1279. Brasília, IPEA, 2007. 39p.
- VIEIRA FILHO, J.E.R.; GASQUES, J.G.; SOUSA, A.G. **Agricultura e crescimento: cenários e projeções**. Textos para Discussão, n. 1642. Brasília, IPEA, 2011. 38p.
- WARDLOW, B.D. & EGBERT, S.L. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250m NDVI data: an assessment for the US Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, vol. 112, p.1096-1116, 2008.
- WOLFE, R.E.; NISHIHAMA, M.; FLEIG, A.J.; KUYPER, J.A.; ROY, D. P.; STOREY, J.C.; PATT, F. S. Achieving Sub-Pixel geolocation accuracy in Support of MODIS Land Science. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, n.1-2, p. 31-49, 2002.
- XAVIER, A.C.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; BERKA, L.M.,S & MOREIRA, M.A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, vol.27, p.755-768, 2007.

## **CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO DA OCUPAÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO UTILIZANDO SÉRIES TEMPORAIS MODIS**

**Resumo** - As mudanças de cobertura mostram-se relacionadas com as necessidades humanas e ocasionam alterações nos principais ciclos biogeoquímicos. Essa situação impulsionou o desenvolvimento de sensores orbitais para a melhor compressão dos sistemas biológicos e agrícolas. Dentre os principais avanços, destaca-se o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que permitiu a geração de séries temporais contínuas da superfície terrestre. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar a ocupação agrícola no bioma Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. Este estudo utilizou o município de Luis Eduardo Magalhães (LEM), localizado no extremo oeste da Bahia devido à sua característica de agronegócio. A aplicação de filtro de mediana foi a primeira etapa do tratamento das séries temporais, seguida pela segregação da Fração Mínima de Ruído (FMR) e posterior inversão dos dados temporais baseada na fração sinal. Após esses procedimentos metodológicos, foi realizada a detecção dos membros finais, que foram utilizados como referência na Regressão Linear Múltipla. Os resultados proporcionaram redução significativa dos ruídos de impulso, além da eliminação de interferências atmosféricas. A transformação FMR proporcionou o ordenamento decrescente em função da fração sinal, tendo sido utilizadas as duas primeiras componentes para a construção do gráfico de dispersão. Observou-se uma distribuição triangular dos dados, evidenciando três membros finais: 1) Cerrado; 2) Agricultura; 3) Conversão. Realizando a rotação dos dados observa-se um eixo invariante, formado pelos dois primeiros membros finais, e um eixo perpendicular em direção ao vértice da Conversão, representando o ajuste aos padrões de cobertura que foram alterados após o ano 2000. Esses membros finais geram as frações temporais, que em composição colorida evidenciaram a expansão agrícola partindo de oeste para leste, confirmando a realidade dessa região. Os métodos apresentados proporcionaram a superação da limitação da resolução espacial e evidenciaram um potencial de discriminação da fenologia de cultivos agrícolas.

**Palavras chaves:** Expansão agrícola, Cerrado, Séries temporais, MODIS, Detecção de mudança.

### **AGRICULTURAL OCCUPATION CHARACTERIZATION IN THE CERRADO BIOME USING MODIS TIME SERIES**

**Abstract** - The land cover changes are related with the humans' necessities causing disturbance in the main biogeochemical cycles. This situation provided the development of orbital sensor to better comprehension of the biological and crop systems. One of these chief advances is the Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS), which allowed the generation of continuous time series of terrestrial surface. This work aimed to characterize the agricultural occupation in the Cerrado biome using MODIS time series. The municipality of Luis Eduardo Magalhães (LEM) is located in the western Bahia state and shows high agribusiness development. The application of median filter was the first stage to the noise reduction, the Minimum Noise Fraction (MNF) transformation, the second, followed by the inversion of time data based on the signal fraction. After these procedures, were identified the endmembers detection, which were used in Multiple Linear Regression. The results evidenced reduction in the impulse noise besides of elimination of atmospheric interferences. The MNF transformation ordered the signal fraction decreasing and that were used the top two components into scatter plot. It was observed a triangular distribution that showed three endmember: 1) Cerrado; 2) Agriculture; 3) Conversion. The counterclockwise data rotation evidenced an invariant axis, composed by the two first endmembers and a perpendicular axis in the direction of Conversion representing the fit to land cover time patterns, mainly after the year 2000. The temporal fractions generated by these endmembers that were composed and evidenced a pathway from the west to east of the agricultural expansion, confirming the reality of this region. These methods provide overcoming the moderate spatial resolution and confirm the potential to the crop phenology discrimination.

**Keywords:** Agricultural expansion, Cerrado, Time series, MODIS, Change detection.

## 5.1. INTRODUÇÃO

O estabelecimento das sociedades modernas mostra-se dependente de recursos naturais e de áreas agrícolas para a produção de alimentos (RAMANKUTTY & FOLEY, 1998). Cerca de metade das estruturas e funções dos ecossistemas terrestres livre de gelo já foi convertida ou modificada significativamente devido às atividades humanas (RAMANKUTTY & FOLEY, 1998; LAMBIN et al., 2003). Essas mudanças de cobertura foram intensificadas pelo crescimento populacional global nos últimos 300 anos (GOLDEWIJK & RAMANKUTTY, 2004).

Dentre as principais conseqüências ocasionadas por essas mudanças de cobertura, destacam-se as alterações de ciclos biogeoquímicos, principalmente água, carbono e nitrogênio (RAMANKUTTY & FOLEY, 1998). Seus impactos ainda afetam os bens e serviços ambientais (LAMBIN et al., 2003), especialmente aqueles relacionados a biodiversidade global (SALA et al., 2002) e degradação de solos (TRIMBLE & CROSSON, 2000).

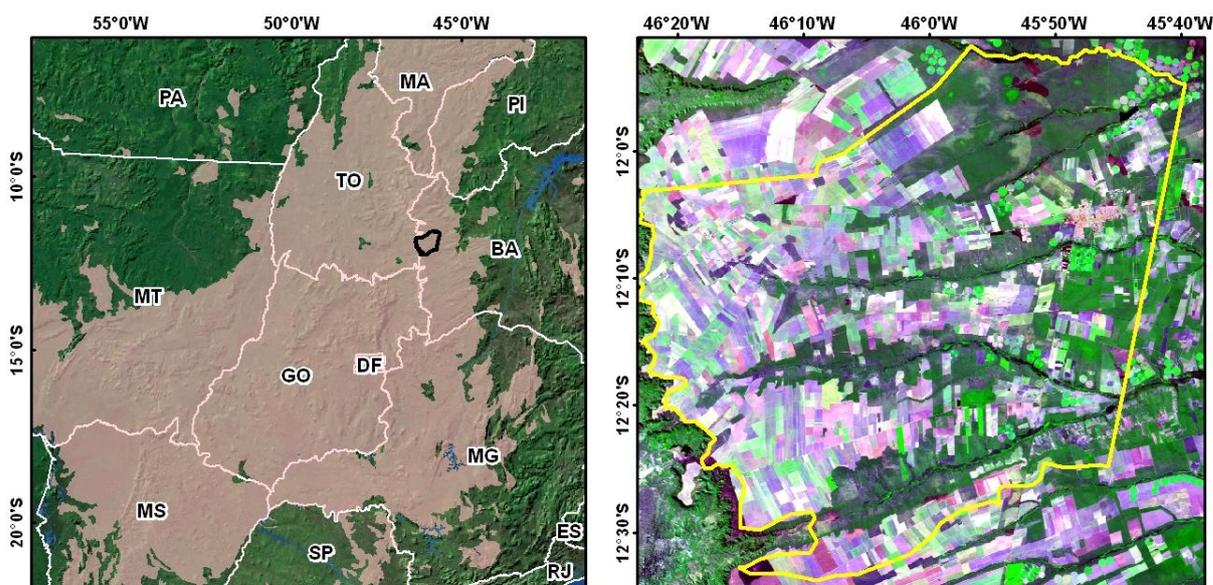
Alternativas para o monitoramento das mudanças de cobertura vêm sendo desenvolvidas para compreender a capacidade dos sistemas biológicos suportarem as necessidades humanas (VITOUSEK et al., 1997). Nesse sentido, o desenvolvimento de sensores orbitais com alta resolução temporal, como o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) impulsionou a geração séries temporais contínuas da superfície terrestre (HUETE et al., 2002; LATORRE et al. 2007; CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009).

A obtenção de séries temporais contínuas permite uma melhor descrição das variações sazonais da cobertura terrestre (KANG et al., 2003; SAKAMOTO et al., 2005; ZHANG et al., 2003;). Para essa detecção de mudanças, destaca-se a vegetação como o parâmetro biofísico mais utilizado (DEFRIES & TOWNSHEND, 1994; PRINCE 1991 a, b; RUNNING, 1995; TUCKER et al., 1991; WESSELS et al., 2004). A integração de sua atividade fotossintética por meio Índices de Vegetação (IV) permite a realização de medições da variabilidade espacial e temporal (HUETE, 1988).

Neste contexto, o desenvolvimento do processamento digital de imagens considerando padrões temporais conduz a uma mudança na concepção de abordagens específicas para a análise temporal e suas peculiaridades. O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a expansão agrícola no bioma Cerrado utilizando séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS.

## 5.2. ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho será utilizado o município de Luís Eduardo Magalhães (LEM), inserido na mesorregião do Extremo Oeste da Bahia e inteiramente dentro do Bioma Cerrado (Fig. 5.1). O município possui área de cerca de 4000 km<sup>2</sup> e uma população de aproximadamente 60.000 habitantes (IBGE, 2010).



**Fig. 5. 1** - Bioma Cerrado e a áreas estudo, em preto (esquerda); limite do município de Luis Eduardo Magalhães (direita).

O clima predominante no município úmido, apresentando duas estações bem definidas: estação seca e fria (maio a setembro) e chuvosa e quente (outubro a abril). A precipitação média anual de cerca de 1500 mm, variando de leste para oeste, e temperatura média anual variando entre 21° e 27°C (BATISTELLA et al., 2002).

No contexto geológico, o município está sobre o Grupo Urucuia, formado durante o Cretáceo e constituído quase que exclusivamente por arenitos de origem eólica (CAMPOS & DARDENNE, 1997). O Grupo Urucuia está depositado sobre o embasamento do Grupo Bambuí, não aflorante nesse município. Nas calhas dos grandes cursos d'água estão presentes os Depósitos Aluvionares, compostos por areia e cascalho (SILVA, 2008).

Os solos são bem intemperizados e drenados, apresentando baixa fertilidade natural, destacando-se os Latossolos e Neossolos (BATISTELLA et al., 2002).

O município situa-se em uma altitude média de 900 metros de altitude em relevo plano a suave ondulado, sobre duas unidades Geomorfológicas, Topos e Chapadas intermediárias (CASTRO et al., 2010).

A altitude e os solos apresentam-se como os principais determinantes da composição florística e estrutura da vegetação do Cerrado (FELFILI et al., 2001). Na parte mais oeste, onde ocorrem os Latossolos e Neossolos, observa-se o predomínio do Cerrado sentido restrito; na porção leste, encontram-se as Florestas Estacionais, associadas às rochas calcárias; e ao longo dos rios e córregos, em Solos Aluviais, Formações Ciliares e Campos Úmidos (BATISTELLA et al., 2002).

Este município destaca-se com um grande produtor agrícola, principalmente, soja, milho, algodão e café (BATISTELLA et al., 2002). Foi constatado que as atividades agropecuárias ocupam cerca de 50 % de sua área (MENKE et al., 2009).

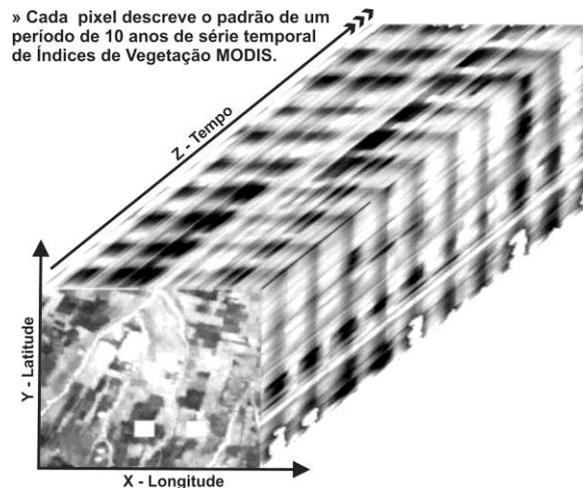
### **5.3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **5.3.1 Dados do sensor MODIS**

Os dados orbitais do sensor MODIS têm como objetivo avaliar as mudanças na superfície terrestre, gerando maior compreensão do funcionamento dos sistemas globais (JUSTICE et al., 2002). Esses dados são disponibilizados gratuitamente pela *National Aeronautic Space Administration* (NASA) com alta resolução temporal, georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos, como nuvens, aerossóis, entre outros (WOLF et al., 2002; JUSTICE et al., 2002).

Neste artigo foi utilizado o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), advindo do produto MOD13 com um intervalo de 16 dias e resolução espacial de 250 metros. Esses produtos são gerados a partir da reflectância diária de superfície (MOD09 - nível 2), corrigidos para o espalhamento molecular, absorção de ozônio e aerossóis (VERMOTE et al., 2002). O algoritmo de geração dos índices usa os dados de reflectância da superfície no nível 2G (reprojetados) e faz uma composição temporal de 16 dias desses dados (nível 3).

A série temporal foi construída por esses dados corregistrados, gerando um paralelepípedo (Fig. 5.2) onde X refere-se a longitudes; Y, a latitude; Z, os valores do Índice de Vegetação. Nesse contexto, o perfil Z representa o comportamento dos alvos ao longo do tempo, denominado de assinatura temporal, analogamente à assinatura espectral em dados hiperespectrais.



**Fig. 5. 2** - Paralelepípedo gerado a partir das imagens corrigidas e registradas dispostas em sequência crescente.

### 5.3.2. Tratamento do ruído

A série temporal possui limitações oriundas de interferências atmosféricas, cobertura de nuvens, variação radiométrica (oscilação do sensor, iluminação solar, entre outros) ou presença de outros ruídos que são feições comuns no sensoriamento remoto (DU et al., 2001; FURBY & CAMPBELL, 2001). Nesse sentido, torna-se prioritário a realização de tratamentos prévios dos dados temporais, segundo três etapas (CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009): (a) aplicação de um filtro móvel de mediana e (b) separação da fração sinal pela transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR) e (c) restituição dos dados NDVI utilizando a fração sinal.

O filtro de mediana é um caso particular da *i*<sup>ésima</sup> ordem estatística de uma série de números reais, utilizando uma janela móvel sobre a assinatura temporal e gerando valores de mediana. Organizando as observações em ordem crescente, a mediana gera o valor central da janela, requerendo operações não lineares simples. Considerando um ordenamento estatístico de  $N$  números reais,  $x(1) \cdots x(N)$ , onde  $N$  representa a janela do filtro digital, se o valor mínimo é  $x(1)$ , o máximo  $x(N)$ , sua mediana será  $M((N + 1) / 2)$ .

A Fração Mínima de Ruído (FMR) foi desenvolvida originalmente para o processamento de imagens hiperespectrais (GREEN et al., 1988), além de ser adequada para a eliminação de interferências mapeamentos aéreos de raio-gama (DICKSON & TAYLOR, 1998). A FMR é uma transformação semelhante à Análise de Componentes Principais (ACP), sendo linear e maximizando a razão sinal/ruído para o ordenamento das imagens, segundo sua qualidade (GREEN et al., 1988).

Para a transformação inversa FMR foi considerado o ponto de inflexão dos autovalores e a qualidade das imagens (Fig. 5.4). Essa transformação tem o objetivo de retornar os valores referentes aos índices de vegetação das séries temporais, eliminando a presença do ruído branco (não-correlacionados e com baixa variância), bem como atenuação de possíveis níveis oriundos da filtragem de mediana.

A utilização da FMR individualmente (CARVALHO JUNIOR et al., 2006; COUTO JUNIOR et al., 2011) ou em conjunto com o filtro de mediana (CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009; SANTANA et al., 2010) tem alcançado resultados promissores para a identificação e caracterização de fisionomias vegetais do Bioma Cerrado.

### **5.3.3. Detecção dos membros finais e Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais**

A geometria do convexo (modelo do simplex) é extremamente utilizada na detecção dos membros finais, pois estabelece um arranjo espacial para os pixels da imagem que descreve as relações de mistura dos materiais (BATENSON et al., 2000; BERMAN et al., 2004; WINTER, 1999; TOMPKINS et al., 1997, CARVALHO JUNIOR et al., 2005). Esta geometria é obtida quando os pixels são dispostos em um espaço n-dimensional de atributo, no qual seus eixos apresentam-se sem correlação e em sua inerente dimensionalidade como no caso das componentes da Análise de Principais Componentes - APC e FMR (SMITH et al., 1985, 1990; BATESON & CURTISS, 1993, 1996; BOARDMAN, 1993). Todos os pontos do interior do conjunto convexo podem ser considerados como combinações dos seus vértices. Desta forma, o conjunto do convexo, como retratação do espaço espectral, exhibe nos seus vértices os *pixels* puros, enquanto os demais *pixels* são provenientes de suas misturas (CARVALHO JÚNIOR et al. 2003).

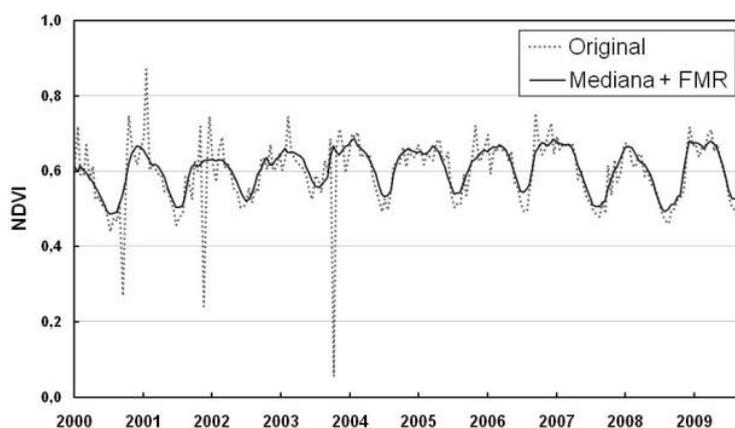
Carvalho Júnior et al. (2008) utilizaram este tipo de análise considerando espectros temporais de áreas naturais. No presente trabalho este procedimento é utilizado em áreas naturais e de uso antrópico. Esta abordagem permite uma nova concepção para a geometria do convexo onde se observa vértices que representa espectros de elementos invariantes no tempo (descrevem um mesmo ciclo anual) e outros que apresentam fortes mudanças de uso da terra. A presença de dois pontos invariantes (ou seja, de mesmo ciclo anual) como as relativas à agricultura e áreas naturais estabelecem um eixo invariante, enquanto o vértice contraposto representa áreas que apresentam mudanças relacionadas à conversão, ou seja, que variam o seu ciclo anual.

Utilizando de forma similar as análises de misturas espectrais (ADAMS et al., 1995) foi aplicado a regressão linear múltipla nos espectros temporais. Diferentemente da tradicional análise de mistura espectral, a aplicação da regressão linear considerando espectros temporais com ciclos anuais iguais e diferentes permite descrever um grau da mudança, que contrapõe a proposta inicial de quantificar a porcentagem dos elementos puros dentro do pixel.

## 5.4. RESULTADOS

### 5.4.1. Resultados do tratamento do ruído

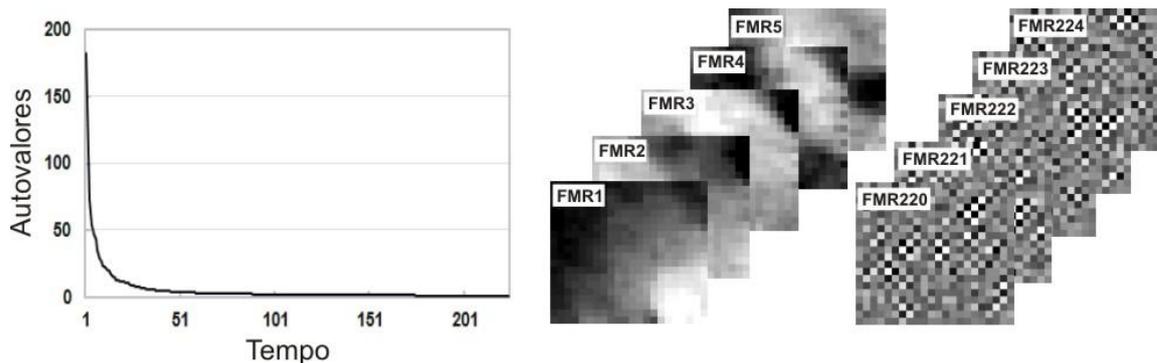
A combinação do filtro de mediana e transformação FMR é bastante simples e de rápido processamento e proporcionou a melhora da qualidade dos dados, com redução significativa da presença de ruídos do tipo impulso e eliminação das áreas com cobertura de nuvens ou sombra (Fig. 5.3).



**Fig. 5.3** - Espectros temporais NDVI original (linha pontilhada) com alta variação e presença de ruído, e espectros suavizados pela associação do filtro de mediana e Fração Mínima de Ruído (FMR) (linha preta).

Neste artigo foi utilizado o filtro de mediana com a janela de dimensão sete e passo um, gerando a eliminação dos ruídos do tipo impulso. Apesar dessa eliminação, podem ser gerados alguns patamares devido à repetição de valores.

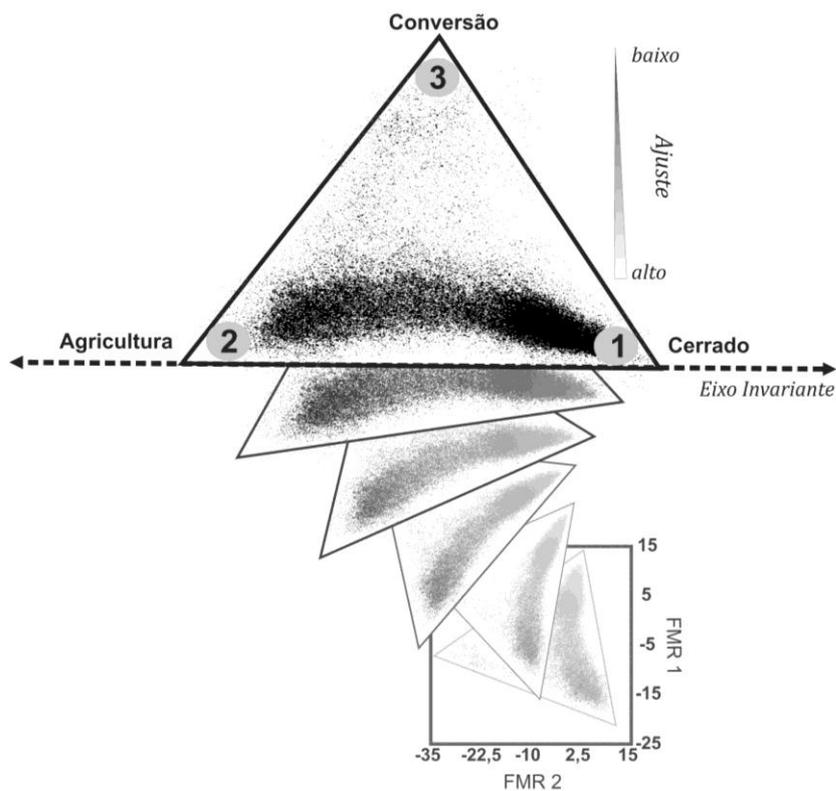
A transformação FMR ordenou os dados de acordo com a razão sinal/ruído, ou seja, a fração referente ao sinal foi segregada nas primeiras componentes. Neste estudo, como fração sinal foram consideradas as 20 primeiras bandas (componentes), segundo o gráfico dos autovalores e pela qualidade visual das imagens (Fig. 5.4). A transformação inversa da FMR gerou um espectro suavizado sem a presença de ruídos brancos (ruídos sem correlação e de baixa variância) e dos eventuais pequenos patamares (sucessão de valores repetidos) gerados após a filtragem de mediana (Fig. 5.3).



**Fig. 5.4** - Gráfico de autovalores (direita) e a qualidade decrescente das imagens (esquerda).

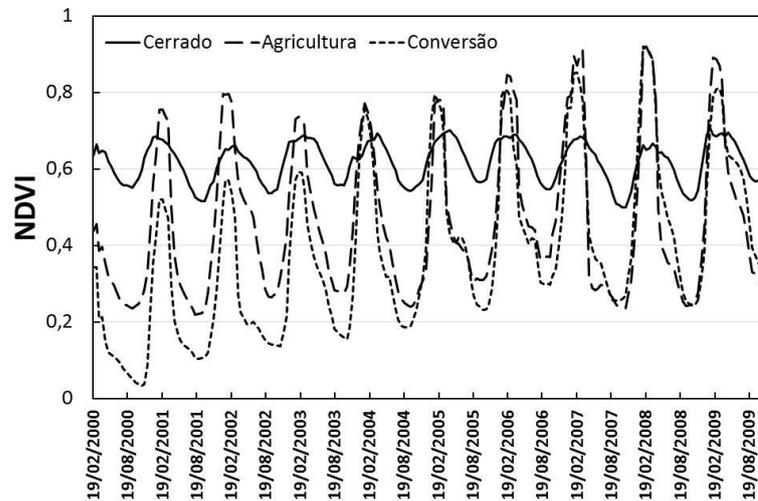
### 5.4.2. Resultados dos membros finais e Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais

O gráfico de dispersão obtido pela combinação entre as duas primeiras componentes FMR evidenciou uma distribuição triangular dos dados (Fig. 5.5). Observa-se que após a rotação desse triângulo, sua base forma um eixo invariante e em seus vértices encontram-se os membros finais relativos ao Cerrado (1) e Agricultura (2). O terceiro vértice corresponde à Conversão e evidencia o grau de ajuste do padrão temporal em relação aos invariantes, sendo decrescente à medida que se distancia da base.



**Fig. 5.5** - Gráfico de dispersão entre a 1ª e 2ª componente da FMR; os números correspondem aos membros finais.

O membro final Cerrado compreende as fitofisionomias em seu estado natural (original) ou pouco influenciado pela ação antrópica, apresentando riqueza florística similar a outras áreas dentro do bioma (FELFILI et al., 2001). Nesse sentido, seu padrão temporal evidenciou o comportamento fenológico relacionado com a sazonalidade e mostrou-se similar a padrões identificados dentro do bioma Cerrado (CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009). A concentração de pontos nesse vértice (Fig. 5.5) significa que durante o período de estudo (10 anos) esta cobertura manteve seu padrão sazonal. Esse comportamento temporal da vegetação de Cerrado apresentou valores médios de 0,6 de NDVI (Fig. 5.6). As variações dos índices entre 0,5 e 0,7 correspondem às estações dessa região, seca e chuvosa, respectivamente.



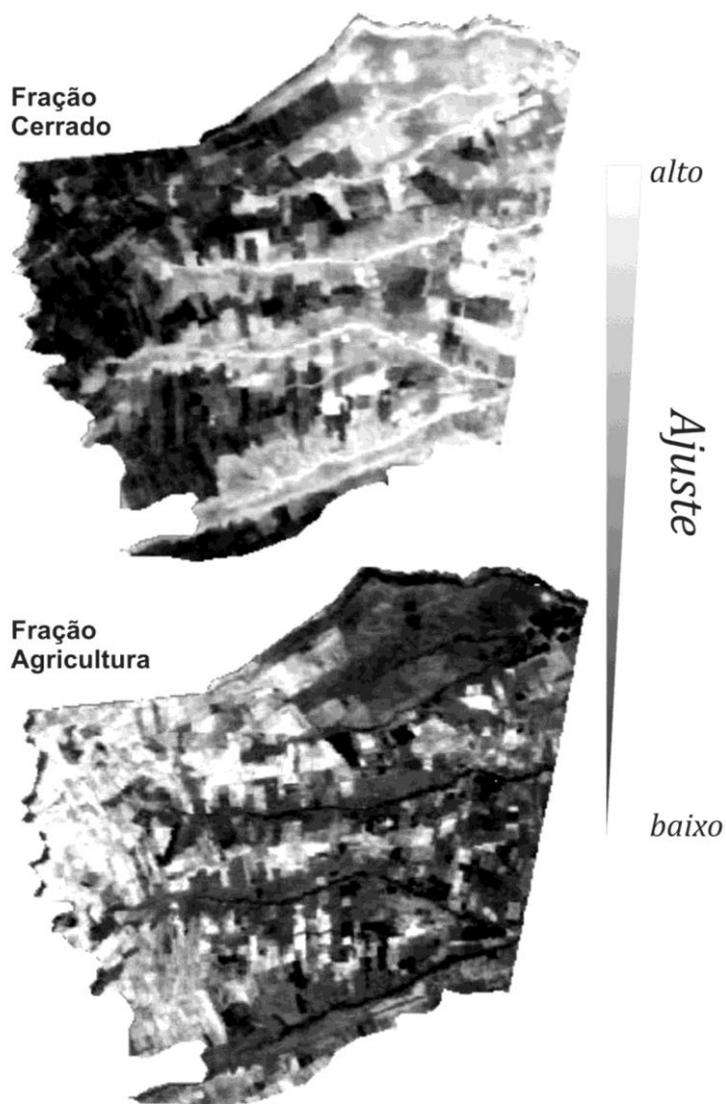
**Fig. 5.6** - Assinaturas temporais médias dos membros finais.

A Agricultura foi caracterizada pela ausência da vegetação natural, sendo representado por manejos empregados a mais de 10 anos (Fig. 5.5). Observa-se que a variação sazonal dessa cobertura apresenta variação superior a 60% (Fig. 5.6), segundo a etapa do manejo (por exemplo, plantio, fechamento do dossel e colheita). Os maiores valores de NDVI (~ 0,8) evidenciam o máximo vigor dos cultivos e, por outro lado, os menores (~ 0,25) correspondem ao período de colheita, ou seja, baixa cobertura vegetal. As menores variações dessa atividade fotossintética foram observadas em áreas que empregavam o sistema plantio direto.

Considerando que os padrões temporais médio do Cerrado e da Agricultura representam relação linear e formam um eixo invariante (Fig. 5.5), onde o ajuste encontra-se na direção da Conversão. Isso significa que esse membro final apresentou variações em sua cobertura, principalmente, após o ano 2000. Nesse contexto, a Conversão representa o ajuste a um dos padrões médios (Fig. 5.6). Observa-se que as mudanças sazonais mais intensificadas

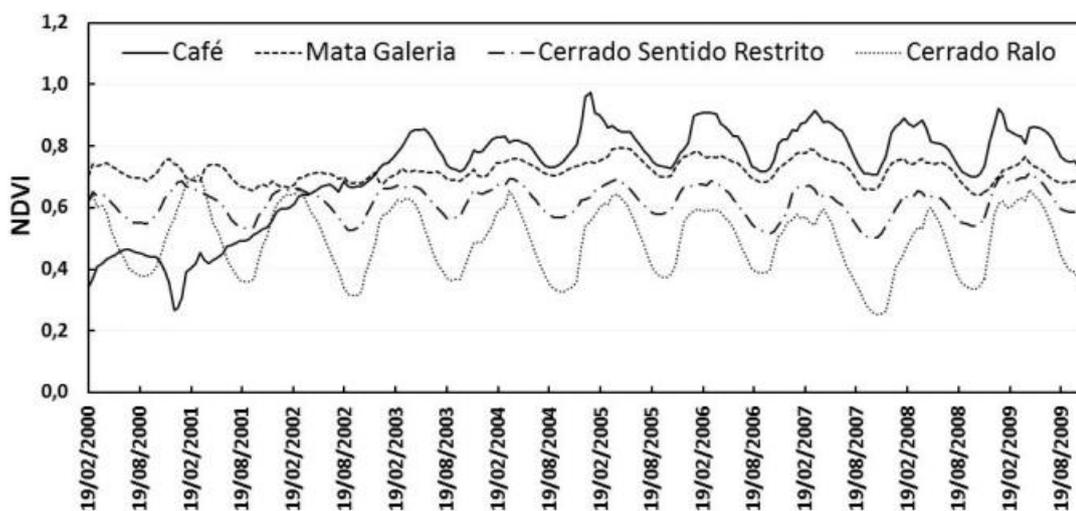
ocorreram a partir de 2004 e atingiu padrões mais similares ao observados na Agricultura em 2007. Antes desse período observa-se um aumento gradativo dos valores de NDVI, representando a transição da mudança da cobertura.

A partir dos membros finais temporais foi estabelecida uma regressão linear para os pixels da imagem. A fração Cerrado e a fração Agricultura localizaram-se a leste e a oeste, respectivamente (Figura 5.7). Essa distribuição espacial indicou um crescimento agrícola partindo de oeste para leste, confirmando o observado na última década nesse município (MENKE et al., 2009). Essa distribuição mostrou-se similar à segregação dos padrões temporais (Figura 5.5), onde o Cerrado encontra-se à direita e a Agricultura, à esquerda.



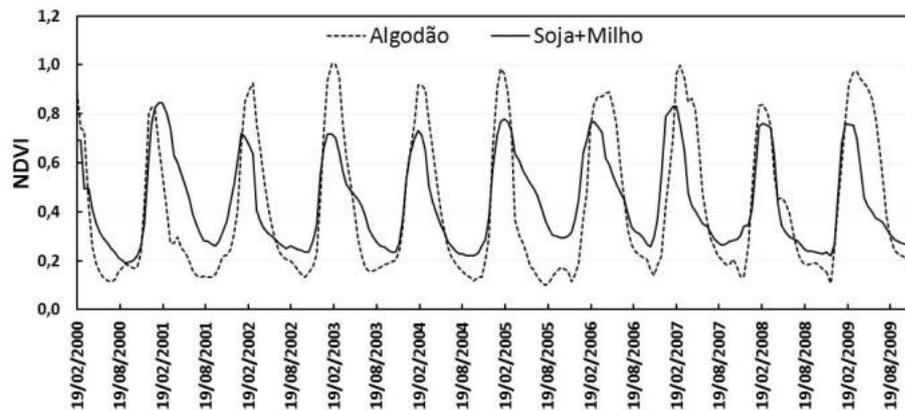
**Fig. 5. 7** - As proporções da Fração Cerrado (superior) e da Fração Agricultura (inferior), oriundas da Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais.

A vegetação natural, Fração Cerrado, encontrou-se na porção leste do município, sendo a maior proporção (pixels mais claros) referente às Matas de Galeria. Isso ocorre devido à sua associação aos cursos d'água, que proporciona condições de manutenção da atividade fotossintética, mesmo durante o período seco, reduzindo suas variações sazonais. As demais proporções estão relacionadas às formações savânicas, que apresentam maiores variações sazonais, acompanhando a densidade arbórea (Figura 5.8). Além das fitofisionomias, essa fração também evidenciou alto ajuste a cultivos de café estabelecidos, especialmente a partir de 2003. Esses padrões temporais mostraram-se similares à vegetação natural e indicaram colinearidade, onde a diferença encontrou-se na atividade fotossintética e densidade arbórea, respectivamente, o ganho e a amplitude.



**Fig. 5.8** - Perfis temporais das principais fitofisionomias do Cerrado e de plantios de café.

Observa-se que nos últimos 10 anos a Agricultura mostrou-se concentrada na porção oeste (Figura 5.7), corroborando com estudos multitemporais realizados neste município (MENKE et al., 2009). Isso se explica pelas características do relevo (mais plano) e do clima (chuvas bem distribuídas e em maior quantidade), proporcionando condições favoráveis para a mecanização agrícola. Nessa região, destaca-se a agricultura de sequeiro, podendo ser convencional (algodão) ou plantio direto (soja e milho). A principal diferença entre esses dois manejos reside na cobertura entre safras, sendo praticamente ausente no plantio convencional. Essa ausência ocasiona maior variação (amplitude) entre as fases do manejo do algodão devido à exposição do solo após a colheita (Figura 5.9). Nesse sentido, o emprego do plantio direto, por exemplo, em sucessão de soja e milho, mantém o solo coberto após a colheita.



**Fig. 5.9** - Perfis temporais dos manejos de Algodão e da sucessão Soja e Milho.

No intuito de caracterizar a ocupação agrícola no Bioma Cerrado foi gerada uma composição colorida utilizando as frações oriundas do AMLT (Fig. 5.10). Nessa composição os canais RGB representam, respectivamente, as frações: Agricultura, Cerrado e Conversão. Esse resultado converge com o trabalho realizado por MENKE et al., (2009), onde foram utilizados sensores com resoluções espaciais mais refinadas: 1) Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (2,5m); 2) LANDSAT (30m). Esse fato foi possível devido à alta resolução temporal do sensor MODIS (composição das melhores imagens dentro do período de 16 dias), combinada com a sequencia metodológica adequada para o tratamento dos ruídos presentes em séries temporais.



**Fig. 5.10** - Composição colorida das frações da Regressão Linear Múltipla dos Espectros Temporais, onde os canais RGB são, respectivamente, Agricultura, Cerrado e Conversão.

## 5.5. CONCLUSÃO

A utilização de séries temporais mostra-se importante fonte de informação dos padrões de cobertura e manejo, apresentando grande potencial para o monitoramento das dinâmicas no bioma Cerrado. Esse acompanhamento da superfície terrestre tem sido feito através da relação entre dados orbitais e fatores biofísicos, principalmente a vegetação. Dentre os principais indicadores, destacam-se os índices de vegetação, especialmente, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

O conhecimento das mudanças que ocorrem na cobertura terrestre tem sido ampliado devido ao aprimoramento de sensores orbitais como o *Moderate Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Esse sensor tem por finalidade proporcionar a realização de estudos sistêmicos e regionais, disponibilizando grande volume de dados espectrais e temporais. Uma importante característica desse sensor é sua resolução temporal, que pode chegar a ser diária.

Neste trabalho foram utilizados dados obtidos a cada 16 dias para a construção de uma série temporal. Porém, essas séries mostram-se influenciadas por ruídos oriundos de interferências atmosféricas, fator limitante para o seu pleno emprego. Sabendo desses problemas, torna-se relevante a geração de alternativas para aumentar a relação sinal/ruído das séries temporais.

Nesse contexto, foi empregado o filtro de mediana associado à transformação da Fração Mínima de Ruído (FMR). O tratamento realizado permitiu a geração de perfis temporais suavizados, evidenciando as principais características da cobertura e manejo, destacando três membros finais, relativos a essa dinâmica.

O primeiro membro é o Cerrado, que abrange as fitofisionomias originais com sazonalidade marcada e variação de seus valores de NDVI associados à atividade fotossintética e densidade arbórea. O segundo membro final corresponde à Agricultura, onde não existe mais vegetação natural há mais de uma década, e sendo caracterizada pela grande amplitude do NDVI, oriunda dos períodos de plantio e colheita. O último membro final destaca o ajuste aos dois membros anteriores, denominado Conversão, representou alterações da cobertura apenas nos últimos 10 anos.

Os procedimentos metodológicos superaram a limitação da resolução espacial com sua alta resolução temporal. Nesse sentido, este trabalho apresenta potencial de discriminação de mudanças na paisagem.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS JB, SABOL DE, KAPOS V, ALMEIDA FILHO R, ROBERTS DA, SMITH MO & GILLESPIE AR. 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote sensing of Environment*, 52:137-154.
- BATESON CA, ASNER GP, WESSMAN CA. 2000. Endmember bundles: a new approach to incorporating endmember variability into spectral mixture analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 1083-1094.
- BATESON CA, CURTISS B. 1993. A tool for manual endmember selection and spectral unmixing. In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA. Summaries, JPL Publication 93-26, p.3-6.
- BATESON CA, CURTISS B. 1996. A method for manual endmember selection and spectral unmixing. *Remote Sensing of Environment*, 55: 229–243.
- BATISTELLA M, GUIMARÃES M, MIRANDA, EE, VIEIRA HR, VALLADARES GS & MANGABEIRA JAC. 2002. Monitoramento da expansão agropecuária na Região Oeste da Bahia. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20, 39 pp.
- BERMAN M, KIIVERI H, RYAN L, ERNST A, DUNNE R, HUNTINGTON JF. 2004. ICE: A statistical approach to identifying endmembers in hyperspectral images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10): 1-11.
- BOARDMAN JW. 1993. Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts: In: Annual JPL Airborne Geosciences Workshop, 4, Pasadena, CA. Summaries, JPL Publication 93-26, p.11-14.
- CAMPOS JEG & DARDENNE MA. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27: 269-282.
- CARVALHO JUNIOR AO, CARVALHO APF, GUIMARÃES RF, MENESES PR & SHIMABUKURO Y. 2003. Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria do Simplex. *Espaço Geografia*, 6(1): 147-173.
- CARVALHO JUNIOR AO, GUIMARÃES RF, MARTINS ES, CARVALHO APF, GOMES, RAT. 2005. Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de cerrado. *Revista Brasileira de Geofísica*, Niterói, 23: 159-172.
- CARVALHO JUNIOR OA, COUTO JUNIOR AF, SILVA NC, MARTINS ES, CARVALHO APF & GOMES RAT. 2009 Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). *Revista Brasileira de Cartografia*, 61:399-412.
- CARVALHO JUNIOR OA, HERMUCHE PM & GUIMARÃES RF. 2006. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÃ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24:319-332.
- CARVALHO JUNIOR OA, SAMPAIO CS, SILVA NC, COUTO JUNIOR AF, GOMES RAT, CARVALHO APF & SHIMABUKURO YE. 2008. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26:505-517.
- CARVALHO JUNIOR OA, SILVA NC, CARVALHO APF, COUTO JUNIOR AF, SILVA CR, SHIMABUKURO YE, GUIMARÃES RF & GOMES RAT. 2012. Combining noise-adjusted principal components transform and median filter techniques for denoising MODIS temporal signatures. *Revista Brasileira de Geofísica*, 30:147-157.

- CASTRO KB, MARTINS ES, GOMES MP, REATTO A, LOPES CA, PASSO DP, LIMA LAS, CARDOSO WS, CARVALHO JUNIOR OA & GOMES RAT. 2010. Caracterização Geomorfológica do município de Luís Eduardo Magalhães, BA escala 1:100.000. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 288, Embrapa – CPAC, Planaltina, DF, 33 p.
- COUTO JUNIOR AF, CARVALHO JUNIOR OA, MARTINS ES, SANTANA OA, SOUZA VV & ENCINA JI. 2011. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. *Revista Árvore*, 35:699-705.
- DEFRIES R, HANSEN M & TOWNSHEND JRG. 1995. Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 54:209–222.
- DEFRIES R & TOWNSHEND JRG. 1994. NDVI derived land cover classification at global scales. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3567–3586.
- DICKSON B & TAYLOR G. 1998. Noise reduction of aerial gamma-ray survey. *Exploration Geophysics*, 29:324-329.
- DU Y, CIHLAR J, BEAUBIEN, J & LATIFOVIC R. 2001. Radiometric normalization, composition, and quality control for satellite high resolution image mosaics over large areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 623-634.
- FELFILI JM & SILVA JUNIOR MC. 2001. Biogeografia do bioma Cerrado: estudo fitofisionômico da Chapada do Espigão Mestre do São Francisco. Brasília, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, 152p.
- FURBY SL & CAMPBELL, N.A. 2001. Calibrating images from different dates to like-value digital counts. *Remote Sensing of Environment*, 77:186-196.
- GOLDEWIJK K & RAMANKUTTY N. 2004. Land cover changes over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data set. *GeoJournal*, 61:335-344.
- GREEN AA, BERMAN M, SWITZER P & CRAIG MD. 1988. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26:65-74.
- HALL FG, STREBEL DE, NICKESON JE & GOETZ SJ. 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35:11-27.
- HUETE AR, DIDAN K, MIURA T, RODRIGUEZ P, GAO X & FERREIRA LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213.
- HUETE AR. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25:295-309.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). acesso em 30/01/2012.
- JUSTICE CO, TOWNSHEND JRG, VERMOTE EF, MASUOKA E, WOLFE RE, SALEOUS N, ROY DP & MORISETTE JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83:3-15.
- KANG S, RUNNING SW, LIM J, ZHAO M, PARK C & LOEHMAN R. 2003. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: An application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 86:232– 242.
- LAMBIN E, GEIST H & LEPERS E. 2003. Dynamics of land-use and land-cover changes in tropical regions. *Annual Review of Environment Resources*, 28:205-241.
- LATORRE ML, CARVALHO JUNIOR OA, SANTOS JR & SHIMABUKURO YE. 2007. Integração de dados de sensoriamento remoto multi-resoluções para a representação da cobertura da terra

utilizando campos contínuos de vegetação e classificação por árvores de decisão. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25:63-74.

MENKE AB, CARVALHO JUNIOR OA, GOMES RAT, MARTINS ES & OLIVEIRA SN. 2009. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). *Sociedade e Natureza*, 21:315-326.

PRINCE SD. 1991a. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12:1313–1330.

PRINCE SD. 1991b. Satellite remote sensing of primary production: Comparison of results for Sahelian grasslands 1981–1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12:1301–13.

RAMANKUTTY N & FOLEY J. 1998. Characterizing patterns of global land use: an analysis of global cropland data. *Global Biogeochemistry Cycles*, 12:667-685.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, R.M.T. 1998. Fitofisionomia do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (Eds.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: EMBRAPA- CPAC, p.89-166.

RUNNING SW, LOVELAND TR, PIERCE LL, NEMANI RR & HUNT ERJ. 1995. A remote sensing based vegetation classification logic for global land cover analysis. *Remote Sensing of Environment*, 51:39-48.

SAKAMOTO T, YOKOZAWA M, TORITANI H, SHIBAYAMA M, ISHITSUKA N & OHNO HA. 2005. Crop detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96:366-374.

SANTANA AO, CARVALHO JUNIOR OA, PIMENTEL CMM, GOMES RAT, OLIVEIRA SN. 2010. Modelagem de espectros temporais NDVI-MODIS, no período de 2000 a 2008, na bacia do rio Paracatu, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(1): 47-60.

SILVA CR. 2008. *Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro*. Rio de Janeiro, CPRM, 264p.

TOMPKINS S, MUSTARD JF, PIETERS CM, FORSYTH DW. 1997. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 59: 472-489.

TRIMBLE S & CROSSON P. 2000. US soil erosion rates: myth and reality. *Science*, 289:248-250.

TUCKER CJ, NEWCOMB WW, LOS SO & PRICE SD. 1991. Mean an inter-year variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 12:1133–1135.

VERMOTE E, EL SALEOUS N, & JUSTICE C. 2002. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2):97-111.

VITOUSEK PM, MOONEY HA, LUBCHENCO J, MELILLO JM. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277:494-499.

WESSELS KJ, PRINCE SD, FROST PE & VAN ZYL D. 2004. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 91:47–67.

WINTER M. 1999. Fast autonomous spectral endmember determination in hyperspectral data. In: *Int. Conf. Applied Geologic Remote Sensing*, 13, Vancouver, BC, Canada, v. 2, p. 337–344.

WOLFE RE, ROY DP & VERMOTE E. 1998. MODIS land data storage gridding and compositing methodology: level 2 grid. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:1324-1338.

ZHANG X, FRIEDL MA, STRAHLER AH, HODGES JCF, GAO F, REED BC & HUETE A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84:471-475.

## CAPÍTULO 6 – ESTRUTURAÇÃO DE BIBLIOTECA TEMPORAL DAS PRINCIPAIS COBERTURAS DA TERRA DO BIOMA CERRADO

**Resumo** – O presente artigo objetivou estruturar uma biblioteca de assinaturas temporais das principais coberturas da terra do Cerrado a partir de dados do *Moderate Resolution Imaging -Spectroradiometer* (MODIS) e caracterizá-los. O tratamento dos ruídos presentes nestas séries temporais foi realizado através do emprego conjunto do filtro de mediana e da transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR). As assinaturas temporais foram elaboradas considerando a produção de biomassa (NDVI), o fechamento de dossel (EVI), e o conteúdo de água foliar (NDWI), abrangendo 12 anos e com dados obtidos a cada de oito dias. Os comportamentos temporais destacados caracterizaram três ambientes: Agrícola; Savânico; e Floresta Estacional Decidual. Dentro do Ambiente Agrícola foram destacados dois sistemas de produção, o plantio convencional e o plantio direto. A diferença entre os resultados deste trabalho e os dados censitários referentes a área plantada foi inferior a 2 %, servindo como subsídio para a estruturação de arranjos produtivos regionais, financiamento de crédito rural e previsão de safra.

**Palavras chaves:** Assinatura temporal, sistemas de produção, índices de vegetação, MODIS.

### TEMPORAL LIBRARY OF THE MAIN LAND COVER OF THE CERRADO BIOME

**Abstract** – This paper aimed to structure a temporal signatures library of the main land cover in the Brazilian Savannah using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data and to characterized them. The noise inherent in these time series was reduced by the combined use of the median filter e Minimum Noise Fraction (MNF). The temporal signatures were produced for the biomass production (NDVI), canopy closure (EVI) and leaf water content (NDWI) in 12-years period and updated by orbital data every eight days. The temporal behaviors highlighted characterized three environments: Crop, Savannic and Deciduous Forest. In the Crop environment there were characterized two production systems, the conventional and no-tillage. The results between the present study and census of planted area diverged less the 2 %, promoting regional productive arrangements, rural credit financing and crop forecasting.

**Keywords:** Temporal signature, production system, vegetation indices, MODIS.

### 6.1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto teve um progresso com o desenvolvimento de técnicas de espectroscopia de imageamento, que permitiram a distinção de alvos terrestres através de assinaturas espectrais, considerando a abundancia e o estado físico das feições de absorção. Estas distintas curvas espectrais foram organizadas em bibliotecas espectrais, considerando: os alvos, as faixas espectrais e os tipos de sensores remotos (HEROLD et al., 2004; BALDRIGE et al. 2009).

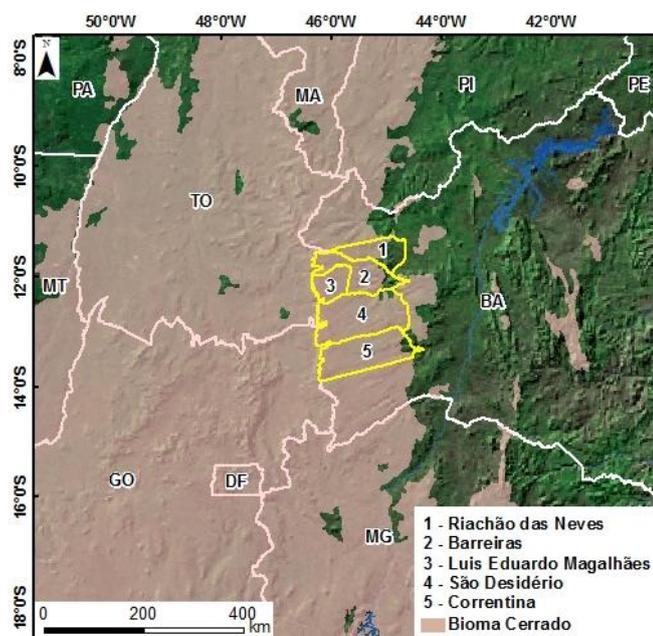
O desenvolvimento de sensores orbitais com alta resolução temporal possibilitou a caracterização espectral ao longo do tempo, impulsionando uma nova abordagem no processamento digital de imagens de satélite que permitiu a caracterização dos alvos da superfície terrestre por assinaturas temporais (SUN et al., 2012). Dentre esses sensores, destaca-se o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), que proporcionou estudos do funcionamento dos sistemas globais e da sazonalidade da cobertura da terra (JUSTICE et al., 2002). Assim, vários estudos consideram os índices de vegetação de séries

temporais MODIS para descrever os estágios fenológicos da vegetação natural e dos cultivos agrícolas no Brasil (COUTO JUNIOR et al., 2011; FONSECA et al. 2010; GALFORD et al., 2008; JUNGES e FONTANA, 2009; RUDORFF, 2007; XAVIER et al., 2006).

A organização das assinaturas temporais dos diferentes alvos que compõem a paisagem permite a formulação de uma biblioteca temporal, analogamente à biblioteca espectral. Neste contexto, o presente trabalho possui como objetivo estruturar uma biblioteca de assinaturas temporais relativas à vegetação de Cerrado e sistemas de produção através de séries temporais do sensor MODIS na região do Oeste da Bahia. A partir das assinaturas temporais foi realizada uma classificação de cobertura e uso da Terra.

## 6.2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram avaliados cinco municípios da mesorregião do Extremo Oeste da Bahia: Barreiras, Correntina, Luis Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério (Fig. 6.1), correspondendo juntos a uma área de cerca de 45.000 km<sup>2</sup>. A região apresenta duas estações climáticas bem definidas, possuindo um clima úmido na porção oeste dos municípios e um clima subúmido seco na porção leste. Estes municípios estão inseridos dentro do Bioma Cerrado, caracterizados por Formações savânicas, Matas Ciliares e Florestas Estacionais Deciduais (SANTANA et al. 2010a). Devido as suas características geomorfológicas e climáticas esta região tem apresentado uma intensa expansão agrícola (MENKE et al., 2009).



**Fig. 6.1** - Localização dos municípios (linha amarela) no oeste do estado da Bahia, inseridos dentro do Cerrado.

Foram utilizados dados do sensor MODIS, disponibilizados gratuitamente pela *National Aeronautic Space Administration* (NASA), corrigidos e corrigidos das interferências atmosféricas (JUSTICE et al., 2002). O produto empregado foi o MOD09 (reflectância da superfície), compreendendo o período de 2000 a 2012, referente a uma composição de oito dias e reamostrado para 250 metros de resolução espacial.

As séries temporais das bandas espectrais foram utilizadas para a geração dos seguintes índices de vegetação: (a) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al. 1973) índice de vegetação mais amplamente utilizado; (b) *Enhanced Vegetation Index* (EVI) consiste em uma melhora ao índice NDVI proporcionando uma redução da influencia do solo e da atmosfera e evitando a saturação do NDVI em altos níveis de biomassa fotossinteticamente ativa (HUETE et al., 1997); e (c) *Normalized Difference Water Index* (NDWI) evidencia o conteúdo de água na estrutura interna da folha (GAO, 1996).

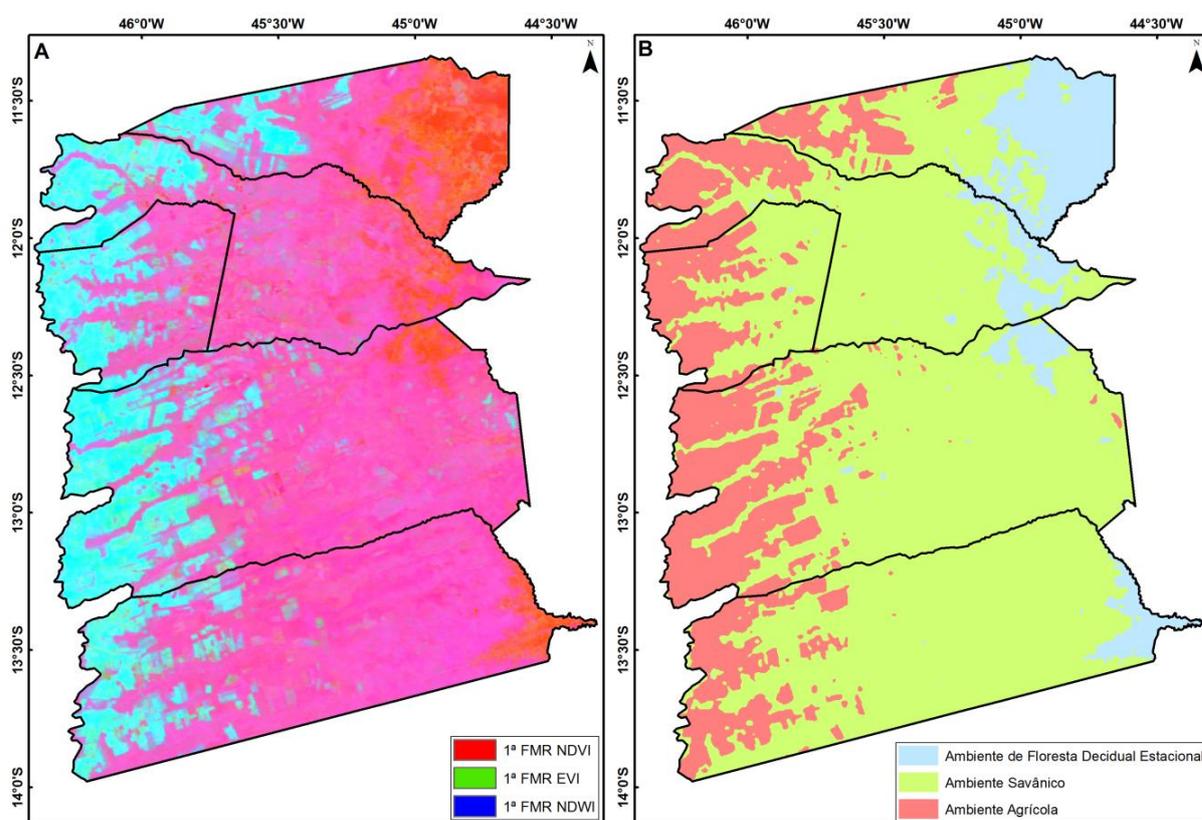
No entanto, estas séries temporais mostram-se afetadas por ruídos provenientes de cobertura de nuvens. No presente trabalho foi utilizada a combinação dos métodos de filtragem pela mediana e a Fração Mínima de Ruído (FMR) (CARVALHO JUNIOR et al., 2012). A filtragem pela mediana ao longo do espectro temporal utilizou uma janela móvel de dimensão nove e de passo um. A FMR tem a função de maximizar a razão sinal/ruído para o ordenamento das imagens, segundo sua qualidade (GREEN et al., 1988). A transformação inversa FMR considerando as componentes de sinal, determinadas pelos autovalores e qualidade das imagens, possibilita a eliminação do ruído.

A biblioteca temporal foi construída a partir das séries temporais tratadas referentes aos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI). A delimitação de ambientes foi realizada por meio de análise exploratória das primeiras componentes das transformações FMR dos índices. A discriminação destes ambientes foi realizada através do emprego do classificador não supervisionado *Kmeans*. Dentro do Ambiente Agrícola foram caracterizadas as similaridades entre os comportamentos temporais do plantio convencional (algodão) e do plantio direto (soja e o milho), através do algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM).

### **6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O emprego conjunto do filtro de mediana e da transformação FMR proporcionou melhorias na qualidade dos dados, com redução significativa da presença de ruídos do tipo impulso e eliminação das áreas com cobertura de nuvens ou sombra.

A integração das primeiras componentes dos índices avaliados por meio de composição colorida proporcionou a distinção de três ambientes (Fig. 6.2). O primeiro com coloração magenta (Figura 2A), apresentando padrões temporais similares ao Cerrado sentido restrito (CARVALHO JUNIOR et al., 2008, 2009; SANTANA et al., 2010). O segundo ambiente apresentou coloração avermelhada (Fig. 6.2A), onde foram observadas maiores variações sazonais, evidenciando o início da transição Cerrado-Caatinga. O terceiro (ciano) com predominância do NDWI, mostrou-se caracterizado por formas geométricas e demanda de água distinta dos demais e evidenciou as áreas com maior precipitação, reduzindo de oeste para leste (Fig. 6.2A).



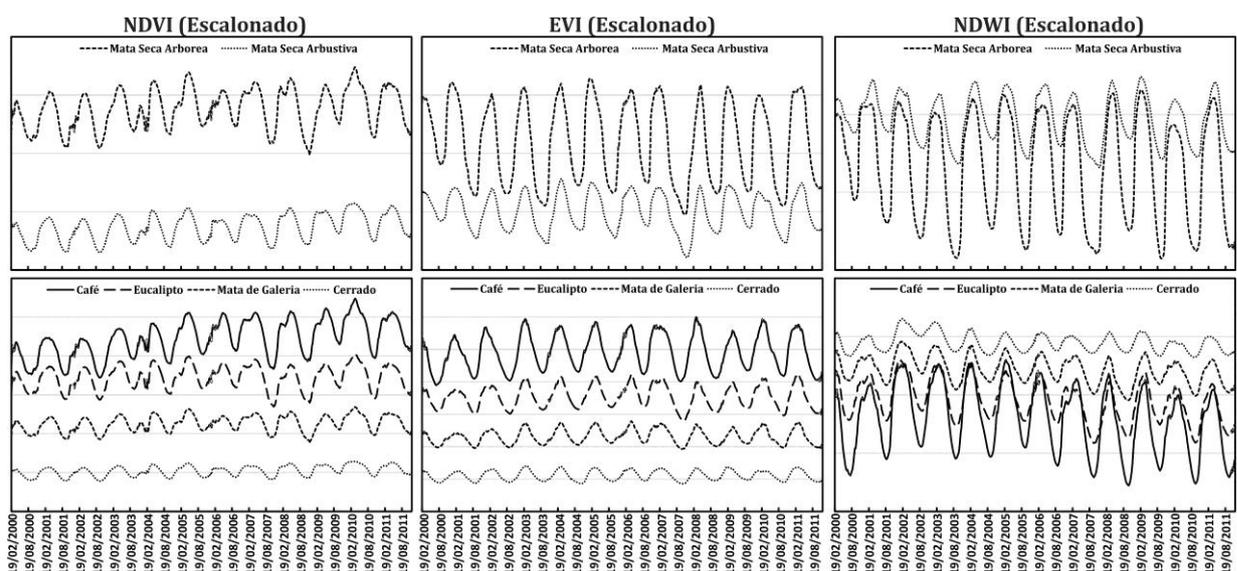
**Fig. 6.2** - Composição colorida das primeiras componentes FMR do NDVI, EVI e NDWI, respectivamente nos canais RGB (A); classificação não supervisionada Kmeans, considerando essas componentes FMR, evidenciando a separação de três ambientes temporais (B).

O classificador não-supervisionado Kmeans mostrou-se eficiente para discriminação destes três ambientes. O primeiro foi o Agrícola, evidenciando o comportamento ao longo do tempo de culturas agrícolas (Fig. 6.2B), onde se destacam os cultivos de algodão, soja e milho em aproximadamente 9.870 km<sup>2</sup>.

O segundo é o Ambiente Savânico (Fig. 6.2B) representa, predominantemente, o comportamento temporal das formações savânicas presentes no Cerrado, além do cultivo do café e o reflorestamento (eucalipto), variando apenas suas amplitudes e seus valores médios. Essa classe abrangeu uma área de 30.510 km<sup>2</sup>, indicando que os cinco municípios em conjunto possuem cerca de 70 % de cobertura natural deste bioma.

Por último, o Ambiente de Floresta Estacional Decidual (Fig. 6.2B) representou as vegetações de Matas Secas presentes em clima árido e sob a influência de rochas carbonáticas. Observou-se uma variação em função da proporção do estrato arbustivo e arbóreo, onde a camada arbustiva evidencia maior variação sazonal e menores valores médios dos índices de vegetação. Nesta área foram encontrados os usos antrópicos mais antigos, predominantemente, as pequenas propriedades rurais e os usos múltiplos da terra, correspondendo a uma área de cerca de 4.300 km<sup>2</sup>.

Os valores dos índices do Ambiente Agrícola evidenciaram as maiores variações sazonais e se mantiveram o menor intervalo durante o período máximo de produção de biomassa (Fig. 6.3). Os Ambientes Savânico e Floresta Estacional Decidual apresentaram variações sazonais similares, diferenciando apenas na amplitude e nos valores máximos. Este comportamento evidencia que durante a estação chuvosa (outubro a abril) a Floresta Estacional apresenta maior produção de biomassa.

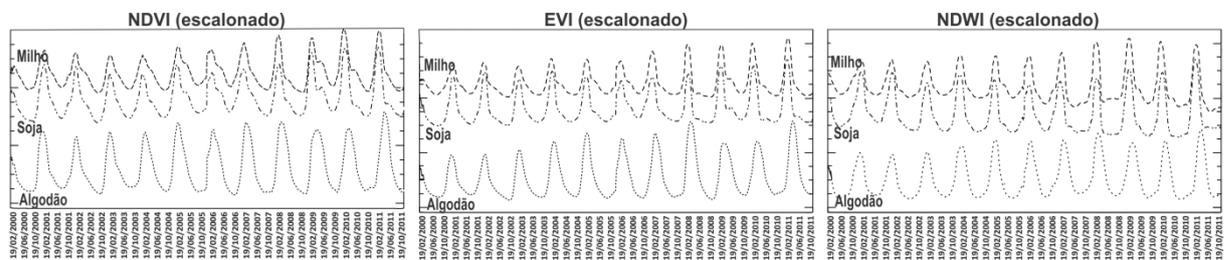


**Fig. 6.3** - Assinaturas temporais dos índices de vegetação (NDVI, EVI e NDWI) encontradas dentro do Ambiente Floresta Estacional Decidual (Mata Seca Arbustiva e Arbórea) e do Ambiente Savânico (Cerrado, Mata de Galeria, Eucalipto e Café).

Dentro dos padrões fenológicos encontrados no Ambiente de Floresta Estacional Decidual foi possível distinguir dois estratos de coberturas de vegetação estacional, denominadas de Mata Seca Arbustiva e a Arbórea (Fig. 6.3). Considerando a produção de biomassa (NDVI), foi possível observar que a amplitude entre elas foi similar, porém, foram observados valores médios superiores na Mata Seca Arbórea, devido a seu maior porte e maior densidade de árvores. Esta produção de biomassa superior evidencia uma maior variação sazonal no fechamento do dossel (EVI), uma vez que são perdidas praticamente todas suas folhas durante a estação seca. A Mata Seca Arbustiva apresentou menor variação sazonal de conteúdo de água foliar (NDWI), por apresentar menor porte e folhas menores.

Considerando as variações internas do Ambiente Savânica, observou-se similaridade no comportamento temporal das áreas de Cerrado, Mata de Galeria, Reflorestamento (eucalipto) e Café em relação ao NDVI (Fig. 6.3). O Cerrado apresentou as maiores variações sazonais e os menores valores de NDVI, devido à estrutura de suas árvores e à distribuição mais esparsa, quando comparada às demais coberturas. Em relação ao EVI, o café apresentou a maior variação sazonal, oscilando entre os períodos de repouso e o vegetativo. Neste sentido, o conteúdo de água foliar (NDWI) do café apresentou os maiores valores, evidenciando a eficiência do uso da água.

Os comportamentos da soja e milho apresentaram alta similaridade de NDVI, com variação sazonal mais acentuada na soja (Fig. 6.4). Estas culturas são empregadas no sistema de plantio direto, apresentando variação sazonal superior à observada no sistema de irrigação de pivô central, porém, inferior ao plantio convencional (algodão). O algodoeiro apresentou as maiores amplitudes, com variações de produção de biomassa de cerca de 70 % entre período de semeadura e máximo vigor. Este fato indica maior exposição do solo nesse período, com produção relativa de biomassa inferior a 15 %.

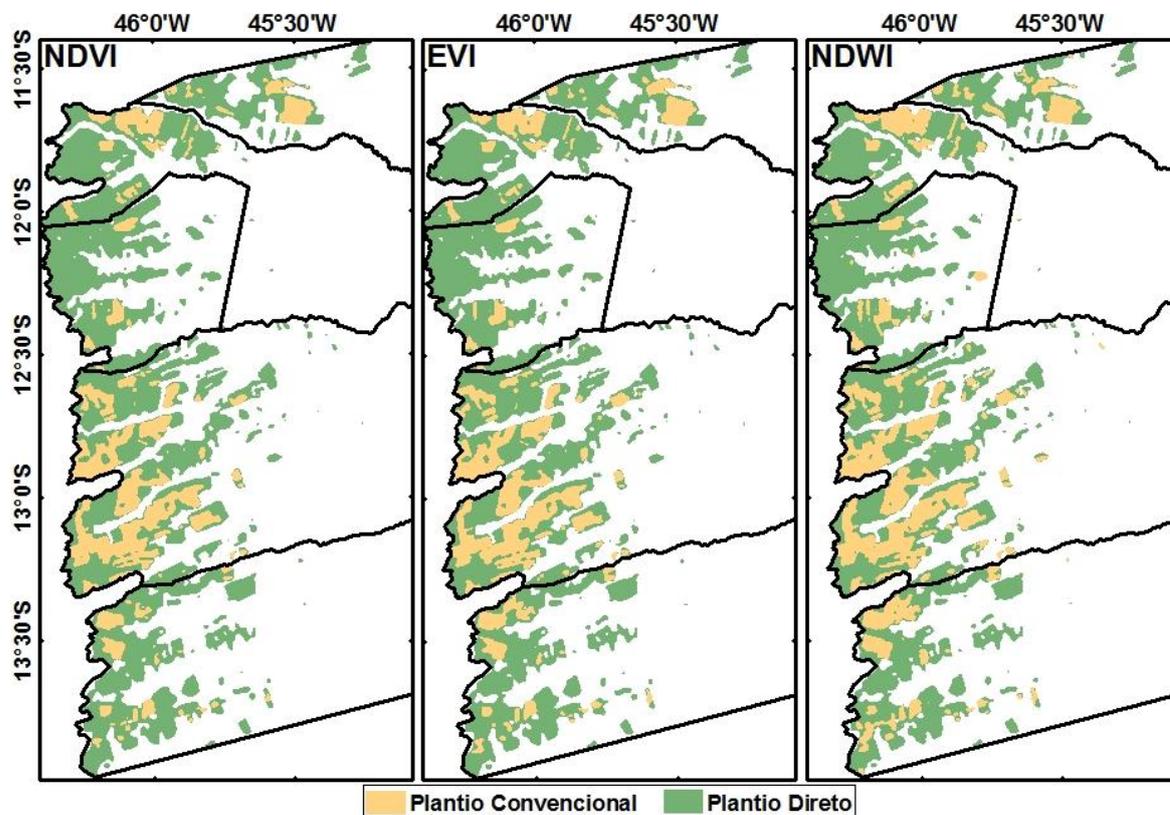


**Fig. 6.4** – Assinaturas temporais dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI: sistema de plantio direto com a sucessão soja-milho e milho-soja, onde soja (ponto e traço) representa soja como primeira cultura e milho (tracejada), o milho como primeira cultura; sistema de plantio convencional de algodão (pontilhada).

Os padrões de EVI da soja e do milho, como primeira cultura, mostraram-se semelhantes (Fig. 6.4), evidenciando potencial similar de manutenção da cobertura da terra independente da cultura ordem da sucessão. Na área de estudo, esta sucessão cultural é utilizada dentro o sistema de manejo de plantio direto, proporcionando menor exposição do solo em relação ao plantio convencional (algodão). A assinatura temporal do EVI do algodão evidenciou as maiores variações de cobertura vegetal entre os períodos de semeadura e colheita, tendo sido observado valores de EVI inferiores a 0,10 (Fig. 6.4).

As culturas de soja e milho apresentaram conteúdos de água foliar (NDWI) similares e valores crescentes a partir do ano de 2008 (Fig. 6.4). Por outro lado, O algodão apresentou as maiores variações de NDWI. Estes resultados indicam que o sistema de plantio convencional (algodão) apresenta maior eficiência no aproveitamento da água durante a época chuvosa.

O emprego do algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) possibilitou a espacialização dos comportamentos temporais do NDVI, EVI e NDWI, para os dois sistemas de produção avaliados (Fig. 6.5). Considerando os valores de NDVI correspondentes à área plantada (IBGE, 2012), foram observadas variações inferiores a 2 %, devido à diferença entre a escala censitária e temporal. Este fato evidencia que a alta resolução temporal supera suas limitações de resolução espacial, possibilitando mapeamentos regionais detalhados.



**Fig. 6.5** - Distribuição espacial considerando o comportamento temporal dos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI para os sistemas de plantio convencional e direto.

## 6.4. CONCLUSÃO

A construção de biblioteca de assinaturas temporais mostra-se relevantes para o monitoramento da cobertura da terra, especialmente das culturas agrícolas, possibilitando a caracterização fenológica dos cultivos, discriminação espacial de compartimentos produtivos e a estimativa de área de sistemas de produção. Foram encontrados três ambientes temporais: o Agrícola, Savânico e Floresta Estacional Decidual. Foi observado que o sistema de irrigação por pivô central (café) apresentou a sazonalidade mais similar cerrado sentido restrito, evidenciando uma característica de sustentabilidade na produção. As variações sazonais do plantio convencional (algodão) do plantio direto (soja e milho) foram superiores que a cobertura natural. Estes resultados subsidiam a estruturação de arranjos produtivos regionais, financiamento de crédito rural e previsão de safra.

## REFERÊNCIAS

- BALDRIGDE, A.M. et al. The ASTER spectral library version 2.0. **Remote Sensing of Environment**, v.113, p.711-715, 2009.
- CARVALHO JUNIOR, O.A. et al. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, p. 399-412, 2009.
- CARVALHO JUNIOR, O.A. et al. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p.505-517, 2008.
- CARVALHO JUNIOR, O.A. et al. Combining noise-adjusted principal components transform and median filter techniques for denoising modis temporal signatures. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, p. 147-157, 2012.
- CARVALHO JUNIOR, O.A. et al. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÁ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 319-332, 2006.
- COUTO JUNIOR, A.F. et al. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 699-705, 2011.
- FONSECA, E.L. et al. Caracterização espectral multitemporal dos cereais de estação fria em imagens de satélite com média resolução espacial. **Ciência Rural**, v.40, n.10, p.2053-2059, 2010.
- GALFORD, G. et al. Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 576-587, 2008.
- GAO, B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.
- GREEN, A.A. et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- HEROLD, M. et al. Spectrometry for urban area remote sensing—Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, p. 304–319, 2004.

- HUETE, A. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. SIDRA – Banco de Dados Agregados. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso: 15 de maio de 2012.
- JUNGES, A.H. e FONTANA, D.C. Desenvolvimento das culturas de cereais de inverno no Rio Grande do Sul por meio de perfis temporais do índice de vegetação por diferença normalizada. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p.1349-1355, 2009.
- JUSTICE, C.O. et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.
- MENKE, A.B et al. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA - Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 21, p. 315-326, 2009.
- ROUSE, J.W. et al. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 301–317, 1973.
- RUDORFF, C.M. et al. Superfícies de resposta espectro-temporal de imagens do sensor MODIS para classificação de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.37, n.1, p.118-125, 2007.
- SANTANA, O.A. et al. Distribuição de espécies vegetais nativas em distintos macroambientes na região do Oeste da Bahia. **Espaço e Geografia**, v. 13, n. 2, p. 181-233, 2010a.
- SANTANA, O.A. et al. Modelagem de espectros temporais NDVI-MODIS, no período de 2000 a 2008, na bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p. 47-60, 2010b.
- SUN H, et al. Winter wheat mapping using temporal signatures of MODIS vegetation index data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 16, p. 5026-5042, 2012.
- XAVIER, A.C. et al. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, p. 755-768, 2006.

## *CAPÍTULO 7 – SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS BIOFÍSICAS APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DA PAISAGEM*

**Resumo** – O presente trabalho teve como objetivo avaliar os sistemas de produção a partir da formulação de um Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) que considera o comportamento ao longo do tempo de variáveis biofísicas entre áreas de cultivo e a referência da paisagem. Este estudo foi realizado na mesorregião do Extremo Oeste Baiano considerando: a) Cerrado sentido restrito (cobertura natural); b) Café (sistema de irrigação); c) Eucalipto (reflorestamento); d) Soja e Milho (plantio direto); e) Algodão (plantio convencional). A partir do IPP, gerados em função da assinatura do Cerrado sentido restrito foi possível separar dois grupos, sendo o primeiro referente às coberturas perenes (Café e Eucalipto) e, o segundo, representado pelas coberturas anuais (Algodão, Soja e Milho). Avaliando as duas estações (chuvosa e seca) foi possível constatar que as perenes apresentaram os comportamentos ao longo do tempo mais similares ao Cerrado sentido restrito. Este fato indica que estes sistemas de produção apresentam a capacidade reproduzir as características da vegetação natural, mimetizando as demandas fisiológicas da paisagem e mantendo sua produtividade. Os sistemas de plantio direto e convencional apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do tempo, indicando sua necessidade de entrada energética externa e evidenciando baixa sustentabilidade dentro desta paisagem. O IPP apresenta-se como alternativa para subsidiar estudos sobre a paisagem, fornecendo uma estimativa de sustentabilidade e reduzindo a subjetividade dos índices qualitativos.

**Palavras chaves:** Biblioteca de assinaturas temporais, paisagem, sistemas de produção, índices de vegetação, MODIS.

### **BIOPHYSICAL VARIABLE TIME SERIES APPLIED TO GENERATE LANDSCAPE PRODUCTIVITY INDEX**

**Abstract** – This work aimed to evaluate the production systems based on the Landscape Productivity Index (LPI) which considers the temporal behavior of biophysical variables between crops and a landscape reference (natural cover). This study was developed in the Western Bahia region considering: a) Cerrado sentido restrito (natural cover); b) Coffee (irrigation); c) Eucalyptus (reforestation); d) Soybeans and Corn (no-tillage); Cotton (conventional). From the LPI generated based on the temporal signature of Cerrado sentido restrito, two groups were identified, perennial cover (Coffee and Eucalyptus) and annual cover (Cotton, Soybean and Corn). It was highlighted the perennial cover showed the most similar temporal behavior than Cerrado sentido restrito in both seasons (rainy and dry). This means that production systems are capable of reproducing the natural cover characteristics, mimicking the landscape physiological demands and keeping the productivity. On the other hand, the no-tillage and conventional systems showed similar temporal behavior that indicated the necessity of external energetic inputs and evidencing low sustainability in the landscape. The LPI presents as an alternative to subsidize landscape studies providing sustainability estimation and reducing the subjectivity of the qualitative indices.

**Keywords:** Temporal signature library, landscape, production system, vegetation indices, MODIS.

## 7.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma dos grandes desafios dos pesquisadores, agricultores e formuladores de políticas públicas é a busca de sistemas agrícolas energeticamente eficientes e auto-sustentáveis. Na escala regional, a agricultura pode ter amplos impactos sobre a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos, conservação da biodiversidade e seqüestro de carbono (SCHERR & MCNEELY, 2008; LOVELL *et al.*, 2010). Uma das formas mais evidente de avaliar a sustentabilidade agrícola local é comparar os agrossistemas aos ecossistemas naturais (ALTIERI, 1999). A sustentabilidade diminui quando os agrossistemas e os ecossistemas naturais tornaram-se notavelmente diferentes em estrutura e função. Os sistemas de baixa sustentabilidade demandam cada vez mais energia e recursos externos para assegurar a fertilidade do solo, controle de pragas, disponibilidade de água, entre outros fatores que garantam o desenvolvimento da plantação. A dicotomia entre os ecossistemas naturais e os agrossistemas pode salienta diferentes danos ambientais, como: erosão, perda de fertilidade do solo, salinização e alcalinização, perda de recursos genéticos, a eliminação de inimigos naturais, ressurgência de pragas e resistência genética aos pesticidas, contaminação química e degradação dos recursos hídricos. Portanto, uma estratégia chave para a sustentabilidade é estabelecer um sistemas de produção agrícola adaptado ao ambiente cuja dependência de insumos externos e de recursos não-renováveis seja minimizada.

O balanço energético e a sustentabilidade do ambiente rural variam conforme os tipos de cultivos e sistemas agrícolas, sendo altamente específicos a uma determinada paisagem e região geográfica. Neste contexto, a vegetação natural do ecossistema presente consiste em um modelo de arquitetura e distribuição energia para a concepção e estruturação de um agrossistema sustentável a ser implantado (ALTIERI *et al.*, 1983). Assim, uma diretriz geral para avaliar a sustentabilidade de um sistema de cultivo é considerar a sua adaptação e suas semelhanças com as características estruturais e funcionais do ecossistema natural ou remanescente na área onde a agricultura está sendo praticada. No entanto, esta avaliação de sustentabilidade dos sistemas agrícolas de forma quantitativa exige a identificação e integração dos diversos fenômenos ambientais (químicos, físicos e biológicos); conforme os parâmetros de sustentabilidade (produtividade, composição de espécies, eficiência de utilização de recursos, resistência a pragas, distribuição de área foliar, entre outros), o que torna uma tarefa complexa. Esta análise também deve considerar um período extenso de tempo, uma vez, que a sustentabilidade é também referida pela capacidade de um agrossistema de manter uma estabilidade ao longo do tempo.

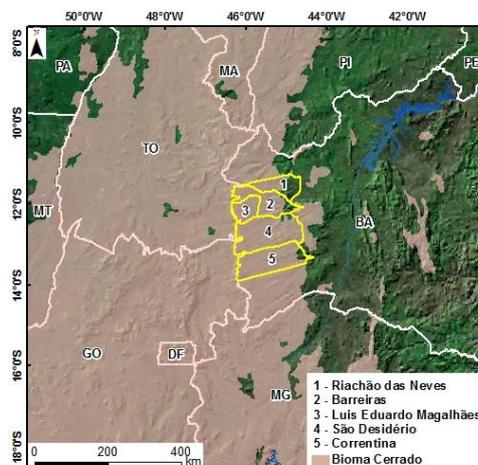
Neste contexto, uma eficiente fonte de informação da cobertura da terra são os dados provenientes de sensores orbitais que fornecem informações sobre as variáveis biofísicas e bioquímicas da vegetação e agrossistemas (LENZ-WIEDEMANN *et al.* 2012). No sensoriamento remoto foram desenvolvidos diferentes índices de vegetação que refletem aspectos específicos, tais como: produção de biomassa, o fechamento do dossel e o conteúdo de água foliar.

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) proporciona a construção de séries temporais contínuas gerando melhor descrição das variações sazonais (XIAO *et al.*, 2011; JIANG *et al.*, 2010; VERBESSELT *et al.*, 2010). A organização sequencial destes dados possibilita a estruturação de bibliotecas de assinaturas temporais e a comparação dos comportamentos dos diversos alvos da superfície terrestre ao longo do tempo. As informações temporais do MODIS têm sido aplicadas para avaliar a sustentabilidade e degradação de diferentes ecossistemas como: ambientes de savanas (HÜTTICH *et al.*, 2009, JACQUIN *et al.*, 2010), mediterrâneo (BASTARRIKA *et al.* 2011) e florestas (ANDERSON *et al.* 2011; KOLTUNOV *et al.*, 2009; MAEDA *et al.* 2011).

O presente trabalho possui como objetivo desenvolver o Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) que avalie a sustentabilidade dos sistemas agrícolas a partir de séries temporais de índices de vegetação comparando o ecossistema natural em relação aos agrossistemas. Desta forma, o presente método considera o desempenho de um sistema agrícola ao longo do tempo, não sendo restrito a uma representação do seu estado ou condição em um determinado momento.

A área de estudo localiza-se na mesorregião do Extremo Oeste Baiano, englobando os municípios de Barreiras, Correntina, Luis Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e São Desidério, que correspondendo a uma área de cerca de 45.000 km<sup>2</sup> (Figura 10.1). Esta região é um dos principais distritos do agronegócio no Cerrado, onde nas últimas décadas intensificou o uso agrícola, especialmente das culturas de algodão, soja, milho e café, além de reflorestamento de eucalipto (BATISTELLA *et al.*, 2002; MENKE *et al.*, 2009). O clima apresenta duas estações bem definidas: estação seca e fria (maio a setembro) e estação chuvosa e quente (outubro a abril) e precipitação média anual de cerca de 1500 mm, reduzindo esta distribuição de oeste para leste. A altitude média desta região é de 900 metros com suave decaimento de oeste para leste, respectivamente, dos Topos e para as Chapadas intermediárias (CASTRO *et al.*, 2010). Sobre estes solos, a composição florística e a estrutura

dos estratos arbóreos e arbustivos da vegetação original são representativas da fitofisionomia de Cerrado sentido restrito (FELFILI *et al.*, 2001, SANTANA *et al.* 2010a).



**Fig. 7. 1** - Localização dos municípios (linha amarela), inseridos na mesorregião do Extremo Oeste Baiano e dentro do bioma Cerrado.

## 7.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 7.2.1. Dados do sensor MODIS

Os dados do sensor MODIS são disponibilizados gratuitamente pela *National Aeronautic Space Administration* (NASA) estando georreferenciados e corrigidos das interferências atmosféricas (JUSTICE *et al.*, 2002). Neste trabalho foi utilizado o produto MOD09, relativo ao período entre 2000 e o final de 2011, com resolução temporal de oito dias e reamostrado para 250 metros de resolução espacial. Esse produto disponibiliza as reflectâncias abrangendo o intervalo de 459 nm até 2155 nm, sendo que esses dados são corrigidos (VERMOTE *et al.*, 2002). As séries temporais foram ordenadas de forma crescente em relação ao tempo. As informações temporais foram construídas de acordo com os seguintes critérios: (a) abrangência temporal: doze anos, compreendidos entre o início de 2000 e o final de 2011; (b) resolução temporal: oito dias; (c) amostragem temporal: a unidade de referência para a caracterização temporal será o Ano; e (d) apropriada ao sensor MODIS.

### 7.2.2. Índices de vegetação e tratamento dos ruídos

A partir das reflectâncias das séries temporais foram utilizadas os seguintes índices de vegetação: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) que realça a produção de biomassa; *Enhanced Vegetation Index* (EVI) que descreve o fechamento do dossel (HUETE *et al.*, 1997) e *Normalized Difference Water Index* (NDWI) que descreve o conteúdo de água

foliar (GAO, 1996). As formulações e as variáveis que as compõem podem ser visualizadas na Tab. 7.1.

**Tab. 9. 1** – Formulação do índices de vegetação utilizados no presente trabalho.

Índice	Formulação	Variáveis
NDVI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{Ver}}{\rho_{IVP} + \rho_{Ver}}$	$\rho_{IVP}$ - reflectância no infravermelho próximo (banda 2: 841-876 nm) $\rho_{Ver}$ - reflectância na faixa do vermelho (banda 1: 620-670 nm).
EVI	$G \frac{\rho_{IVP} - \rho_{Ver}}{\rho_{IVP} + C1 * \rho_{Ver} - C2 * \rho_{Azul} + L}$	$\rho_{IVP}$ e $\rho_{Ver}$ são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do MODIS $\rho_{Azul}$ , a reflectância do azul (banda 3: 459-479 nm); C1 e C2 - coeficientes de resistência atmosférica; L é o fator de correção de brilho do dossel; e G é o fator de ganho
NDWI	$\frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVC}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVC}}$	$\rho_{IVC}$ - reflectância no infravermelho de ondas curtas

No entanto, essas séries temporais possuem limitações oriundas de interferências atmosféricas, cobertura de nuvens, variação radiométrica (oscilação do sensor, iluminação solar, entre outros) ou presença de outros ruídos que são feições comuns no sensoriamento remoto. No presente trabalho para eliminar os ruídos das séries temporais foram utilizados os seguintes procedimentos (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2008, 2009): (a) aplicação de um filtro móvel de mediana;(b) separação da fração sinal pela transformação pela Fração Mínima de Ruído (FMR); e (c) restituição dos dados NDVI utilizando a fração sinal.

A Fração Mínima de Ruído (FMR) é uma transformação semelhante à Análise de Componentes Principais (ACP), que maximiza a razão sinal/ruído proporcionando um ordenamento das imagens segundo sua qualidade (GREEN *et al.*, 1988). A utilização da FMR individualmente (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2006; COUTO JUNIOR *et al.*, 2011) ou em conjunto com o filtro de mediana (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2008, 2009, SANTANA *et al.*, 2010b) tem alcançado resultados promissores para eliminação do ruído e caracterização de fisionomias vegetais do Bioma Cerrado.

### 7.2.3. Índice de produtividade da paisagem (IPP)

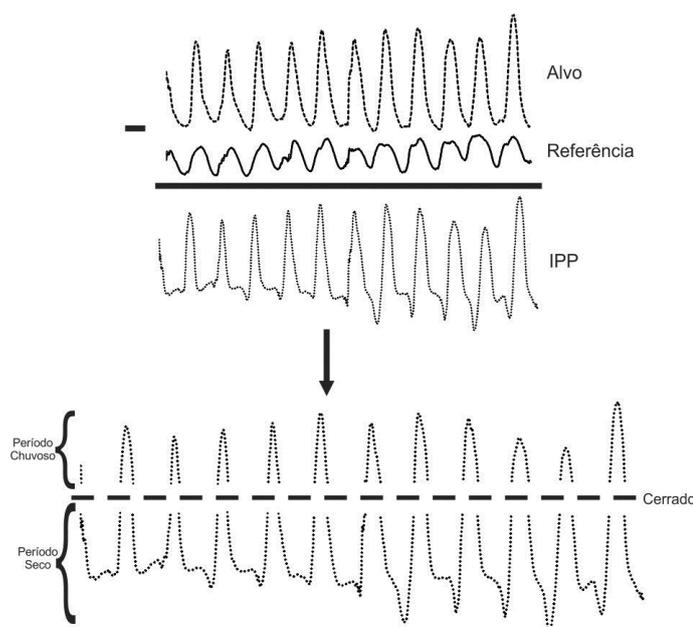
As assinaturas temporais organizadas nas bibliotecas foram comparadas em função de uma referência do ecossistema natural. Foi procedida a aritmética espectral simples de acordo com a seguinte equação:

$$IPP = AT_a - AT_r$$

onde,  $IPP$  corresponde ao Índice de Produtividade da Paisagem;  $AT_a$  assinatura temporal do alvo e  $AT_r$  assinatura temporal da referência (Fig. 7.2). Neste trabalho os alvos corresponderam aos sistemas de produção: convencional (algodão); plantio direto (soja e milho); irrigação (café) reflorestamento (eucalipto). A referência empregada nesta subtração foi a assinatura temporal do Cerrado sentido restrito.

A assinatura do IPP pode ser dividida em duas partes, onde o valor zero corresponde ao Cerrado e os valores acima e abaixo representam o período chuvoso e o seco, respectivamente (Fig. 7.2). Considerando estas estações foram gerados IPP anuais referentes em todos os sistemas avaliados.

Neste trabalho foram utilizados cultivos referentes aos quatro sistemas de produção: convencional (algodão); plantio direto (soja e milho); irrigação (café); e reflorestamento (eucalipto). O cultivo do algodão emprega o sistema convencional, onde há o revolvimento e exposição do solo durante após a época de colheita. As culturas de soja e milho são utilizadas em rotação dentro do sistema de plantio direto, que promove a redução do escoamento superficial e a mitigação da compactação do solo (BERNOUX *et al.*, 2006). A produção do café é baseada na irrigação por pivô central com associação de braquiária entre linhas e manejo de água baseada na tensiometria (SANO *et al.*, 2011). Os plantios de eucalipto apresentam a menor área plantada, mas com potencial para expansão especialmente pelo estabelecimento da integração com a lavoura e pecuária.



**Fig. 7.2** - Assinatura temporal do alvo (sistemas de produção) e da referência (Cerrado) e o resultado desta diferença, onde a parte acima da linha corresponde à estação chuvosa e abaixo, à seca.

### 7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 7.3.1. Resultados das assinaturas temporais

O emprego conjunto do filtro de mediana e da transformação FMR proporcionou melhorias na qualidade dos dados, com redução significativa da presença de ruídos. A assinatura temporal do Cerrado sentido restrito (Fig. 7.3) mostra-se adaptada às condições climáticas e às características ambientais (solo e relevo) locais. Foi possível visualizar reduções nos valores de NDVI durante as estações chuvosas dos anos de 2004 e 2006, ou seja, sua produção de biomassa foi inferior à média dos 12 anos avaliados. O EVI manteve-se constante mesmo considerando esta redução na produção de biomassa, o que indica que sua cobertura é mantida mesmo com atividade fotossintética reduzida. Os valores de NDWI apresentaram os maiores valores dentre as épocas secas no ano de 2002, o que indicando um período com maior disponibilidade de água (precipitação).

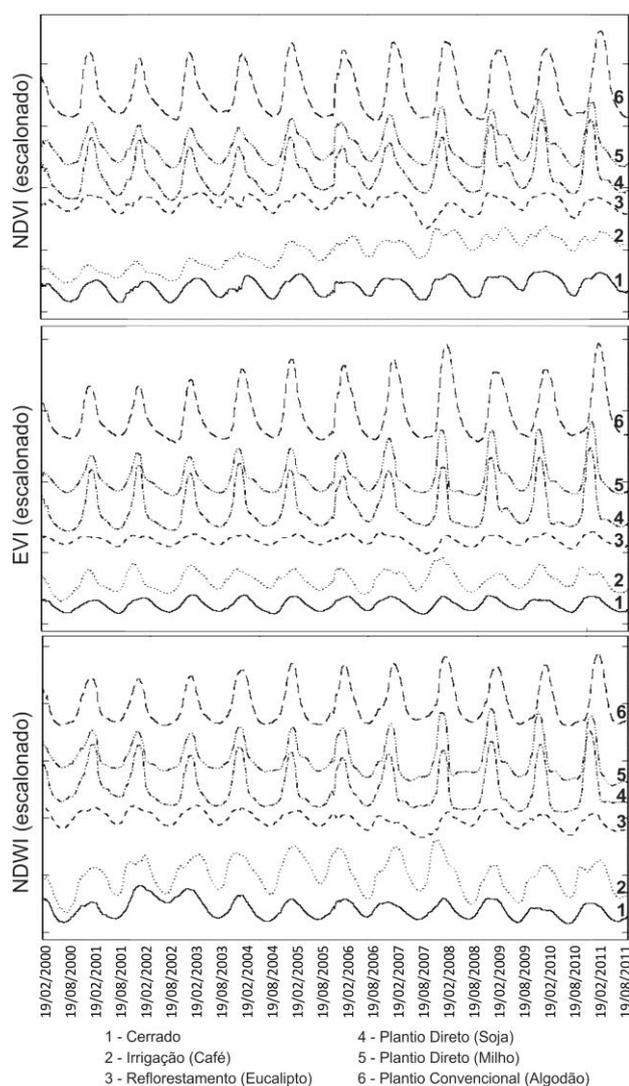


Fig. 7. 3 - Assinaturas temporais referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI.

As assinaturas temporais dos sistemas de irrigação (Café) e reflorestamento (eucalipto) apresentaram sazonalidade similar ao Cerrado, indicando adaptação destas coberturas vegetais às características ambientais (Fig. 7.3). Os valores de NDVI do café aumentaram até o ano de 2004, pois durante este período esta cultura estava em formação. O eucalipto apresentou quedas em todos os índices no ano de 2007, evidenciando o desbaste desta cobertura.

O sistema de plantio direto evidencia a rotação Soja-Milho, a mais empregada nesta região (Fig. 7.3). Observou-se que os valores de NDVI e EVI da soja mostraram-se superiores aos valores do milho, devido à maior produção de biomassa e fechamento do dossel proporcionado pela arquitetura da cultura da soja.

O Algodão apresentou as maiores variações sazonais dentre todas as coberturas avaliadas (Fig. 7.3). Estas variações são devidas à característica deste sistema de produção, que retira totalmente a cobertura vegetal após a colheita, deixando o solo exposto durante a estação seca.

### **7.3.2. Resultados do índice de produtividade da paisagem (IPP)**

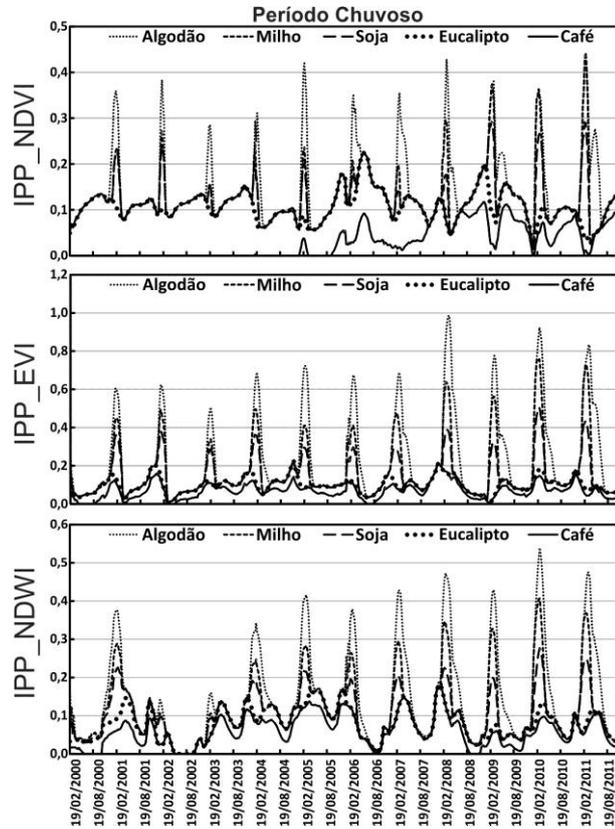
Os Índices de Produtividade da Paisagem (IPP) foram gerados para todos os índices de vegetação: NDVI, EVI e NDWI. A partir deste índice observou-se a existência de dois grupos, sendo um composto por cobertura perene (café e eucalipto) e o outro por cobertura anual (soja, milho e algodão). Em ambas as estações (seca e chuvosa) os valores das coberturas perenes apresentaram comportamentos mais similares ao Cerrado Sentido Restrito, além das menores variações sazonais.

Considerando o período chuvoso, observou-se que a escala dos valores do IPP\_NDVI das coberturas perenes variou na ordem de 10 % (Fig. 7.4). Até 2005 observou-se que o café apresentou demandas inferiores ao Cerrado sentido restrito, referência de produtividade desta paisagem. As maiores variações durante esta estação foram observadas no sistema de plantio convencional (algodão), além de um ciclo maior que o sistema de plantio direto (soja e milho).

Considerando o IPP do fechamento do dossel (IPP\_EVI) observou-se que as coberturas perenes (café e eucalipto) apresentaram as menores variações durante a estação chuvosa (Fig. 7.4). Além disso, pode ser observado que o período de fechamento do dossel destas coberturas manteve-se por mais tempo, evidenciando sua perenidade.

Em relação ao IPP do conteúdo de água foliar (IPP\_NDWI) foi observado que as culturas anuais apresentaram valores até 40 % superiores aos encontrados nas culturas perenes

(Fig. 7.4). Dentre os cultivos anuais, foi possível observar que a presença de água na folha do algodão (plantio convencional) manteve-se por maior tempo, evidenciando um ciclo mais longo que o observado na soja e no milho (plantio direto).

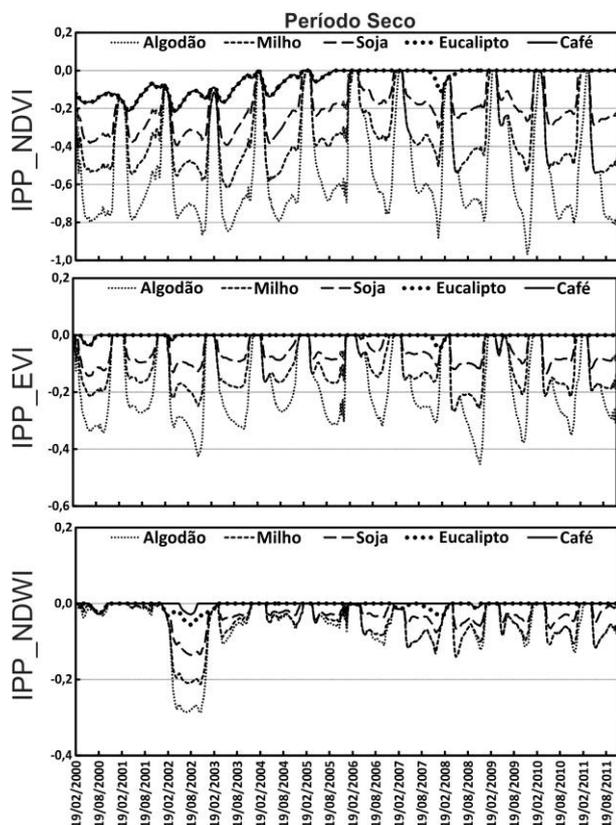


**Fig. 7. 4** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e o NDWI, considerando a estação chuvosa.

Durante o período seco, observou-se que o café e o eucalipto (cultivos perenes) apresentaram variações inferiores a 20 % em relação ao Cerrado sentido restrito, considerando todas as variáveis biofísicas (Fig. 7.5). Este fato evidencia que nesta paisagem as culturas perenes apresentaram a maior capacidade de reproduzir as características da vegetação natural, ou seja, mimetizar as demandas fisiológicas, mantendo a produtividade.

A partir dos resultados do IPP foi possível observar que o algodão apresentou variações de cerca de 80 % em relação à produção de biomassa (IPP\_NDVI) do Cerrado sentido restrito (Fig. 7.5). Isto evidencia que este sistema de produção mostra-se dependente de fontes energéticas externas a esta paisagem, para a manutenção de sua biomassa. Além disso, estes resultados evidenciaram que após a colheita (estação seca) a produção de biomassa mostrou-se praticamente inexistente, representada apenas por restos culturais sem atividade fotossintética. Este fato ocasiona outro problema, a exposição dos solos, acarretando

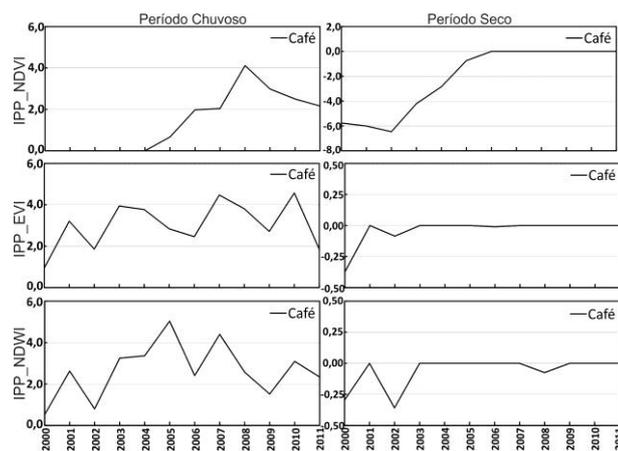
sua perda pela ação do vento e da chuva. A produção de biomassa (IPP\_NDVI) do sistema de plantio direto mostrou-se superior com menores variações dentro da estação seca.



**Fig. 7.5** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) referentes aos índices de vegetação NDVI, EVI e NDWI, considerando a estação seca.

O IPP\_EVI dos plantios perenes (café e eucalipto) mostrou-se similar ao Cerrado sentido restrito, indicando a manutenção de sua cobertura dentro da estação seca (Fig. 7.5). Em relação aos cultivos anuais observa-se que o sistema de plantio direto apresentou valores cerca de 20% superiores em relação ao convencional.

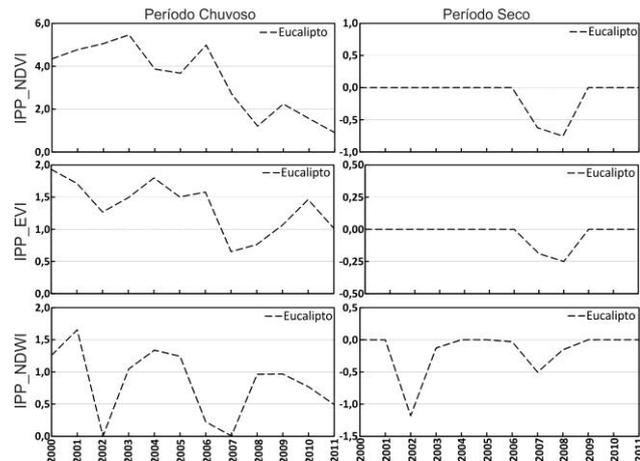
O IPP\_NDWI representa o conteúdo de água foliar e evidenciou uma queda pronunciada nos cultivos anuais, devido à ocorrência de veranico no ano de 2002. Este fenômeno afetou especialmente a cultura de algodão, porque ocorreu durante o período de formação dos botões florais, ocasionando redução significativa de produtividade (Azevedo *et al.*, 2002). A produtividade dos sistemas de produção pode também ser analisada por valores anuais referentes à época de seca e chuva (Fig. 7.6 a 7.9).



**Fig. 7. 6** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Café em relação ao Cerrado sentido restrito, referente ao NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano.

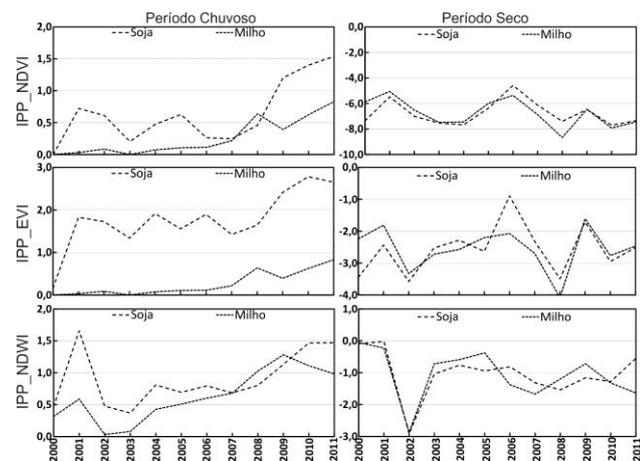
O IPP\_NDVI do Café referente ao período seco permite caracterizar a dinâmica do estabelecimento desta cultura. A primeira fase trata-se da conversão da vegetação natural (Cerrado sentido restrito), evidenciada entre os anos de 2000 e 2002 através da queda de seus valores (Fig. 7.6). A segunda etapa representa o café em formação, onde foi observado o incremento de seus valores na ordem de seis vezes, até o ano de 2006. A última etapa marca o café em produção, quando os valores de IPP\_NDVI mostraram-se similares aos observados no Cerrado. Os comportamentos do IPP\_EVI e do IPP\_NDWI mantiveram-se similares ao Cerrado sentido restrito a partir da seca de 2003. Além disso, estes índices (IPP\_EVI e IPP\_NDWI) possibilitaram a caracterização da queda ocorrida no ano 2002 em virtude do veranico. Considerando o período chuvoso, observou-se uma tendência de crescimento dos valores de todos os índices avaliados, indicando a adaptação desta cultura a esta paisagem. Outro fato que proporcionou para este desempenho foi a associação com a braquiária, reproduzindo os estratos vegetais (arbóreos e arbustivos) presentes no Cerrado sentido restrito.

Considerando os valores dos índices do Eucalipto (IPP\_NDVI, IPP\_EVI e IPP\_NDWI) do período seco, foi possível caracterizar dois acontecimentos fisiológicos. O primeiro evento foi o veranico (2002) e o segundo o desbaste, ocorrido entre os anos de 2007 e 2008 (Fig. 7.7). Considerando o período chuvoso, observou-se produtividade superior ao Cerrado, porém uma tendência de redução nos valores dos índices.



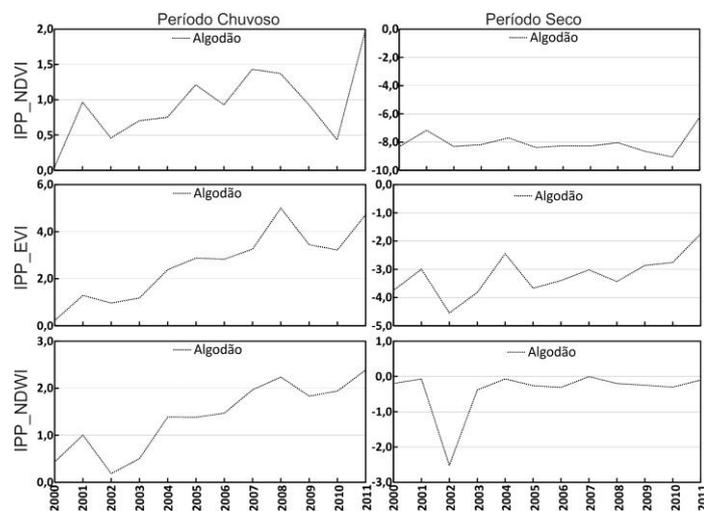
**Fig. 7.7** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Eucalipto em relação ao Cerrado sentido restrito, referente NDVI, EVI e NDWI, para ambos os períodos.

Em relação ao sistema de plantio direto (soja e milho), o conjunto dos índices indicou quedas da ordem de oito vezes no IPP\_NDVI, quatro vezes no IPP\_EVI e três vezes no IPP\_NDWI (Fig. 7.8). Durante o período chuvoso a Soja apresentou maior produtividade em relação à sua produção de biomassa, de acordo com os valores observados para IPP\_NDVI e IPP\_EVI, devido à arquitetura das plantas de soja. Considerando o período seco, observou-se foi possível destacar o veranico ocorrido no ano de 2002 a partir do IPP\_EVI e IPP\_NDWI. Além disso, foi possível constatar que os valores destas culturas apresentaram-se sempre valores inferiores à referência (Cerrado sentido restrito), o que indica baixa produtividade para os padrões desta paisagem. Este fato indica que este sistema de plantio direto não está mantendo cobertura vegetal durante a época seca o que compromete a sustentabilidade destas culturas dentro desta paisagem.



**Fig. 7.8** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) da Soja e do Milho em relação ao Cerrado sentido restrito, referente ao NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano.

O plantio convencional (Algodão) apresentou valores de produção de biomassa (IPP\_NDVI) oito vezes inferiores ao Cerrado sentido restrito durante a época seca (Fig. 7.9). Considerando o IPP\_EVI e o IPP\_NDWI, foi possível discriminar o veranico ocorrido no ano de 2002 (Azevedo *et al.*, 2002), período de formação dos botões florais. O comportamento aparentemente compatível com os valores observados no plantio direto, na verdade mostra-se relacionado com o ciclo da cultura do algodão, que é maior que as demais (Soja e Milho). Considerando o período chuvoso observou-se um aumento nos valores de todos os índices, indicando um incremento na eficiência. Por outro lado, a estação seca mostrou-se marcada por comportamento constante e sempre inferior ao Cerrado sentido restrito. Esta grande variação durante este período indica as restrições deste sistema apresenta dentro do contexto da paisagem onde está inserido.



**Fig. 7. 9** - Valores do Índice de Produtividade da Paisagem Anual (IPP anual) do Algodão em relação ao Cerrado sentido restrito, referente NDVI, EVI e NDWI, para os dois períodos do ano.

#### 7.4. CONCLUSÃO

O presente trabalho propõe um novo índice para avaliar a sustentabilidade dos agrossistemas. Este índice realiza uma comparação entre as condições do ecossistema natural e a capacidade dos agrossistemas de mimetizar este comportamento, considerando índices provenientes de sensoriamento remoto que consideram os atributos de produção de biomassa, fechamento de dossel e ao conteúdo de água foliar. Por ser baseado em dados de sensoriamento remoto o presente método permite ser adquirido de forma rápida e para extensas áreas.

Neste trabalho foram utilizadas séries temporais de índices de vegetação do sensor MODIS, correspondendo à produção de biomassa (NDVI), ao fechamento de dossel (EVI) e ao conteúdo de água foliar (NDWI) dos seguintes sistemas de produção: Irrigação (Café), Reflorestamento (Eucalipto), Plantio Direto (Soja e Milho) e Plantio Convencional (Algodão).

Estas variáveis possibilitaram a geração do Índice de Produtividade da Paisagem (IPP) para a caracterização daqueles sistemas de produção. O IPP surge como alternativa para a indicação de pesos para avaliação da paisagem, baseada nas características biofísicas ao longo do tempo, ao contrário dos índices qualitativos que indicam pesos arbitrários.

Os resultados indicaram que o cultivo do café, que emprega irrigação baseada em tensiômetro, apresentou o comportamento mais próximo ao observado no Cerrado sentido restrito. Isto significa que este sistema de produção é capaz de reproduzir a estrutura e a eficiência da vegetação natural deste ambiente, evidenciando sua sustentabilidade nesta paisagem.

O plantio convencional (Algodão) apresentou desempenho compatível ao observado no plantio direto (Soja e Milho) durante a estação chuvosa, explicando sua abrangência neste ambiente. Por outro lado, durante a estação seca, seu comportamento foi inferior, quando comparado com os demais sistemas.

Os sistemas de produção avaliados foram dispostos em ordem decrescente de produtividade: Irrigação (Café); Reflorestamento (Eucalipto); Plantio Direto (Soja e Milho); e Plantio Convencional (Algodão). Esta sistematização do comportamento temporal tem o potencial de fornecer subsídio para estudos de paisagem, estruturação de arranjos produtivos regionais, financiamento de crédito rural e previsão de safra.

## REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment** v. 74, p. 19–31, 1999.
- ALTIERI, M. A.; LETOURNEAU; D. K.; DAVIS, J.R. Developing Sustainable Agroecosystems. **BioScience**, v. 33, n. 1, p. 45-49, 1983.
- ANDERSON, L.; ARAGAO, L.; SHIMABUKURO, Y.; ALMEIDA, S.; HUETE, A. Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 387-408, 2011.
- BASTARRIKA, A.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, M.P. Automatic Burned Land Mapping From MODIS Time Series Images: Assessment in Mediterranean Ecosystems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 9, p. 3401- 3413, 2011.

- BATISTELLA, M.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E.E.; VIEIRA, H.R.; VALLADARES, G.S.; MANGABEIRA, J.A.C.; ASSIS, M.C. **Monitoramento da expansão agropecuária da Região Oeste da Bahia**. Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 20, 41p., 2002.
- BERNOUX, M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.; PERRIN, A.S.; SCOPEL, E.; RAZAFIMBELO, T.; BLAVET, D.; PICCOLO, M.C.; PAVEI, M. & MILNE, E. Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 26, p. 1-8, 2006.
- BRANNSTROM, C.; JENPSON, W.; FILIPPI, A.M.; REDO, D; XU, Z.;GANESH, S. Land change in the Brazilian savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implication for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, p. 579-595, 2008.
- CARVALHO JUNIOR, O.; COUTO JUNIOR, A.F.; SILVA, N.C.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no campo de instrução militar de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, p. 399-412, 2009.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; HERMUCHE, P.M.; GUIMARÃES, R.F. Identificação regional da floresta decidual na bacia do rio PARANÃ (GO/TO) a partir da análise multitemporal de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 319-332, 2006.
- CARVALHO JUNIOR, O.A.; SAMPAIO, C.S, SILVA, N.C.; COUTO JUNIOR, A.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO, A.P.F.; SHIMABUKURO, Y.E. Classificação de padrões de savana usando assinaturas temporais NDVI do sensor MODIS no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 505-517, 2008.
- CASTRO, K.B.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P.; ATTO, A.; LOPES, C.A.; PASSO, D.P.; LIMA, L.A.S.; CARDOSO, W.S.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. Caracterização Geomorfológica do município de Luís Eduardo Magalhães, BA escala 1:100.000. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 288**, Embrapa – CPAC, Planaltina, DF, 33 p., 2010.
- COUTO JUNIOR, A.F., CARVALHO JUNIOR, O.A., MARTINS, E.S., SANTANA, O.A., SOUZA, V.V., & ENCINA, J.I. Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do Cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**,v. 35, n. 3, p. 699-705, 2011.
- FELFILI, J.M.; SILVA JUNIOR, M.C. **Biogeografia do bioma Cerrado: estudo fitofisionômico da Chapada do Espigão Mestre do São Francisco**. Brasília, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, 2001. 152p.
- GAO, B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p. 257-266, 1996.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D.A transformation for ordering multispectral data in terms of images quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p.65-74, 1988.
- HUETE, A.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.
- HÜTTICH, C.; GESSNER, U.; HEROLD, M.; STROHBACH, B.J.; SCHMIDT, M.; KEIL, M.; DECH, S. On the Suitability of MODIS Time Series Metrics to Map Vegetation Types in Dry Savanna Ecosystems: A Case Study in the Kalahari of NE Namibia. **Remote Sensing**, v. 1, n. 620-643, 2009.
- JACQUIN, A.; SHEEREN,D.; LACOMBE, J-P. 2010. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12, n. 1 p. S3-S10.

- JIANG, B.; LIANG, S.; WANG, J.; XIAO, Z. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, n. 7, p. 1432-144, 2011.
- JUSTICE CO, VERMOTE E, TOWNSHEND JRG, DEFRIES R, ROY PD, HALL DK, SALOMONSON V, PROVETTE JL, RIGGS G, STRHALER A, LUCHT W, MYNENI B, KNYAZIKHIN Y, RUNNING WS, NEMANI RR, WAN Z, HUETE AR, LEEUWEN WV, JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 3-15, 2002.
- 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**, v. 113, p. 2431–2440, 2009.
- LENZ-WIEDEMANN, V.I.S.; SCHNEIDER, K; MIAO, Y.; BARETH, G. Development of a regional crop growth model for Northeast China. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 1946 – 1955, 2012.
- LOVELL, S. T. DESANTIS, S. NATHAN, C. A. OLSON, M. B. MÉNDEZ, V. E. KOMINAMI, H. C. ERICKSON, D. L. MORRIS, K. S. MORRIS W. B. Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. **Agricultural Systems**, v. 103, 327–341, 2010.
- MAEDA, E.E. ; ARCOVERDE, G.F.B. ; PELLIKKA, P.K.E. ; SHIMABUKURO, Y.E. Fire risk assessment in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and change vector analysis. **Applied Geography (Sevenoaks)**, v. 31, p. 76-84, 2011
- MENKE, A.B.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S.; Oliveira, S.N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA - Brasil). **Sociedade & Natureza (UFU. Online)**, v. 21, p. 315-326, 2009.
- 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, n. 3, p. 479-489, 2011.
- SANTANA, O.A.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. ; CARDOSO, W. S.; MARTINS, E.S. ; PASSO, D. P.; GUIMARÃES, R.F. Distribuição de espécies vegetais nativas em distintos macroambientes na região do oeste da Bahia. **Espaço e Geografia (UnB)**, v. 13, p. 181-223, 2010a.
- SANTANA, O.A.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; PIMENTEL, C.M.M.; GOMES, R.A.T. & OLIVEIRA, S.N. Modelagem de espectros temporais NDVI-MODIS, no período de 2000 a 2008, na bacia do Rio Paracatu, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p.47-60, 2010b.
- SCHERR, S.J., MCNEELY, J.A. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of ‘ecoagriculture’ landscapes. **Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences**, v. 363, p. 477–494, 2008.
- VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; NEWNHAM, G.; CULVENOR, D. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series, **Remote Sensing of Environment** v. 114, p. 106-115, 2010.
- VERMOTE, E.; EL SALEOUS, N.; JUSTICE, C. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: First results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 97-111, 2002.
- XIAO, Z.Q.; LIANG, S.L.; WANG, J.D.; JIANG, B. Real-time retrieval of Leaf Area Index from MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n. 7, p. 97-106, 2010.

## *CAPÍTULO 8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS*

O conhecimento referente aos padrões da cobertura da terra ao longo do tempo converge com os esforços da geociência aplicada na direção dos mapeamentos regionais das mudanças terrestres. Estudos relacionados à caracterização sazonal promovem a consolidação desta importante linha de pesquisa e proporcionam subsídios para os futuros mapeamentos sistemáticos.

As principais mudanças da cobertura, desde os padrões globais até aqueles observados no Cerrado, ocasionadas pelas atividades da sociedade moderna, foram apresentadas no intuito de contextualizar esta área do conhecimento (Capítulo 1). Dentro desta contextualização, foi destacado o emprego de séries temporais como alternativa para a avaliação da cobertura da terra e de seus principais avanços, especialmente do sensor MODIS. No entanto estas séries temporais apresentam interferências devido à atmosfera e inerentes aos próprios equipamentos, demandando tratamento para a atenuação dessa influencia. Neste capítulo foi apresentado o histórico do desenvolvimento de procedimentos aplicados em séries temporais.

O tratamento dessas séries temporais do sensor MODIS proporcionou melhor caracterização da cobertura e maior conhecimento de sua dinâmica e seus fluxos energéticos. Neste sentido, foram feitos artigos científicos para a caracterização da fenologia das principais culturas agrícolas encontradas na ecorregião do Chapadão do São Francisco: café (Capítulo 2); soja e milho (Capítulo 3); algodão (Capítulo 4). Esses artigos evidenciaram as variações interanuais e a sazonalidade desses plantios, destacando os principais eventos fenológicos em função dos tratamentos culturais.

Considerando esses comportamentos ao longo do tempo das principais coberturas da terra apresentados (Capítulos 2 a 4), outro artigo descreveu a dinâmica da ocupação agrícola no Cerrado no município de Luis Eduardo Magalhães (Capítulo 5). Este artigo evidenciou os comportamentos ao longo do tempo das principais coberturas da terra, destacando o Cerrado, a Conversão e a Agricultura. A primeira classe representa as coberturas da terra que apresentaram sazonalidade similar à fitofisionomia cerrado sentido restrito. A Conversão foi caracterizada como o processo de retirada da cobertura natural para outras coberturas. A classe Agricultura representa as áreas dos cultivos agrícolas mecanizados de sequeiro na porção oeste do município avaliado.

A sistematização dos comportamentos da cobertura da terra ao longo do tempo apresentadas nos capítulos anteriores proporcionou a estruturação da biblioteca de assinaturas temporais da ecorregião do Chapadão do São Francisco (Capítulo 6). Neste artigo foram evidenciadas as assinaturas temporais de três ambientes temporais: Agrícola, Savânico e Floresta Estacional Decidual. Além disso, foi possível mapear as áreas das culturas agrícolas dos principais sistemas de produção (plantio convencional e direto), evidenciando seu potencial para subsidiar a avaliação de produção.

Os resultados dos artigos anteriores permitiram a geração de um artigo de integração entre a dinâmica da cobertura da terra e a avaliação de sustentabilidade de sistemas de produção (Capítulo 7). Neste artigo, foi concebido o Índice de Produtividade da Paisagem (IPP), fundamentado no comportamento temporal da referência do ambiente estudado, neste caso a vegetação representada pela fitofisionomia de cerrado sentido restrito. Esta abordagem favorece o entendimento sobre o funcionamento da paisagem e proporciona a estruturação de agroecossistemas sustentáveis em função da cobertura natural.

A partir da sistematização apresentada na presente tese, espera-se que a concepção e a implantação de sistemas de produção no Brasil considerem as funções ecossistêmicas da cobertura natural ao longo do tempo. Este conhecimento proporcionará o estabelecimento de arranjos produtivos regionais, fundamentados nas peculiaridades locais, proporcionando a avaliação de sistemas de produção e a previsão de safra. Neste sentido, a presente abordagem possibilita a incorporação do fator tempo e o funcionamento da paisagem natural nos processos de financiamento rural e seguros agrícolas. Por fim, espera-se que o Brasil mantenha sua posição no cenário do agronegócio internacional e consolide seu sistema produtivo como referência de sustentabilidade.