Anais 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cáceres, MT, 16-20 de outubro 2010
Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.424 -433

Índices de vegetação e análise por componentes principais no estudo da variabilidade sazonal de fitofisionomias do Bioma Pantanal

Yhasmin Mendes de Moura[1]
Lênio Soares Galvão[1]
Egídio Arai[1]
Gabriel Pereira[1]
Francielle da Silva Cardozo[1]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515
12201-970 - São José dos Campos, SP, Brasil
{yhasmin, lenio, egidio, gabriel, cardozo}@dsr.inpe.br

Resumo. O objetivo deste trabalho foi avaliar as variações sazonais das fitofisionomias Mata Caducifólia, Ecótono e Cerrado do Bioma Pantanal através dos índices de vegetação EVI (Enhanced Vegetation Index) e NDWI (Normalized Difference Water Index), calculados a partir de dados do sensor MODIS. Utilizando análise por componentes principais, buscou-se representar as áreas com maior variabilidade e identificar aspectos relacionados à variação espacial específica das características de cada fisionomia. Os resultados mostraram padrões do comportamento de cada fisionomia fortemente associados às inundações periódicas da área de estudo. As variações sazonais analisadas através dos índices foram coerentes com a dinâmica do bioma e das fitofisionomias. A análise das componentes principais permitiu avaliar a variabilidade espectral na área de estudo, que se mostrou relacionada aos resultados encontrados, com maiores variações nas classes Ecótono e Cerrado. A utilização de imagens EVI foi satisfatória ao objetivo proposto, sendo possível identificar a dinâmica das fitofisionomias desta região. A utilização de um índice de água e da técnica componentes principais foram importantes na análise espacial desta dinâmica sazonal e na identificação de características peculiares do Bioma Pantanal.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, índices de vegetação e água, sazonalidade, Pantanal.

Abstract. The objective of this work was to evaluate the seasonal variation of the phytophysiognomies Deciduous Forest, Ecotone and Cerrado from de Pantanal biome through the inspection of MODIS derived Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Water Index (NDWI). Using principal components, the areas with the greatest spectral variability were identified as well as the major characteristics associated with each vegetation type. The results showed behavior patterns for each vegetation type associated with the periodic flooding of the study area. The seasonal variations were in agreement with the dynamics of the biome and the vegetation types. The principal component analysis allowed evaluating the spectral variability in the study area, which was related to the results previously found with greater variations associated with Ecotone and Cerrado. The use of EVI images was satisfactory for the purposes of the investigation, especially to identify the dynamics of the vegetation types of this region. The use of the water index (NDWI) and of the principal components technique provided information for spatial analysis of the seasonal dynamics and for identifying peculiarities of the Pantanal biome.

Key-words: remote sensing, vegetation and water indices, seasonality, Pantanal.

1. Introdução

O Brasil e, principalmente, o Pantanal, são carentes de informações sobre processos dinâmicos de uso e cobertura da terra e de suas interações com o meio. Isto implica não somente o conhecimento das fisionomias vegetais, como também seu comportamento e características complexas proporcionadas pelo regime hídrico especial do Pantanal (seca e cheia anuais). Porém, a compreensão do funcionamento deste sistema é de grande importância para o próprio conhecimento da cobertura vegetal e para adoção de medidas de conservação, preservação ou monitoramento.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto (SR) no monitoramento da resposta fenológica da vegetação pode auxiliar na compreensão de fenômenos ecológicos, como também servir de subsídio ao planejamento sustentável da cobertura florestal. Além disso, pode contribuir para prognósticos sobre o crescimento e produtividade florestal, facilitando a implantação de programas de manejo, utilização racional e recuperação da cobertura florestal (Carey *et al*., 1994; Hatshorn, 1990). Nesse contexto, é necessário um melhor entendimento da interligação das variações fenológicas com os diferentes componentes do meio geográfico (clima, solo, relevo, geologia, etc), tanto para uma análise em nível regional, quanto global (Anderson *et al*., 2005; Scholes e Breemen, 1997).

Alguns estudos de sensoriamento remoto apresentaram resultados favoráveis, demonstrando a potencialidade no acompanhamento da dinâmica de Uso e Cobertura da Terra (UCT) através de índices de vegetação e permitindo representações de avaliação dos estágios fenológicos e fisiológicos da cobertura florestal (Gurgel e Ferreira, 2003; Huete *et al*., 2006; Lee *et al*., 2007; Varriale e Gomes, 2001; White *et al*., 2005).

A utilização dos produtos do sensor MODIS, que correspondem a dados relativos aos índices de vegetação (EVI e NDVI) permitem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação. Vários índices vêm sendo propostos para detecção dos efeitos de períodos secos em formações vegetais, tais como o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) (Gao, 1996), usando diferentes bandas espectrais em diferentes combinações com o canal do infravermelho próximo (Liu & Kogan, 1996; Bayarjargal et al., 2006).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das fisionomias vegetais através

dos índices de vegetação EVI (Índice de Vegetação Melhorado) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada) de séries temporais de imagens MODIS, no período de 2000 a 2009, e correlacionar com a variabilidade pluviométrica na porção norte do bioma Pantanal.

3. Materiais e Métodos

A área de estudo abrange grande parte do Bioma Pantanal, especialmente os municípios de Cacéres, Poconé, Barão de Melgaço e Corumbá, situados entre os paralelos 18° 38' e 15° 29' S e meridianos 59° 18' e 54° 46' W. Este bioma é caracterizado como a maior planície de inundação sazonal do mundo, sendo a principal área alagada do Brasil.

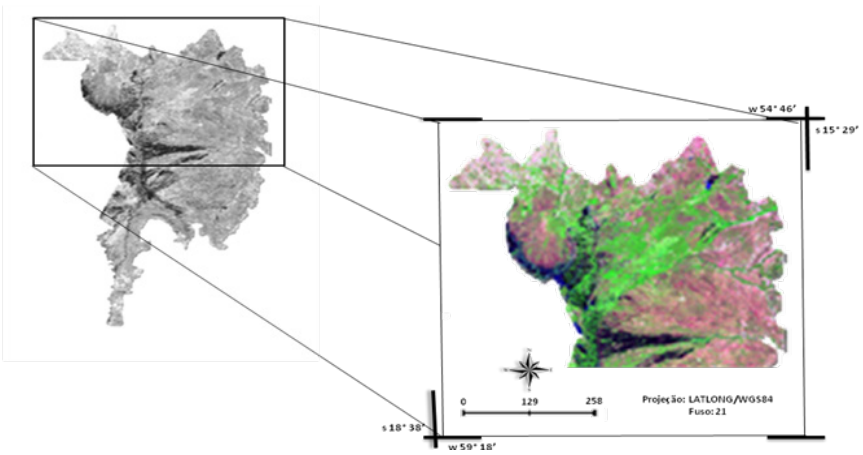

Figura 1. Localização da área de estudo.

O Bioma Pantanal apresenta dois regimes sazonais distintos na área de estudo: de abril a setembro predominam épocas secas, caracterizadas por apresentar um baixo regime pluviométrico. A partir de outubro, pode-se notar inundações periódicas, que variam de acordo com a intensidade e a duração das precipitações que ocorrem por toda a área de drenagem da bacia hidrográfica (Silva *et al*., 2002).

Foram utilizadas as imagens do produto MOD13A3, referente ao índice EVI (*Enhanced Vegetation Index*), do sensor MODIS da plataforma TERRA. Este produto foi gerado com tamanho de pixel de 1000 metros, sendo disponibilizado gratuitamente pelo site http://modis.gsfc.nasa.gov/. O EVI é sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (HUETE *et al*., 2008). O EVI é calculado pela equação:

$$EVI = G * \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + C_1 * \rho_V - C_2 * \rho_A + L}$$

Onde:
ρIVP = reflectância do infravermelho próximo;
ρV = reflectância do vermelho;
ρA = reflectância do azul;
***C*1** = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no vermelho;
***C*2** = coeficiente de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera no azul;

L = fator de ajuste para o solo;
G = fator de ganho.

Este índice utiliza informações espectrais banda do vermelho (*Red*, 620-670 nm), infravermelho próximo (NIR, banda 841-876 nm) e azul (*Blue*, 459-479 nm), servindo como um indicador do vigor da vegetação. As imagens EVI são composições de 1 mês, representando uma seleção dos melhores valores sem influência de nuvens. Neste trabalho, essas imagens mensais foram utilizadas para avaliação da variabilidade sazonal das fitofisionomias no período de 2000 a 2009.

Também foram utilizadas imagens de reflectância de superfície do sensor MODIS para geração do índice de vegetação NDWI (*Normalized Difference Water Index*), para subsidiar as análises das variações sazonais de cada fisionomia, indicando possíveis variações das mudanças no conteúdo de água líquida na vegetação.

As fitofisionomias analisadas foram delimitadas pelo PROBIO (mapa de vegetação do Ministério do Meio Ambiente). As classes de vegetação analisadas foram: Mata Caducifólia, Ecótono e Cerrado. Os dados de precipitação foram disponibilizados no site da Agência Nacional de Águas (http://www.ana.gov.br/portalsnirh/), estando relacionados com a média mensal e acumulado anual de três estações meteorológicas situadas na área de estudo durante o período de 2000 a 2009. Todo o processamento foi realizado no software ENVI 4.4, o qual permitiu a extração dos valores médios dos índices EVI e NDWI de cada fitofisionomia analisada. Para representar a variabilidade espectro temporal de cada pixel da área de estudo foi aplicada a análise por componentes principais de produtos EVI do sensor MODIS para o período de 2000 a 2009.

4. Resultados e Discussão

Na Figura 2 são mostrados os valores de precipitação média mensal, total anual e média sazonal da área de estudo para o período de 2000 a 2009.

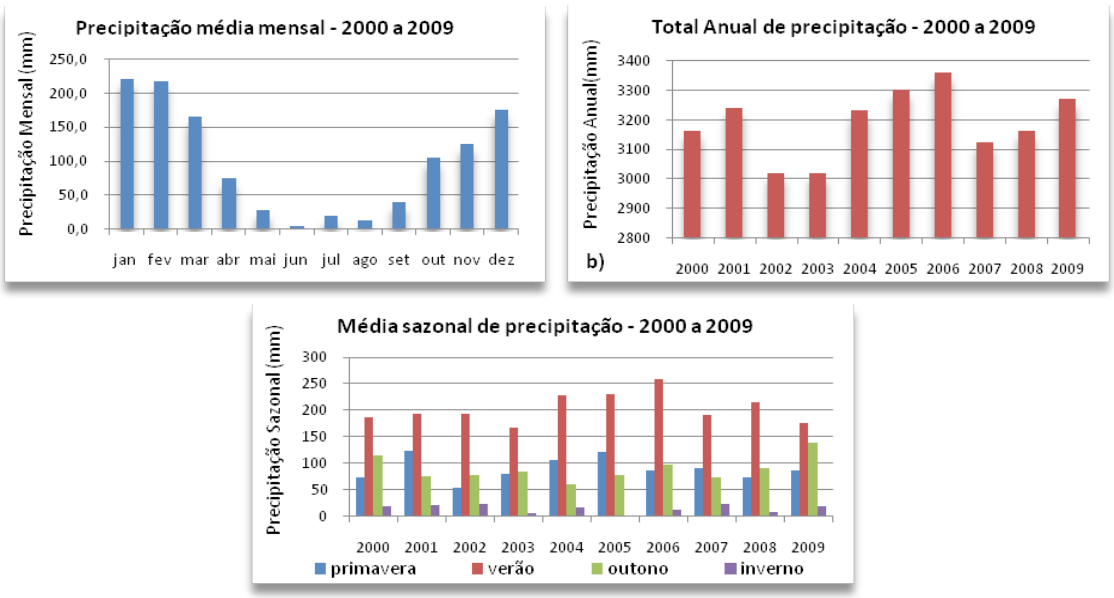

Figura 2. a) Precipitação média mensal para o período de 2000 a 2009; **b)** Precipitação total anual para o período de 2000 a 2009; **c)** Média sazonal de precipitação para o período de 2000 a 2009

Na **Figura 2a** observa-se um comportamento típico da precipitação da região, com estações chuvosa e seca bem definidas. As maiores intensidades de precipitação são encontradas nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, enquanto as menores precipitações são observadas nos meses de junho, julho e agosto. Este indicador pluviométrico é de fundamental importância, já que o vigor vegetativo está amplamente associado à variação hídrica. Na **Figura 2b**, pode-se verificar uma variabilidade grande entre os anos analisados, sendo destacados os anos com precipitação acima de 3200 mm (2001, 2004, 2005, 2006 e 2009) e os anos com menores índices pluviométricos (2002 e 2003).

A variação sazonal dos valores médios de EVI e NDWI, para as fitofisionomias Ecótono, Cerrado e Mata Caducifólia, no período de 2000 a 2009, está apresentada nas **Figuras 3 e 4**, respectivamente. O eixo y representa os valores médios de EVI e NDWI durante as estações do ano. O eixo x representa as variações dos índices durante o período analisado neste trabalho.

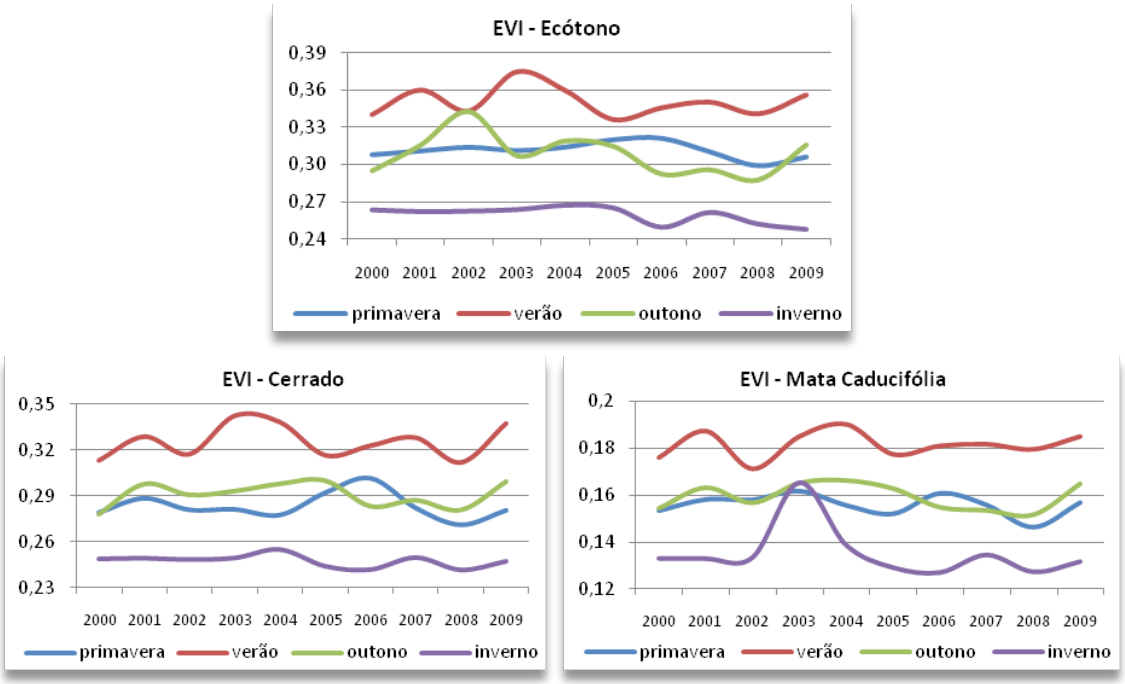

Figura 3. Valores médios sazonais de EVI para as fitofisionomias de estudo no período de 2000 a 2009

Pode-se verificar que para todas as classes de fisionomias os valores de EVI mais altos ocorreram durante o verão, possivelmente associado à maior oferta de água neste período e consequente aumento no vigor vegetal das fisionomias. No entanto, nos anos de 2002 e 2005, ocorreu uma diminuição nos valores de EVI durante o verão, presumindo alguma diminuição na oferta de precipitação nestes anos (ver **Figura 1b**), associado a diminuição de precipitação no primeiro e a forte seca durante a estação seca do segundo, respectivamente.

Em relação ao outono dos anos analisados, percebe-se um abrupto aumento para a classe Ecótono no ano de 2002. Para analisar mais profundamente este aumento no índice, foram verificadas as imagens EVI e como suporte as imagens de reflectância de superfície. Foi verificado, para a área que abrange esta classe, uma modificação no uso e cobertura do solo, o que pode estar associado à cultura de soja presente na região e também a um atraso na colheita, favorecendo um aumento no EVI não identificado para os outros anos.

Observa-se uma acentuada elevação na curva dos valores de EVI no ano de 2003 para a fisionomia Mata Caducifólia. Como foi observado anteriormente, a partir da análise visual das imagens, pode-se perceber algum tipo de influência de áreas agrícolas neste aumento do valor do índice para este período. No entanto, para os outros anos, os valores foram baixos, o que pode estar relacionado à queda da fitomassa foliar, características desta fisionomia, a qual depende também, da disponibilidade hídrica atingida pelas raízes mais profundas.

No ano de 2006, para todas as fisionomias, nota-se uma ligeira queda nos valores de EVI (exceto para primavera). Este fator pode estar associado ao fato deste ano ter sido o mais chuvoso de todo o período analisado. O bioma Pantanal possui uma dinâmica complexa, sujeito a inundações periódicas. Desta forma, pode-se inferir que durante o ano de maior índice pluviométrico a ocorrência de áreas alagadas possa ter aumentado, influenciando nos valores de EVI, que não detectariam as áreas de cobertura vegetal devido às áreas encobertas por água.

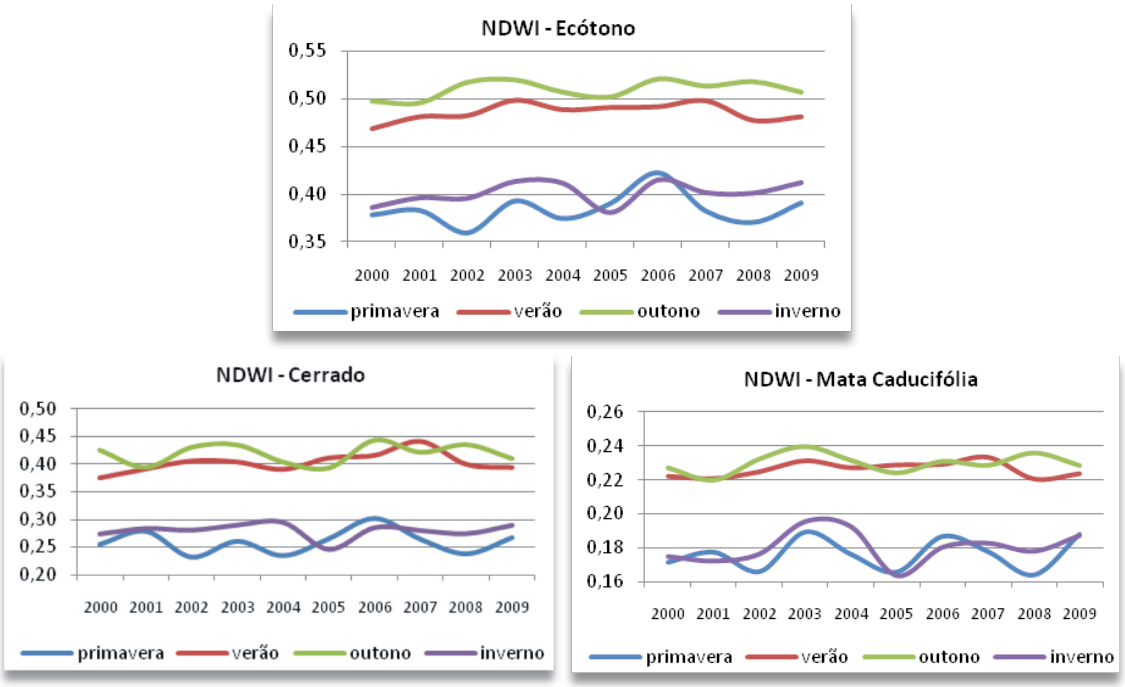

Figura 4. Valores médios sazonais de NDWI para as fitofisionomias de estudo no período de 2000 a 2009

Em relação às variações sazonais do NDWI (**Figura 4**), pode-se verificar que para todas as fisionomias analisadas os maiores índices ocorreram entre verão e outono. Isto pode estar associado ao fato de no verão ocorrer uma oferta maior de água, devido aos altos índices de precipitação nesta estação (**Figura 1c**), podendo ocorrer à manutenção desta grande oferta de água também durante a estação seguinte (outono), o que explicaria estes altos níveis nos valores de NDWI. Neste caso, a diminuição em seus valores ocorre quando há uma abrupta queda nos índices pluviométricos, como encontrado nas estações de inverno de todo o período analisado, levando um tempo até que a quantidade de água aumente o suficiente para elevar o índice, o que é evidenciado nos valores ainda baixos de NDWI durante a estação de transição, primavera.

Observa-se também que ocorreu uma diminuição nos valores de NDWI para todas as fisionomias no ano de 2005 (exceto no verão, devido ao aumento de pluviosidade nesta estação), podendo indicar a influência de uma estação marcada por um índice muito

pequeno de pluviosidade durante a estação seca (< 1mm).

Na **Figura 5** é apresentado o gráfico de correlação inter anual do índice EVI com a precipitação anual, com relação às fisionomias analisadas: Mata Caducifólia, Ecótono e Cerrado, durante o período de 2000 a 2009. O eixo y representa os valores em % das correlações obtidas e o eixo x representa os anos analisados.

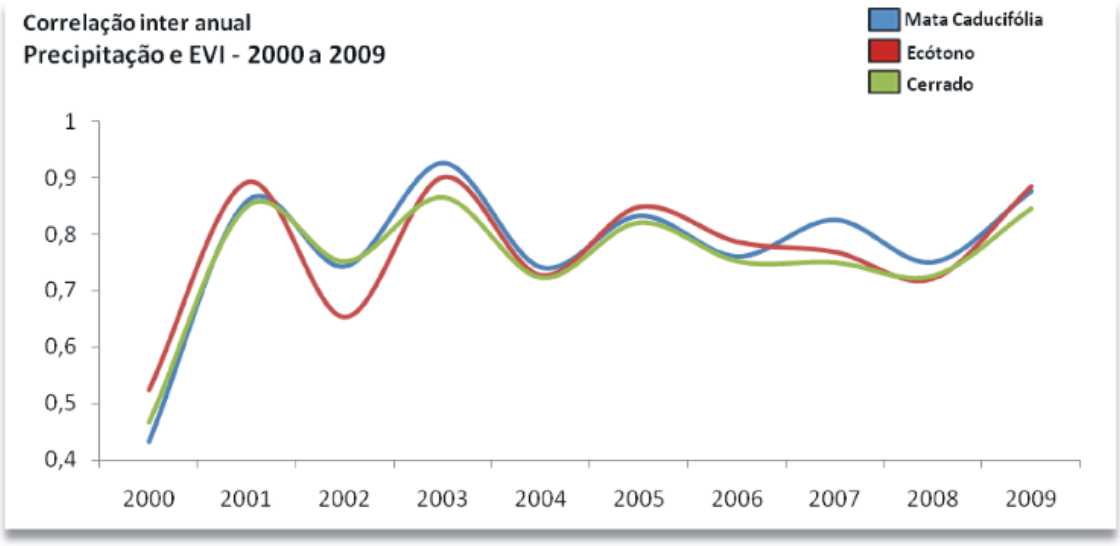

Figura 5. Perfis de correlação Pearson inter anual para os valores médios de EVI e precipitação para cada fisionomia analisada no período de 2000 a 2009

No ano de 2002 nota-se uma queda brusca na correlação entre precipitação e EVI para a classe Ecótono. Este comportamento pode estar relacionado pelo fato já citado anteriormente, de um possível atraso identificado na época de colheita da cultura agrícola na região. Para comprovar essa hipótese, foram verificadas as imagens EVI e de reflectância de superfície dos anos estudados, sendo observada, somente neste ano, a variação brusca do índice. Em 2003 verificam-se em todas as classes um aumento da correlação, que volta a ficar no mesmo patamar de valores que no ano de 2001, demonstrando que existe uma alta correlação entre as classes analisadas e a precipitação. Durante os outros anos não foram encontrados, na análise visual das imagens, nenhum fator de grande impacto que influenciasse nos valores de correlação obtidos, Isto demonstra pouca variação das mudanças de uso e ocupação do solo, ou variações não significativas a ponto de modificar os valores apresentados, ao menos na abordagem inter anual.

Também se pode observar, para o ano de 2007, um aumento da correlação para a classe Mata Caducifólia, podendo estar relacionado ao fato da oferta de água nos anos anteriores ter sido alta. A capacidade desta fisionomia em reter o recurso hídrico e manter certa estabilidade até o próximo ano é maior que nas outras classes, mesmo que neste ano (2007) tenha ocorrido uma diminuição da precipitação, observada nas outras fisionomias através da diminuição dos valores de correlação.

A Figura 6 apresenta os valores de correlação intra anual entre os valores de EVI e precipitação para as fisionomias Mata Caducifólia, Ecótono e Cerrado, durante o período de 2000 a 2009. O eixo y representa os valores em % das correlações obtidas, e o eixo x representa os anos analisados.

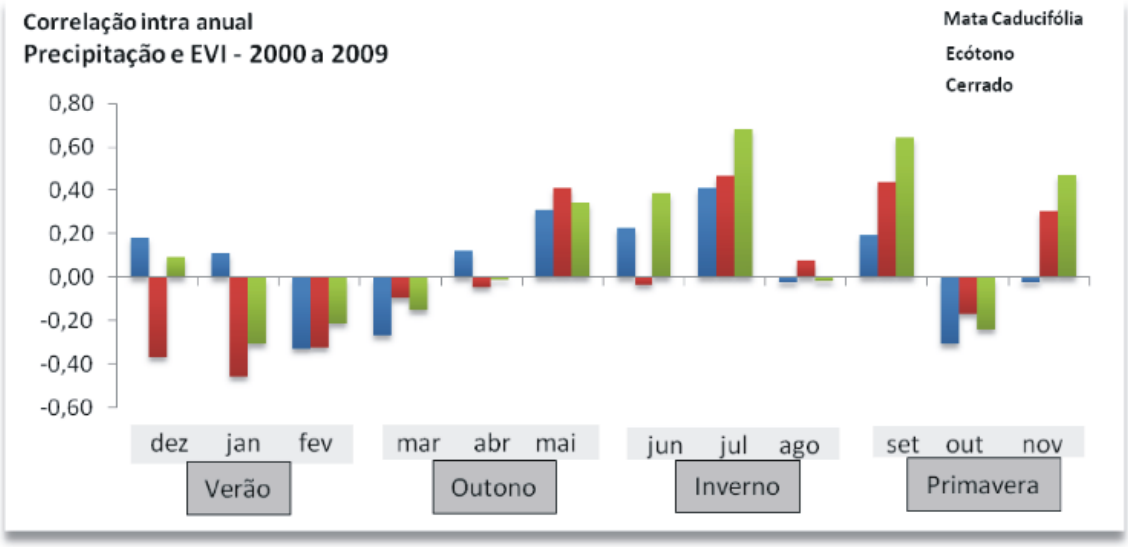

Figura 6. Correlação intra anual entre os valores médios de EVI e precipitação para cada fisionomia analisada no período de 2000 a 2009

Pode-se verificar um comportamento senoidal das correlações intra anuais, demonstrando uma característica intrínseca do bioma Pantanal, as inundações periódicas, e o comportamento das fitofisionomias em meio a este processo. De maneira geral, foi constatado que no período mais chuvoso (out, nov, dez, jan, fev e mar) ocorre um aumento das correlações inversas, o que pode estar associado ao fato de neste período a ocorrência de áreas alagadas ser maior. Neste caso, o índice estaria sendo influenciado por áreas cobertas por água, invertendo as correlações. Já durante a estação seca, ocorre o contrário. Há uma diminuição das áreas alagadas. Portanto, observa-se um aumento no índice, que está mais diretamente relacionado com a vegetação. Qualquer oferta de precipitação, mesmo que pequena, produz um aumento do índice, tornando os valores de correlação positivos. Em seguida, com o aumento da precipitação, volta a ter o comportamento explanado anteriormente, com a ocorrência de correlações inversas.

Em relação ao comportamento de cada fisionomia analisada, destacam-se os resultados encontrados para a classe Mata Caducifólia. Durante a estação chuvosa, verifica-se que esta mesma classe, não influenciada pelas características encontradas anteriormente (valores de correlação inversa durante a estação chuvosa), apresenta correlações positivas, ou seja, o índice aumenta com a precipitação. Isto pode estar relacionado, principalmente, a estrutura fisiológica das plantas encontradas para esta classe, que apresenta um porte maior e pode não ficar submersa durante a estação chuvosa, possibilitando o reconhecimento de suas variações pelo índice, mesmo neste período. Já durante a estação seca, percebe-se um aumento na amplitude dos valores de correlação, para esta mesma classe, demonstrando uma sensibilidade do índice a qualquer oferta de água que ocorrer durante esta estação. A disponibilidade hídrica no solo também propicia uma estabilidade mesmo na época seca, em relação às outras fisionomias analisadas.

A **Figura 7** apresenta uma composição colorida das imagens das componentes principais geradas a partir dos EVI's no período de 2000 e 2009. Para exemplificar, são apontadas três regiões características com presença das fitofisionomias analisadas: Mata Caducifólia, Ecótono e Cerrado.

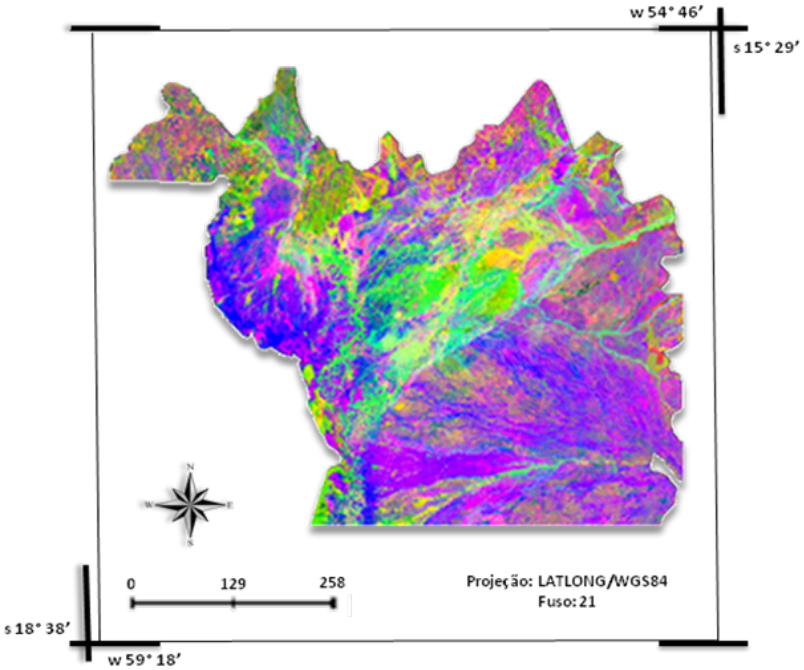

Figura 7. Composição colorida da análise por principais componentes (1° CP - G, 2° CP-B, 3° CP - R) da área de estudo para o período de 2000 a 2009

A primeira componente refere-se aos valores de maior ocorrência ao conjunto original de imagens EVI, e está associada a cor verde no sistema RGB (Red, Blue e Green). A segunda componente está relacionada à variabilidade média, e está associada a cor azul, diminuindo as informações relacionadas às variações conforme aumenta o número de componentes geradas, e terceira componente está associada a cor vermelha.

Pode-se verificar que as fisionomias que mais apresentaram variabilidade se encontram nas áreas de Ecótono e Cerrado (áreas em azul, associadas à segunda componente), coincidindo com os resultados anteriormente encontrados. O fato de na área em que se encontram formações relacionadas à fisionomia Ecótono se destacar na análise da componente que mais apresenta variabilidade, pode estar vinculada a dois fatores. Primeiro, esta classe possui áreas de cultivo agrícola, o que está associado a condições específicas de mudanças de uso do solo de acordo com os ciclos de safra associados a cada cultura. Depois, há o fato desta área se localizar em terrenos mais alagadiços, devido ao escoamento superficial na região ser maior de leste para oeste, do que de norte para sul (Adami *et al,* 2008).

5. Conclusões

A análise das fitofisionomias encontradas no bioma Pantanal se mostrou associada às condições intrínsecas da área de estudo, relacionada à ocorrência de inundações periódicas, demonstrando potencialidade nos índices utilizados EVI e NDWI. Pode-se observar ainda algumas peculiaridades associadas à classe Ecótono e Mata Caducifólia, relacionados aos fatores de uso e cobertura do solo e fisiologia da formação, respectivamente. Ainda, a análise por componentes principais permitiu visualizar a distribuição espacial da variabilidade das fitofisionomias vegetais e contribuir com resultados coerentes com os encontrados anteriormente com índices.

Desta forma, o tratamento metodológico utilizado neste trabalho permitiu avaliar, com eficácia, o comportamento dinâmico associado às variações sazonais das fitofisionomias a partir da utilização de séries temporais de imagens EVI e NDWI e pela análise de componentes principais.

6. Referências

Adami, M. Freitas, R. M., Padovani, C. R., Shimabukuro, Y. E., Moreira, M. A. Estudo da dinâmica espaço-temporal do bioma Pantanal por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1371-1378, 2008.

Anderson, L. O. et al.; Monitoramento da resposta fenológica através da utilização de imagens fração derivadas do sensor MODIS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais**... São José dos campos: INPE, 2005. p. 2811-2818. Disponível na biblioteca digital URLib: <ltid. inpe.br/sbsr/ 2004/11.18.13.48/doc/2811.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2010.

Bayarjargal, Y.; Karnieli, A.; Bayasgalan, M.; Khudulmur, S.; Gandush, C.; Tu cker, C. A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis **Remote Sensing of Environment,** v. 105, p. 9-22, 2006.

Carey, E.; Brown, S.; Gillespie, A. J. R.; Lugo, A. Tree mortality in mature lowland tropical moist forest and tropical lower mountain moist forests of Venezuela. **Biotropica,** v. 26, p. 255-265, 1994.

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.

Gurgel, H. C.; Ferreira, N. J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n. 18, p. 3595-3609, 2003.

Hartshorn, G. S. An overview of neotropical forest dynamics. p. 585-600 In: Gentry, A. H. **Four neotropical rainforests.** Yale University Press, New Haven, p. 585 - 600, 1990.

Huete, A.; et al.; **MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document.** versão 3, p. 1-129, 1999. Disponível em: <modis-land.gsfc.nasa.gov/pdfs/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2008.

Huete, A. R.; Kamel, D.; Shimabukuro, Y. E.; Ratana, P.; Saleska, S. R.; Hutyra, L. R.; Yang, W.; Nemani, R. R.; Myneni, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical Research Letters**, v. 33, N. l06405, P. 1-4, 2006.

Lee, R.; Yu F.; Price K. P.; Ellis J.; Shi P. Evaluating vegetation phenological patterns in winner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.12, p. 2505 – 2512, 2007.

Liu, W. T., & Kogan, F. N. Monitoring regional drought using the vegetation condition index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 2761−2782, 1996.

Peters, A. J., Walter-Shea, E. A., Ji, L., Vina, A., Hayes, M., & Svoboda, M. D. Drought monitoring with NDVI based standardized vegetation index. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, p.71−75,2002.

Silva, R. C. **Estudo do Balanço de Radiação no Pantanal Sul Matogrossense.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 213 p. 2002.

Scholes R.J.; Breemen N. The effects of global change on tropical ecosystems. **Geoderma**, v. 79, p. 9-24, 1997.

Varriale, M. C.; Gomes, A. G. **Modelagem de ecossistemas** uma introdução - Santa Maria, RS: UFSM, p. 503, 2001.

White, M. A.; Hoffman, F.; Hargrove, W. W.; Nemani, R. R. A global framework for monitoring phenological responses to climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. L04705, p.1-4, 2005.