

Monitoramento temporal de variáveis espectrais em áreas do Pantanal utilizando dados AVHRR/NOAA-17

Júlio César Dalla Mora Esquerdo¹
João Francisco Gonçalves Antunes¹

¹ Embrapa Informática Agropecuária
Caixa Postal 6041 – 13083-000 – Campinas – SP, Brasil
{julio, joaof}@cnptia.embrapa.br

Resumo. Embora seja um dos ecossistemas mais conservados do Brasil, o Pantanal está sujeito a problemas como o fogo, desmatamentos e alterações dos ciclos de cheia e seca. O monitoramento de toda a extensão do Pantanal é fundamental para a detecção de problemas relacionados a alterações do uso e da cobertura do solo, assim como inferir sobre o nível das cheias que ocorrem na planície. O objetivo deste estudo foi utilizar dados AVHRR/NOAA-17 no monitoramento temporal dos índices espectrais NDVI e NDMI e da faixa espectral do infravermelho médio (IVM) de quatro grandes áreas do Pantanal, com distintas coberturas vegetais, ao longo de cinco anos e verificar suas relações. Sistemas automáticos de processamento de imagens e de extração dos dados espectrais foram utilizados para automação das análises. Os resultados mostraram o potencial do monitoramento temporal na determinação dos padrões espectrais dessas áreas. A análise do IVM de uma área propensa à inundação permitiu detectar o padrão das cheias do Pantanal e diferenciar os anos com maiores volumes de água. A análise do NDVI permitiu a caracterização do padrão temporal dos tipos de vegetação estudados. Já o NDMI mostrou comportamento distinto ao NDVI somente com a exposição da água durante as cheias, sendo uma informação redundante na maioria dos casos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, processamento de imagens, áreas úmidas, NDVI, NDMI, infravermelho médio.

Abstract. Although one of the most preserved ecosystems in Brazil, the Pantanal is liable to problems such as fire, deforestation and changes in the flood and drought cycles. Monitoring the Pantanal is essential to detect problems related to land use changes and to infer on the level of floods in the wetlands. This study aimed to use AVHRR/NOAA-17 data in the temporal monitoring of the spectral indices NDVI and NDMI and the mid-infrared spectral band (IVM) in four areas of the Pantanal, with different vegetation covers over five years and to verify their relations. Automated systems of image processing and spectral data extraction were used in order to speed up the analysis. The results showed the potential of the temporal monitoring to establish the spectral patterns of these areas. The analysis of the IVM in the wetlands allowed identification of the flooding pattern and differentiation of the wettest years. The analysis of the NDVI allowed characterization of the temporal pattern of the vegetation types studied. Compared to NDVI, the NDMI has shown different behavior only in the wetlands during the floods, and thus it is a redundant information in most cases.

Key-words: remote sensing, image processing, wetlands, NDVI, NDMI, mid-infrared.

1. Introdução

O Pantanal é a uma das maiores planícies inundáveis do mundo e abriga uma grande concentração de vida silvestre. Embora seja um dos ecossistemas mais conservados do Brasil, com 85% do habitat original, o Pantanal é afetado por problemas como o fogo e desmatamentos. Além disso, alterações antrópicas na vegetação da parte alta da Bacia do Alto Paraguai refletem nos ciclos de cheia e seca. Dessa forma, é fundamental que a bacia seja constantemente monitorada para a detecção de problemas relacionados a alterações do uso e da cobertura do solo, assim como inferir sobre o nível das cheias que ocorrem na planície. Pela grande extensão do Pantanal, as imagens de satélite tornam-se instrumentos importantes para essa finalidade, por proverem uma visão sinóptica de todo o bioma.

Atualmente, existe uma série de sensores disponíveis à comunidade, gerando dados da superfície terrestre com diferentes detalhamentos. Um sensor importante é o *Advanced Very High Resolution Radiometer*, a bordo dos satélites da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que gera imagens com resolução espacial de 1,1 km (no nadir) numa resolução temporal de 12 horas. Embora existam sensores de melhor qualidade espacial e espectral com curto tempo de revisita, os dados AVHRR/NOAA continuam tendo grande potencial de aplicação em estudos envolvendo a análise de ecossistemas, principalmente pela disponibilidade de longas séries temporais armazenadas em acervos históricos espalhados pelo mundo. No entanto, não existem disponíveis aos usuários dados já processados e prontos para uso (como as imagens MODIS fornecidos pela NASA), sendo necessária a adoção de métodos automáticos para o processamento de grandes volumes de imagens brutas.

Das imagens NOAA é possível a extração de produtos, como o índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o índice de umidade NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), o albedo de superfície, a temperatura de superfície, entre outros. O NDVI, inicialmente proposto por Rouse et al. (1973), apresenta correlação com biomassa e por essa razão é utilizado no monitoramento da vegetação. Já o NDMI usa a informação extraída da faixa do infravermelho médio (IVM) e pode indicar variações de umidade na superfície.

O uso de informações da faixa do IVM é fundamental em estudos de áreas com forte influência hídrica, conforme relataram Antunes e Esquerdo (2006), que mostraram o potencial do IVM no monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. Isso se deve ao fato da forte influência da água na absorção da energia eletromagnética nessa faixa.

2. Objetivo

O objetivo deste estudo foi utilizar imagens AVHRR/NOAA-17 no monitoramento temporal das variáveis espectrais NDVI, NDMI e IVM de quatro grandes áreas do Pantanal, com distintas coberturas vegetais, ao longo de cinco anos e verificar as relações entre elas.

3. Material e Métodos

O estudo foi realizado em quatro áreas localizadas na planície do Pantanal, inserida na Bacia do Alto Paraguai (**Figura 1**). Na época das chuvas, os rios da planície têm sua vazão aumentada, resultando nas inundações por conta da baixa declividade do relevo. Foram escolhidas áreas com diferentes coberturas vegetais, sob diferentes influências da ação das cheias, o que resulta em comportamentos espectrais distintos. Em cada área foram coletados dados espectrais numa janela de 2 x 2 pixels, resultando numa área amostral de 4 km². As regiões monitoradas incluem coberturas vegetais de floresta, savana, pastagem plantada e agricultura.

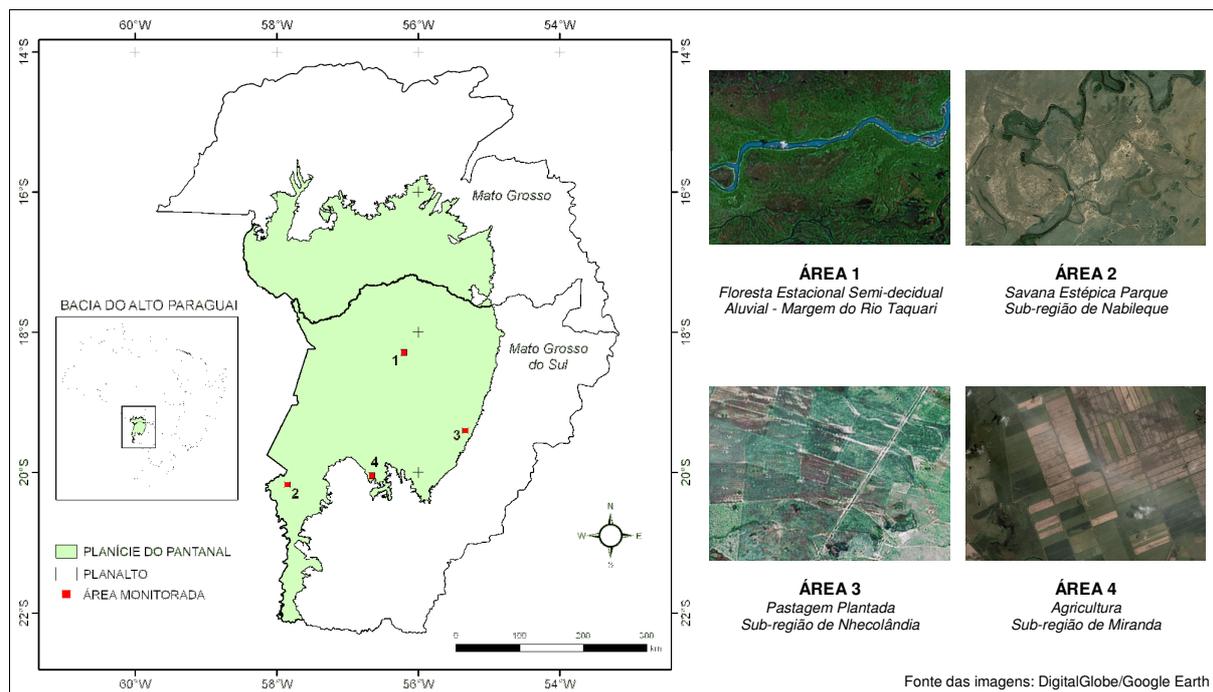


Figura 1. Bacia do Alto Paraguai e as quatro áreas monitoradas no Pantanal.

As imagens AVHRR/NOAA foram obtidas do acervo do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP), em seu estado bruto. Foram adquiridas ao todo 2887 imagens das passagens diurnas do satélite NOAA-17, entre janeiro de 2004 e dezembro de 2008. As características espectrais da versão 3 do sensor AVHRR são mostradas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Características espectrais do sensor AVHRR/3.

Bandas	Faixa Espectral (μm)	Região do Espectro
1	0,58 a 0,68	Visível (vermelho) – VER
2	0,725 a 1,0	Infravermelho próximo – IVP
3A	1,58 a 1,64	Infravermelho médio – IVM
3B	3,55 a 3,93	Infravermelho termal
4	10,3 a 11,3	Infravermelho termal
5	11,5 a 12,5	Infravermelho termal

Fonte: Adaptado de Goodrum et al. (2004).

Para o processamento das imagens foi utilizado o sistema automático NAVPRO, proposto por Esquerdo et al. (2006), que inclui módulos de conversão de formatos, calibração radiométrica, georreferenciamento e geração de produtos. A principal característica deste

sistema é seu método de georreferenciamento preciso e automático, baseado nos algoritmos da navegação indireta (Rosborough et al., 1994) e da coleta automática de pontos de controle por meio da técnica da Máxima Correlação Cruzada (Emery et al., 2003). De cada imagem foram gerados produtos dos índices NDVI e NDMI, além do IVM. As fórmulas para cálculo dos dois índices são mostradas pelas **Equações (1) e (2)**.

$$\text{NDVI} = \text{IVP} - \text{VER} / \text{IVP} + \text{VER} \quad (1)$$

$$\text{NDMI} = \text{IVP} - \text{IVM} / \text{IVP} + \text{IVM} \quad (2)$$

Em todos os produtos diários foi aplicado o mascaramento de nuvens, de acordo com os critérios adotados por Antunes e Esquerdo (2006), que consideram a refletância da Banda 1 e as temperaturas de brilho das Bandas 4 e 5. A partir das imagens diárias de NDVI e NDMI, foram geradas composições quinzenais de máximo valor, de modo a minimizar o efeito das nuvens não mascaradas e reduzir a influência atmosférica (Holben, 1986). Para o caso da Banda 3A (IVM), optou-se pela geração de composições de mínimo valor, uma vez que o objetivo da utilização dessa faixa espectral foi o de identificar a influência da água na superfície (Antunes e Esquerdo, 2006).

A extração dos valores espectrais foi feita de forma automática a partir de uma rotina desenvolvida em linguagem IDL (*Interactive Data Language*). Apesar da adoção de técnicas para minimizar inconsistências dos dados, os valores extraídos das imagens apresentaram variações causadas por ruídos, ausência de dados e efeitos atmosféricos. Um algoritmo baseado em análise harmônica (*Harmonic Analysis of NDVI Time-Series – HANTS*), proposto por Roerink et al. (2000), foi aplicado para suavizar os perfis temporais, eliminando as inconsistências presentes nos dados extraídos das imagens. A **Figura 2** ilustra o exemplo do efeito da correção dos dados de NDVI quinzenais numa série histórica de cinco anos, em uma área do Pantanal coberta por Floresta Estacional Decidual. O algoritmo considera a variação sazonal do NDVI, que nesta área foi causada pela queda estacional das folhas, e elimina valores discrepantes presentes na série histórica.

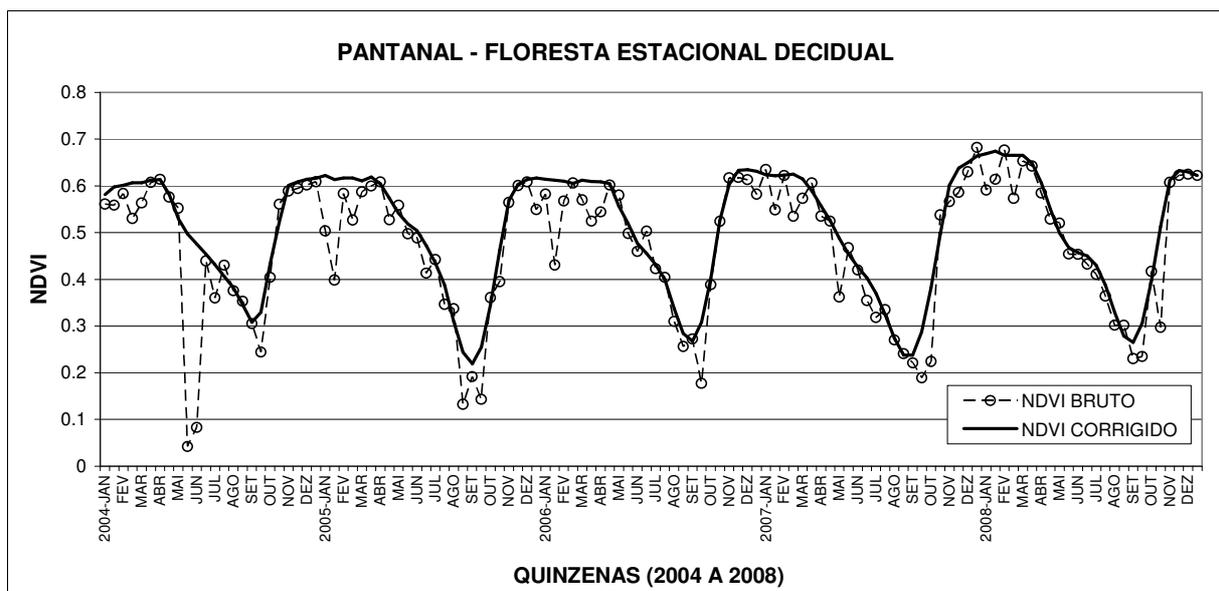


Figura 2. Perfil temporal do NDVI bruto e corrigido por meio de análise harmônica.

4. Resultados e Discussão

A **Tabela 2** mostra o resultado do processamento dos cinco anos de imagens NOAA. Das 2887 imagens processadas, 1118 (39%) deram origem a produtos com precisão geométrica dentro de um pixel, sendo incluídas na geração das composições quinzenais. As demais imagens não alcançaram essa precisão e foram descartadas. As falhas de posicionamento das imagens descartadas se deveram principalmente à grande cobertura de nuvens e ao baixo ângulo de elevação do satélite no momento da passagem, o que acabou afetando o processo de georreferenciamento automático realizado pelo pacote NAVPRO, cujo sucesso depende de uma porcentagem mínima da imagem livre de nuvens. Considerando as 1118 imagens georreferenciadas pelo programa NAVPRO, os deslocamentos médios nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste foram de 0,68 e 0,50, respectivamente.

Tabela 2. Contagem do número de imagens processadas, a porcentagem de acertos e os deslocamentos médios.

Ano	Total Processado	Total de Falhas	Total de Acertos	Acertos (%)	Deslocamento Médio (pixel)*	
					N-S	L-W
2004	304	190	114	37,5	0,72	0,43
2005	654	421	233	35,6	0,65	0,52
2006	670	427	243	36,2	0,69	0,43
2007	677	400	277	40,9	0,71	0,56
2008	582	331	251	43,0	0,65	0,55
Total	2887	1769	1118	39,0	0,68	0,50

* Considerando as imagens com acerto.

A **Figura 3** mostra as composições de máximo valor de NDVI e NDMI e a composição de mínimo valor do IVM na segunda quinzena de abril de 2008. Nas imagens de NDVI e NDMI foram aplicadas paletas de cores, onde os valores mais elevados aparecem em vermelho e os mais baixos em azul escuro. Na imagem do IVM as refletâncias são mostradas numa escala de níveis de cinza, onde as áreas mais escuras indicam baixa refletância da superfície, resultante da alta absorção da radiação eletromagnética causada pela presença da umidade. Para cada variável foram geradas 120 composições, totalizando 360 imagens. As análises das quatro áreas estudadas mostram o comportamento dessas variáveis ao longo do tempo e as relações entre elas, como é visto a seguir.

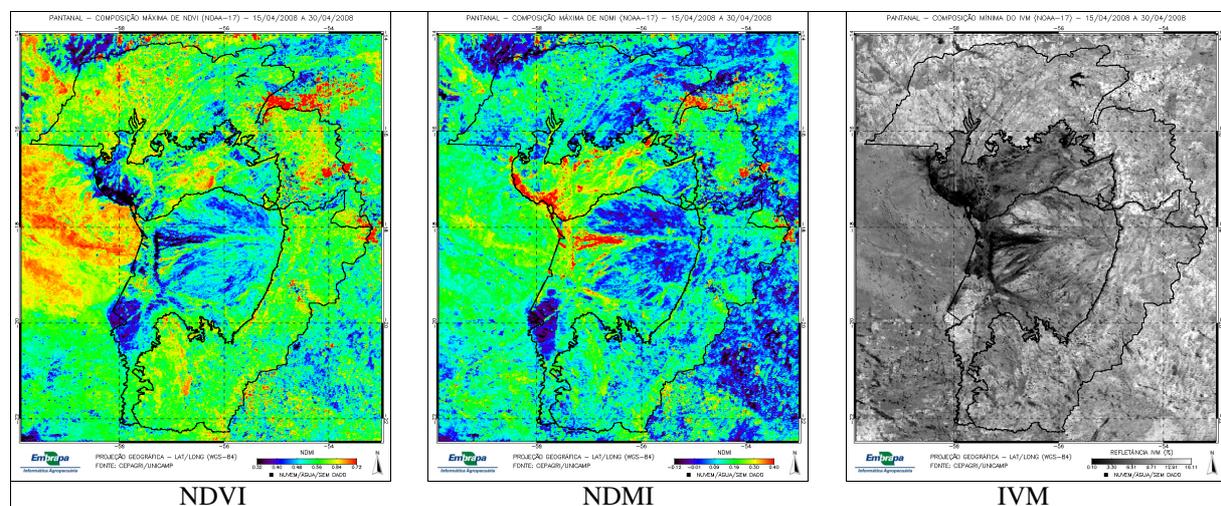


Figura 3. Composições de NDVI, NDMI e IVM da segunda quinzena de abril de 2008.

A **Figura 4** mostra os gráficos do comportamento temporal do NDVI das quatro áreas estudadas entre os anos de 2004 e 2008. Na Área 1, composta por Floresta Semi-decidual às margens do Rio Taquari, o NDVI manteve-se constante ao longo dos meses, com leve queda a partir de junho. Este comportamento é compatível com o tipo de vegetação predominante na área, caracterizada por florestas com árvores de 15 a 20 metros (ou mais), com perda de folhas no inverno menos intensa.

A Área 2, composta por Savana Estépica Parque, é caracterizada por árvores esparsas e cobertura contínua de gramíneas (Abdon e Silva, 2006). Está localizada numa região fortemente influenciada pelas cheias do Pantanal, o que provoca uma variação acentuada nos valores do NDVI, podendo decrescer de 0,40 para menos de 0,10, como em 2006. As datas de ocorrência dessas quedas do NDVI variam de ano para ano, em função das épocas de cheias (que no Pantanal podem variar) e do estado do vigor vegetativo da cobertura vegetal.

A Área 3 é composta por Pastagem Plantada e menos susceptível ao regime de cheias. O NDVI é relativamente constante ao longo dos meses, com redução dos valores nas épocas mais secas do ano. Na Área 4, composta por regiões agrícolas, o NDVI é bastante variável, aumentando fortemente no período da safra de verão (a partir de setembro). No caso de 2007, os valores do início do ciclo eram de 0,18 e passaram a 0,70 no pico vegetativo, no final de novembro. Essa variação brusca está relacionada à alta dinâmica espectral das áreas agrícolas, que apresentam solo exposto no início do ciclo e alta quantidade de biomassa no período de pico vegetativo.

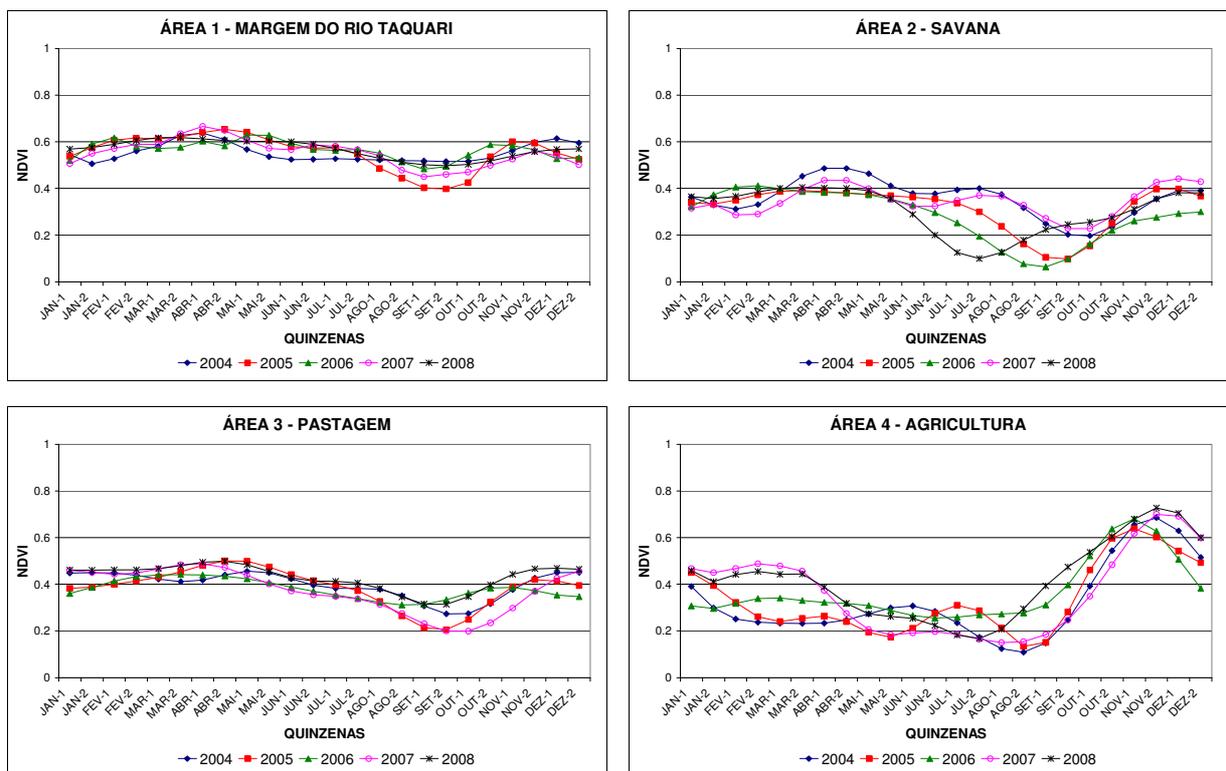


Figura 4. Variação temporal do NDVI das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

A **Figura 5** mostra os gráficos do comportamento temporal da refletância do IVM nas quatro áreas estudadas entre 2004 e 2008. A faixa do infravermelho médio é fortemente influenciada pela presença de água na superfície, que tem efeito de absorção da energia eletromagnética. Por essa razão, essa faixa pode indicar a presença de água ou alta umidade na superfície terrestre. Nos gráficos da **Figura 5**, a refletância no IVM é inversamente

proporcional à presença da água, ou seja, quanto menor a refletância da superfície, maior a quantidade de água. Na Área 1, não há variações bruscas da refletância no IVM e os menores valores ocorrem em junho, época das cheias nessa região. A influência da água no comportamento espectral dessa superfície é menor, uma vez que a cobertura vegetal é composta por floresta alta e densa, com baixa exposição do solo. Já na Área 2, a influência da água na refletância no IVM é bastante intensa, uma vez que a área sofre forte influência das cheias e a cobertura vegetal permite a exposição do solo inundado. No ano de 2006, por exemplo, a refletância no IVM caiu de 15% na primeira quinzena de junho para quase zero no início de agosto, no ápice das cheias nessa região. Entretanto, observa-se que nos anos de 2004 e 2005 não houve redução significativa da refletância no IVM. Isso se explica pelo fato de ter havido nesses anos grandes estiagens, que resultaram em uma pequena cheia em 2004 e em seca em 2005, conforme as medições realizadas no Rio Paraguai, em Ladário-MS, pela Embrapa Pantanal (Embrapa Pantanal, 2006). Em todos os anos analisados houve a ocorrência de El Niño de fraca intensidade, embora não haja evidências de efeitos pronunciados nas chuvas dessa região por conta desses eventos (CPTEC, 2009). De acordo com os perfis temporais dos cinco anos, observa-se também que há uma variação tanto da época de início das cheias, como no nível da água nesses períodos.

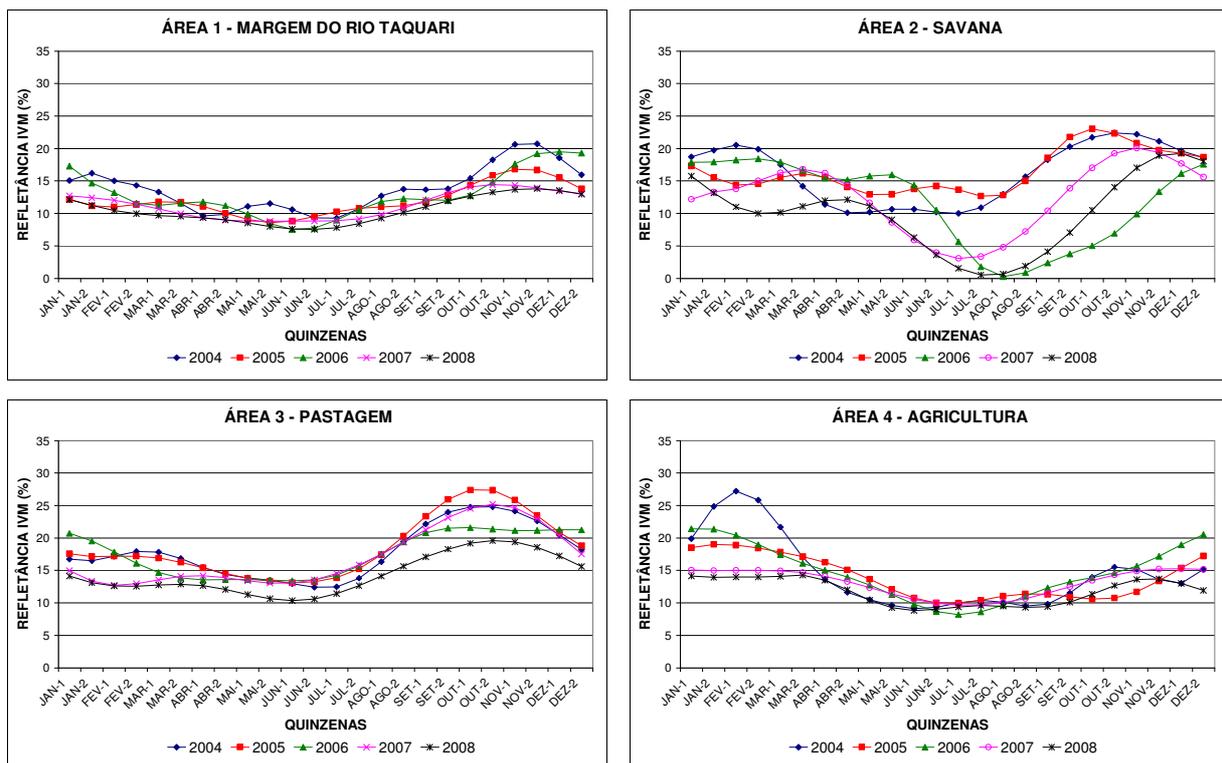


Figura 5. Variação da refletância do IVM das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

Na Área 3 há uma variação da refletância no IVM ao longo do ano, com valores mais baixos em junho na época das cheias e valores mais altos em outubro, no ápice da estiagem nessa região. Entretanto, nota-se que os valores mais baixos da refletância não são menores que 10%, mostrando que essa região não é propensa a cheias que encobrem totalmente o solo. Na Área 4, as refletâncias no IVM também são pouco variáveis, com menores valores ocorrendo em julho, na época das cheias e os valores maiores na época de estiagem, entre novembro em março. No ano de 2004 observou-se um pico de refletância em fevereiro, provavelmente causado por exposição do solo durante a estiagem.

A **Figura 6** mostra o comportamento temporal do índice NDMI nas áreas analisadas ao longo dos cinco anos. A fórmula do NDMI é semelhante à fórmula do NDVI, com exceção da banda do infravermelho médio, usada no lugar da banda do vermelho visível, tornando o índice mais sensível à presença da água na vegetação (Wilson e Sader, 2002). Na Área 1, o comportamento temporal do NDMI foi semelhante ao NDVI, com valores pouco variáveis ao longo dos meses, com leve queda na época de estiagem. Novamente, as características dessa vegetação fazem com que a presença da água não seja perceptível nesses índices. Na Área 2 verificou-se uma variação grande dos valores do NDMI, que aumentaram significativamente nos anos de 2006, 2007 e 2008 na época das cheias. No caso de 2006, os valores passaram de -0,22 em junho para 0,40 em agosto. Valores negativos do NDMI indicam cobertura vegetal baixa, com exposição de solos mais secos, enquanto que valores positivos indicam aumento da cobertura vegetal e da umidade dos solos. Esses valores são compatíveis com a vegetação presente nessa área. Já nos anos de 2004 e 2005, que foram mais secos, não houve resposta do NDMI na época das cheias.

Na Área 3 os valores do NDMI permaneceram próximos a zero de janeiro a julho, quando reduziram a cerca de -0,2 na época de estiagem. Não houve grandes variações desse índice na época de cheias, já que nessa área não ocorrem alagamentos. Na Área 4, o comportamento do NDMI foi semelhante ao comportamento do NDVI, com valores aumentado significativamente na época do cultivo, quando a quantidade de biomassa aumentou. Tanto na Área 3, como na Área 4, o aumento do NDMI esteve mais relacionado à maior resposta da refletância do IVP do que da refletância do IVM.

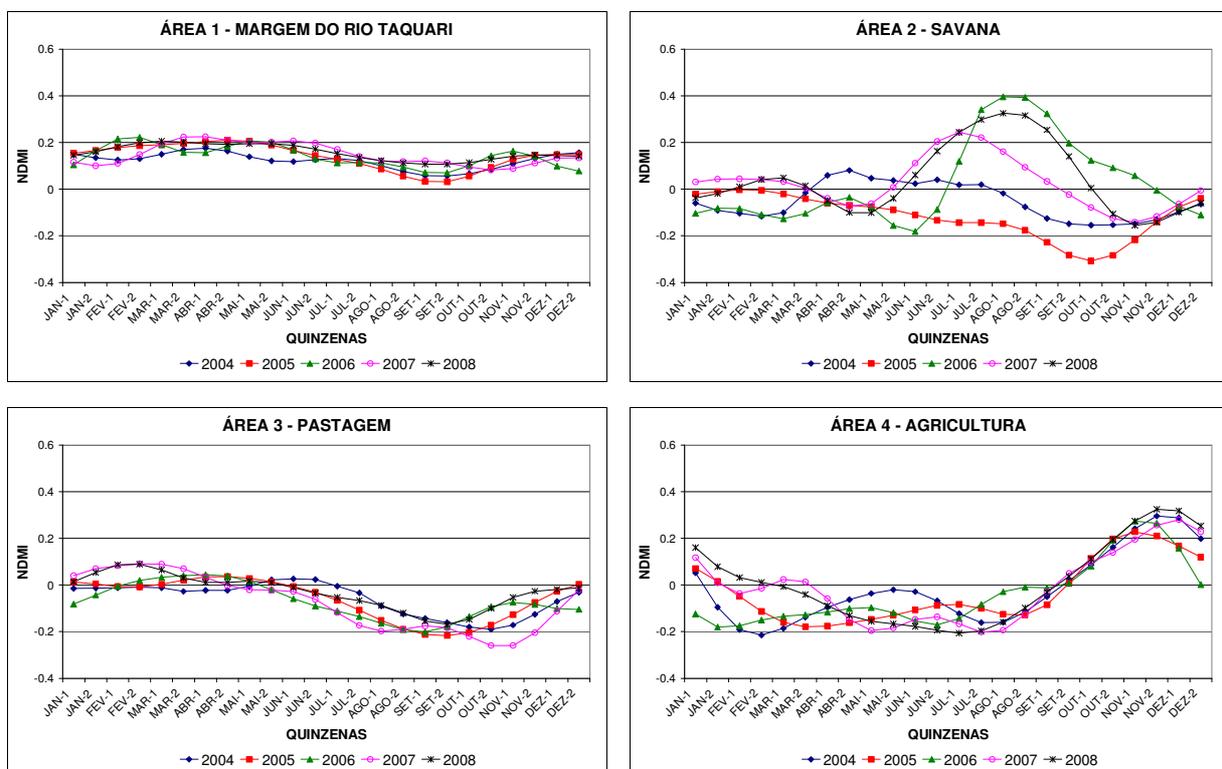


Figura 6. Variação temporal do NDMI das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

Foram também conduzidas análises comparativas do comportamento entre as variáveis, utilizando-se como base o ano de 2008. A **Figura 7** ilustra gráficos onde são traçados os perfis das três variáveis em cada área ao longo do ano de 2008.

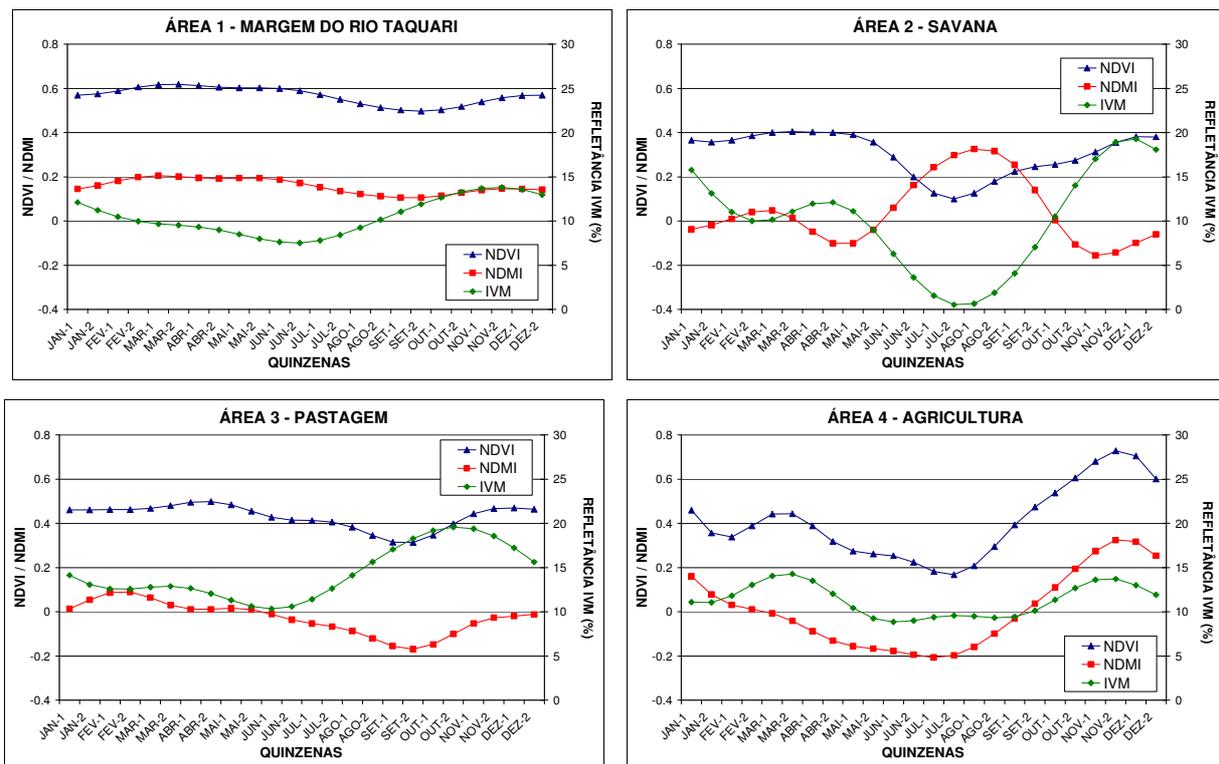


Figura 7. Variação do NDVI, NDMI e IVM das quatro áreas analisadas no ano de 2008.

Nas Áreas 1, 3 e 4, o comportamento das curvas do NDVI e NDMI em cada área são semelhantes, embora apresentem patamares diferentes. Valores mais altos de NDVI corresponderam a valores mais altos de NDMI, e vice-versa. Somente na Área 2, essa relação foi inversamente proporcional na época das cheias, quando os valores de NDVI decresceram e o NDMI aumentou. Constatou-se, portanto, que o NDMI apresentou resposta inversa ao NDVI apenas quando a superfície sofreu alagamento. Em relação ao NDMI e IVM, as variáveis são inversamente proporcionais na maioria dos casos. Exceção feita na Área 4, na época da safra de verão, quando o aumento dos valores do IVM não corresponderam a aumentos nos valores do NDMI, fato que pode ser explicado pela produção acentuada de biomassa e o consequente aumento da refletância na faixa do IVP.

Modificações do padrão temporal do NDVI podem indicar mudanças da vegetação, seja por conta de grandes estiagens, desmatamentos, queimadas e outras causas antrópicas ou naturais. Por outro lado, variações no padrão do IVM podem indicar o nível das cheias do Pantanal, em especial nas áreas com relevo mais propenso a ocorrências das inundações.

5. Conclusões e Sugestões

Os resultados mostraram o potencial do monitoramento temporal na determinação dos padrões espectrais de áreas do Pantanal, cujo entendimento é importante para se verificar suas variações inter-anuais.

A análise do IVM de uma área propensa à inundações permitiu detectar o padrão das cheias do Pantanal e diferenciar os anos com maiores volumes de água, assim como os anos mais secos. A resposta do IVM somente foi mais intensa em áreas onde ocorreram inundações e exposição da água.

A análise do NDVI permitiu a caracterização do padrão temporal dos tipos de vegetação estudados. Entretanto, variações desse padrão podem indicar alterações da vegetação da superfície causadas por ações naturais ou antrópicas, como desmatamentos. Já o NDMI

mostrou comportamento distinto ao NDVI somente na área onde foi constatada inundação. Nas demais áreas, onde não houve exposição da água, o NDMI não foi capaz de indicar variações na umidade da vegetação.

Sugere-se, como futuros estudos, determinar o padrão temporal espectral em locais que passaram por desmatamentos ou queimadas, onde a cobertura vegetal foi eliminada, de modo a verificar a alteração no padrão do NDVI após esses eventos. Dessa forma, seria possível o desenvolvimento de sistemas inteligentes que pudessem detectar qualquer variação bruta dos padrões espectrais. Outra sugestão é realizar o mapeamento de áreas alagadas utilizando dados do IVM, de modo a detectar todas as áreas que apresentassem elevado gradiente entre a época de cheia e a época de seca, como se verificou na Área 2 deste estudo.

As ferramentas computacionais aplicadas neste estudo foram fundamentais para a análise e tratamento do elevado número de dados presentes na série temporal de cinco anos.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o CEPAGRI/UNICAMP por ceder as imagens NOAA deste trabalho.

7. Referências

- Abdon, M. M.; Silva, J. S. V. **Fisionomias da vegetação nas sub-regiões do Pantanal brasileiro**. São José dos Campos: INPE; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2006. CD-ROM.
- Antunes, J. F. G.; Esquerdo, J. C. D. M. Geração automática de produtos derivados de imagens AVHRR-NOAA para monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.59, n.1, 115-122, 2007.
- CPTEC. **El Niño e La Niña**. Disponível em <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 09 set. 2009.
- Embrapa Pantanal. **Cheia do Rio Paraguai no Pantanal é a maior dos últimos nove anos**. 2006. Disponível em <<http://www.cpap.embrapa.br/destaques/cheia3.htm>>. Acesso em: 05 ago. 2008.
- Emery, W. J.; Baldwin, D. G.; Matthews, D. Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.1, 33-42, 2003.
- Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Baldwin, D. G.; Emery, W.J.; Zullo Júnior An automatic system for AVHRR land surface product generation, **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p.3925-3942, 2006.
- Goodrum, G.; Kidwell, K.; Winston, W. (Editors) **NOAA KLM User's guide**. September 2000 Revision. Disponível em <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>>. Acesso em: 15 mar. 2004.
- Holben, B. N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p.1417-1435, 1986.
- Roerink, G. J.; Menenti, M.; Verhoef, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.9, p.1911-1917, 2000.
- Rosborough, G. W.; Baldwin, D. G.; Emery, W. J. Precise AVHRR image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.3, p.644-657, 1994.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources TechnologySatellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p.309-317. (NASA SP-351).
- Wilson, E. H.; Sader, S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.80, p.385-396, 2002.