

Classificação sub-pixel de séries temporais de dados MODIS para a quantificação de áreas inundadas do Pantanal

João Francisco Gonçalves Antunes ¹

Júlio César Dalla Mora Esquerdo ¹

¹ Embrapa Informática Agropecuária
Av. Dr. André Tosello, 209 - Caixa Postal 6041
13083-886 - Campinas - SP, Brasil
{joao.antunes, julio.esquerdo}@embrapa.br

Resumo. As inundações no Pantanal condicionam a produção de peixes e influenciam a dinâmica da vegetação, afetando a criação de gado bovino. O entendimento da dinâmica das inundações é de fundamental importância para inferir sobre o nível das cheias, já que causam mudanças em toda a planície. As imagens do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) fornecem uma ampla cobertura da superfície da Terra com alta periodicidade, que possibilitam o monitoramento das inundações. Entretanto, a sua moderada resolução espacial faz com que possa ocorrer a mistura espectral de diferentes classes de cobertura da terra dentro de um mesmo pixel. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi aplicar uma metodologia de classificação sub-pixel utilizando séries temporais de dados MODIS para quantificar as áreas inundadas do Pantanal. Os dados da banda do infravermelho médio do MODIS possibilitaram o monitoramento de áreas inundadas no Pantanal durante os anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009. O período de seca e enchente é bastante variável, ocorrendo de norte para sul e de leste para oeste. A Medida de Compromisso do classificador Fuzzy ARTMAP possibilitou a quantificação de áreas inundadas, demonstrando potencial para a análise sub-pixel de séries temporais de dados MODIS. Os resultados podem auxiliar os sistemas de monitoramento de inundações do Pantanal.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, processamento de imagens, **áreas** úmidas, reconhecimento de padrões; redes neuro-fuzzy.

Abstract. Floods in the Pantanal affect the fish production and influence the dynamics of vegetation, also changing the meat production. The understanding of floods dynamics is crucial to infer the level of flooding, once it promotes changes in the whole plain. The understanding of floods dynamics is crucial to infer the level of flooding. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) images provide wide coverage of the Earth's surface with high temporal resolution, which are important features for flood monitoring. However, its moderate spatial resolution may cause the spectral mixing of different land cover classes within a single pixel. In this context, the objective of this study was to apply a methodology for sub-pixel classification using MODIS time-series data, in order to quantify the flooded areas in the Pantanal. Data from the mid-infrared channel of MODIS sensor allowed the monitoring of flood prone areas in the Pantanal during the 2008/2009 and 2007/2008 hydrological years. The drought and flood periods are quite variable, occurring from North to South and from East to West. The Commitment Measure, calculated from the Fuzzy ARTMAP classifier, allowed the quantification of flooded areas, showing potential for sub-pixel analysis of MODIS time series data. The presented results may support the flood monitoring systems in the Pantanal.

Key-words: remote sensing, image processing, wetlands, pattern recognition, neuro-fuzzy networks.

1. Introdução

O Pantanal é a maior planície contínua inundável do mundo e abriga uma grande concentração de vida silvestre. A pecuária extensiva de corte, a pesca e o turismo são as principais atividades econômicas da região, conduzidas em estrita relação com o ambiente natural. O pulso das inundações sazonais, que representa o regime de cheias e secas, condiciona a produção de peixes e influencia a dinâmica da vegetação, afetando a criação de gado bovino de corte (Padovani, 2010).

Pela grande extensão do Pantanal e devido à dificuldade de acesso, as imagens de satélite tornam-se instrumentos importantes para análise das inundações, por proverem uma visão sinóptica de toda a região.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo das plataformas orbitais do programa internacional EOS (*Earth Observing System*), liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), tem gerado dados processados para estudos ambientais. O satélite TERRA foi lançado em dezembro de 1999 e tem passagem pelo Equador às 10h30 (horário local), em órbita descendente (Soares et al., 2007).

Os dados MODIS, de moderada resolução espacial, alta repetitividade, boa qualidade radiométrica, alta precisão geométrica, com correção atmosférica e de distribuição gratuita, apresentam grande potencial de aplicação no monitoramento da dinâmica espectral das áreas inundadas do Pantanal ao longo do tempo (Santos et al, 2009).

A presença da água pode ser detectada por meio do sensoriamento remoto, devido ao comportamento espectral bastante característico das áreas inundadas, com alta absorção da radiação em quase todas as faixas do espectro eletromagnético (Antunes e Esquerdo, 2007). Entretanto, a mistura espectral de diferentes classes de cobertura da terra pode ocorrer quando o tamanho do pixel é maior que as feições terrestres, onde a medida radiométrica representa uma combinação das refletâncias de todos os alvos presentes neste pixel, o que pode acarretar problemas de detalhamento para a quantificação confiável de áreas inundadas do Pantanal.

A inteligência artificial no âmbito do sensoriamento remoto pode ser compreendida como sendo o estado da arte. Pouca pesquisa está relacionada com a utilização de técnicas de aprendizado de máquina na classificação de imagens (Giacco et al., 2010). Nesse sentido, novas abordagens de inteligência artificial, combinando redes neurais e lógica fuzzy, para o reconhecimento de padrões na classificação de séries temporais de imagens de satélite, mostra ser uma alternativa oportuna, viável e inovadora para análise sub-pixel.

2. Objetivo

O objetivo do trabalho foi quantificar as áreas inundadas do Pantanal por meio da classificação sub-pixel de séries temporais de dados MODIS baseada em redes neuro-fuzzy, durante os anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009.

3. Material e Métodos

O estudo foi realizado na porção brasileira do Pantanal, que é uma planície aluvial com extensão de 138.183 km² e está localizada na bacia hidrográfica do Alto Paraguai, com 65% de seu território no Estado de Mato Grosso do Sul e 35% no Estado de Mato Grosso (Silva e Abdon, 1998), conforme ilustrado pela **Figura 1**, onde também são representadas as quatro áreas escolhidas para análise dos resultados da dinâmica das inundações.



Figura 1. Planície do Pantanal Brasileiro e quatro áreas propensas à inundação

O Pantanal é periodicamente alagado pelo rio Paraguai e seus afluentes todos os anos na época das chuvas, devido à sua baixa altitude (80 m a 150 m) e declividade. O período de cheia no Pantanal ocorre geralmente entre março e setembro, enquanto a época da seca se estende entre outubro e fevereiro (Junk et al., 2006).

As séries temporais de imagens do satélite TERRA foram obtidas do Banco de Produtos MODIS na base Estadual Brasileira (Embrapa Informática Agropecuária, 2014), que armazena e disponibiliza na Internet imagens do produto MOD13Q1, em recortes por estados, na projeção geográfica, datum WGS-84 e no formato GeoTIFF (Esquerdo et al., 2010).

O produto MOD13Q1 consiste de composições de pixels de alta qualidade radiométrica, melhor geometria de observação, mínima presença de nuvens e aerossóis, selecionados de imagens diárias ao longo de 16 dias. A atual versão é a coleção 5, que possui mudanças significativas para aumentar a qualidade dos dados (Latorre et al., 2007).

A água apresenta resposta espectral baixa e restrita à faixa entre 0,38 μm e 0,70 μm do espectro eletromagnético. Fora dessa faixa, a refletância é zero e a absorção é total, o que mostra que a água é um forte absorvedor da radiação em quase todas as faixas do espectro eletromagnético, embora este comportamento possa ser ligeiramente alterado em função da turbidez e profundidade da água. A vegetação e o solo exposto sempre possuem refletância maior que a água (Colwell, 1983). Em áreas propensas a inundação, a variação da lâmina d'água pode afetar o comportamento espectral da cobertura da terra, durante o ciclo hidrológico do Pantanal, ocorrendo a mistura espectral desses pixels ao longo do tempo, sobretudo em imagens de moderada resolução espacial.

Baseado nisso, foram utilizados neste trabalho os dados de refletância da banda 7 do infravermelho médio (IVM) do MODIS, com faixa espectral de 2,105 μm a 2,155 μm , na resolução espacial reamostrada para 250 m do produto MOD13Q1. Devido ao tamanho do comprimento de onda do IVM, essa banda é menos influenciada pelas partículas presentes na atmosfera.

A classificação das séries temporais do IVM do MODIS foi realizada com a rede neural auto-organizável de agrupamento Fuzzy ARTMAP, que é um modelo não paramétrico baseado na Teoria da Ressonância Adaptativa de processamento cognitivo do cérebro humano, destinado à aproximação de funções não lineares multidimensionais. Essa arquitetura atua de forma recorrente para resolver o dilema “estabilidade x plasticidade”, mantendo um equilíbrio em criar novas categorias de reconhecimento quando padrões desconhecidos estimulam a rede e a capacidade em agrupar padrões similares na mesma categoria, preservando o conhecimento previamente adquirido (Carpenter et al., 1991).

A rede Fuzzy ARTMAP é composta por um módulo de entrada ART_a que processa os dados de entrada, e um módulo ART_b que processa a resposta de saída desejada para o padrão apresentado à rede, cujos elementos são valores dos conjuntos fuzzy, interligados por um módulo de memória associativa que realiza a conexão entre as categorias de reconhecimento de ART_a para ART_b . O treinamento supervisionado do Fuzzy ARTMAP é realizado com a regra de aprendizagem competitiva “o-vencedor-leva-tudo” e a estratégia de votação dos neurônios acionados com maior frequência para diferentes ordenações dos dados, de forma a maximizar a generalização das categorias de reconhecimento de padrões e minimizar os erros de predição da rede (Carpenter et al., 1992; Mannan et al., 1998).

Para classificação sub-pixel foi utilizado o algoritmo da rede neural Fuzzy ARTMAP baseado na medida de Compromisso CMT (*Commitment*), que expressa o grau de compromisso de um pixel em relação a uma determinada classe e mostra-se de natureza muito semelhante às probabilidades posteriores Bayesianas (LI, 2007; 2008).

A partir das imagens de entrada e das amostras de treinamento, a rede neural Fuzzy ARTMAP, com o algoritmo de classificação sub-pixel CMT, gera um conjunto de imagens de adesão, uma para cada classe (Água e Não-Água), com os graus de compromisso dos pixels medidos entre zero e um, que permite estimar as proporções de mistura de água nos pixels, por meio de uma operação matricial de estatística zonal, conforme a Equação 1:

$$A_{\text{água}} = A_{\text{pixel}} * \sum_{i=1}^n CMT_{\text{água}_i} \quad (1)$$

onde,

$A_{\text{água}}$ = área de inundação (km²);

A_{pixel} = área do pixel MODIS de 0,0625 km² (250 m x 250 m = 62.500 m²);

$CMT_{\text{água}_i}$ = medida de compromisso CMT da classe Água por pixel;

n = número de pixels internos aos limites vetoriais do Pantanal.

4. Resultados e Discussão

O rio Paraguai é o dreno coletor principal das águas do Pantanal. Após receber as primeiras chuvas, tem a sua vazão aumentada e começa o extravasamento para a planície, ocorrendo a inundação. O ciclo natural hidrológico do Pantanal inicia-se em outubro e termina em setembro do ano seguinte. A estação de medição fluviométrica (66825000) do nível hidrométrico do rio Paraguai, em Ladário - MS, é o principal referencial para a caracterização do regime hidrológico do Pantanal, indicando um período como sendo de cheia ou de seca (Galdino e Clarke, 1995). A **Figura 2** mostra os dados de inundação no Pantanal dos anos hidrológicos de 2001/2002 a 2010/2011.

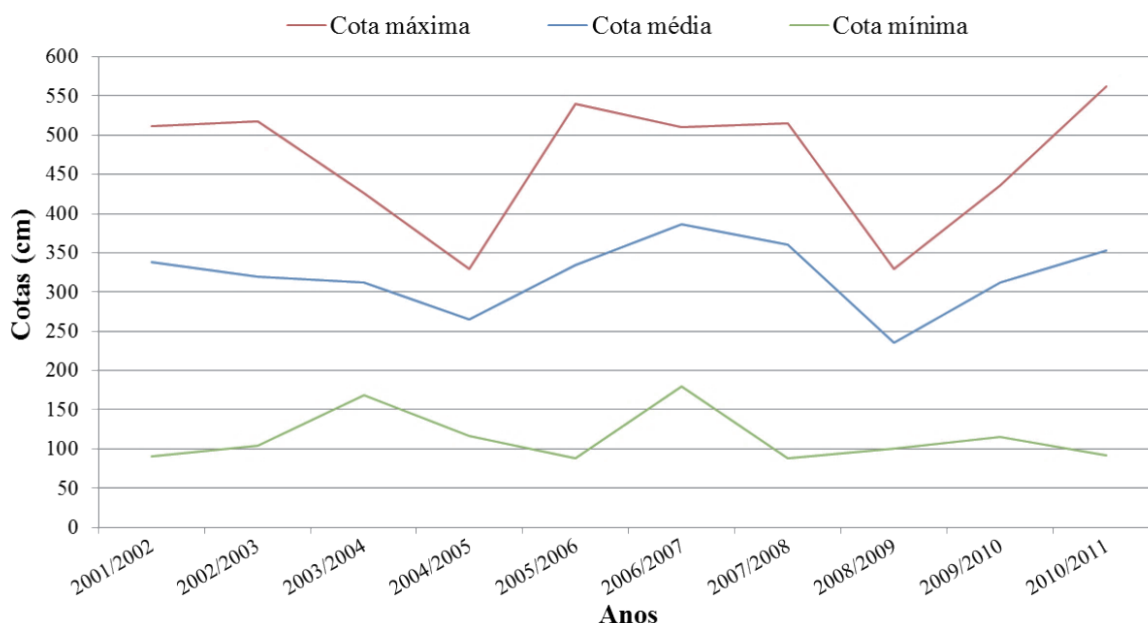


Figura 2. Cotas do rio Paraguai em Ladário - MS de 2001/2002 a 2010/2011

Fonte: Marinha do Brasil (2012)

Quando o nível máximo do rio Paraguai se iguala ou supera o nível de alerta de enchente, que é de 4,00 m, o ano é considerado de cheia no Pantanal, caso contrário, como sendo de seca. Quando o pico de cheia fica compreendido entre 4,00 e 4,99 m, como sendo de cheia pequena, entre 5,00 e 5,99 m como cheia normal e igual ou superior a 6,00 m como cheia grande (Galdino et al., 2002). Pela análise do gráfico da **Figura 2**, pode-se então perceber que no ano hidrológico 2007/2008 ocorreram cheias pronunciadas. Já o ano hidrológico de 2008/2009 foi de forte seca.

O processamento das imagens MODIS consistiu no recorte dos limites geográficos do Pantanal, feito a partir do mosaico dos Estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul. A partir disso foram obtidas as séries temporais das composições de 16 dias do IVM dos anos 2007 a

2009. Para isso foi então escolhido o ciclo natural hidrológico do Pantanal, do período de outubro de 2007 a setembro de 2008 e outubro de 2008 a setembro de 2009, sendo 23 composições para cada ano, totalizando 46 imagens.

Para geração de perfis temporais do IVM foram delimitadas quatro áreas alagáveis, com épocas distintas de inundação do Pantanal, de tamanho 5 x 5 pixels, com aproximadamente 1,7 km², que estão representadas na **Figura 1**. Dessas áreas foram extraídos os perfis médios para acompanhar, de forma geral, a evolução das inundações no Pantanal. Os gráficos que descrevem a variação temporal dos valores de refletância do IVM do MODIS são apresentados na **Figura 3**, para cada uma das quatro áreas alagáveis ao longo anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009.

A análise dos gráficos deve ser entendida na lógica inversa ao regime das cheias, isto é, o valor do pico de refletância corresponde ao mês de seca, maior presença de vegetação e solo exposto, e o valor mais baixo ao mês de cheia no Pantanal, época em que a superfície foi alagada, formando os corpos d'água.

Nos gráficos da **Figura 3** é possível observar as variações nos perfis do IVM oriundas do processo de inundação nas quatro áreas monitoradas. Tais variações evidenciam diferenças decorrentes tanto da época de ocorrência do pico das cheias, como da intensidade das inundações que provoca grande variação na lâmina d'água. De maneira geral, os valores do IVM começam altos e decrescem na medida em que as áreas vão sendo alagadas, chegando a valores mínimos entre os meses de janeiro a abril, no pico das cheias, dependendo da área analisada.

Comparando-se os gráficos referentes aos anos hidrológicos 2007/2008 (**Figura 3 - a, b, c, d**) e 2008/2009 (**Figura 3 - e, f, g, h**), podem ser identificadas variações nos valores mínimos do IVM no momento de pico das cheias, alcançando patamares menores no ano hidrológico de cheias pronunciadas (2007/2008) e níveis maiores no ano hidrológico de forte seca (2008/2009), evidenciando a sensibilidade do IVM à presença da água. A exceção ficou por conta da Área 2, cujos valores mínimos do IVM foram semelhantes em ambos os anos hidrológicos, já que esta área localiza-se na sub-região de Poconé de confluência dos rios Cuiabá e Paraguai (Silva e Abdon, 1998) e, por isso, tem alta frequência de inundação, mesmo nos anos de seca. Um caso especial é a Área 4, localizada na sub-região de Nabileque próxima ao Rio Paraguai, cujo pico da cheia em 2007/2008 ocorreu mais tardiamente, mas que em 2008/2009 provavelmente não foi inundada, já que os valores do IVM aumentaram nessa mesma época.

De forma geral, pela análise dos perfis temporais do IVM do MODIS, pode-se observar que as inundações se iniciam na região norte com o fluxo das águas vindo da região leste para oeste. À medida que ocorre a drenagem dessas áreas alagadas, começa o deslocamento das inundações para a região sul. Após isso, o Pantanal vai secando até que o ciclo recomeça na próxima época das chuvas.

Para seleção das amostras de treinamento, foram utilizados pixels puros coletados em áreas compostas por corpos d'água. Neste sentido, foi gerada uma máscara de água a partir da classificação não-supervisionada Isodata (Exelis, 2014), que identifica agrupamentos formados por pixels com características similares. Devido ao comportamento espectral peculiar das áreas inundadas, os corpos d'água mais homogêneos são bem delineados. As séries temporais do IVM do MODIS foram usadas como as variáveis de entrada para cada ano hidrológico, definindo-se cinco classes de saída com no mínimo 100 pixels por classe. Após a identificação da classe Água, as outras quatro classes foram combinadas como Não-Água.

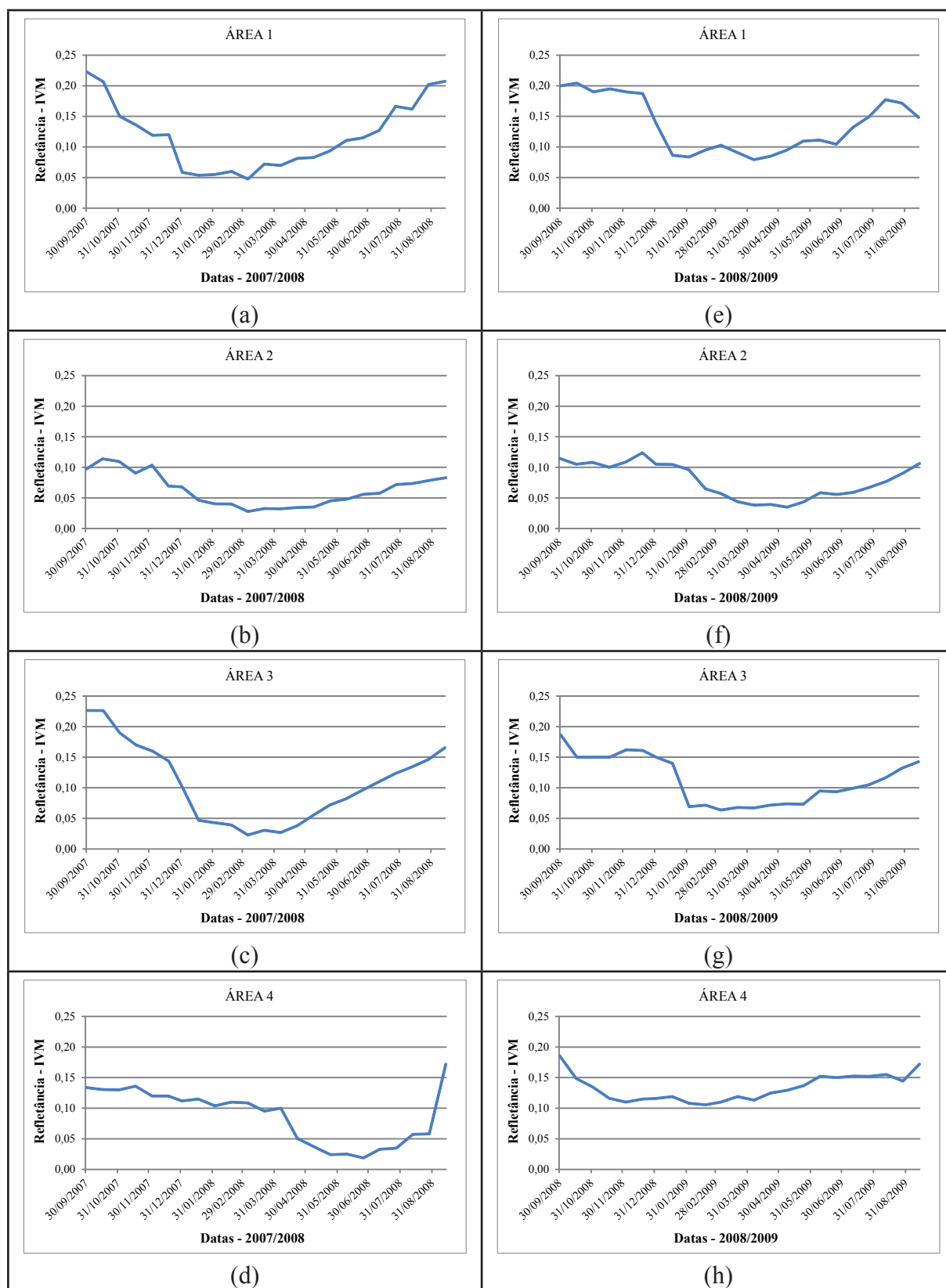


Figura 3. Perfis temporais do IVM do MODIS das quatro áreas propensas a inundação no Pantanal, nos anos hidrológicos de 2007/2008 (a, b, c, d) e 2008/2009 (e, f, g, h).

Para garantir uma classificação fidedigna a partir do processo de aprendizagem do classificador, o tamanho mínimo da amostra de treinamento foi definido com base na regra de ouro utilizada por Van Niel et al. (2005), sendo 30×23 (dimensão dos dados) $\times 2$ (número de classes) igual a 1.380 pixels. Então foi realizada uma amostragem aleatória estratificada proporcional de 1% sobre a máscara de água, já que as classes são desbalanceadas. Com isso foram selecionados 23.848 pixels, que atende perfeitamente a heurística do tamanho mínimo, sendo 6.459 pixels - Água e 17.389 pixels Não-Água para o ano hidrológico de 2007/2008 e 4.318 pixels - Água e 19.530 pixels Não-Água para ano hidrológico de 2008/2009. Pode-se notar que as proporções entre as classes Água e Não-Água nas amostras se alteram de um ano para outro relacionado ao nível de inundação.

As 23 imagens do IVM do MODIS foram utilizadas como as variáveis de entrada do classificador Fuzzy ARTMAP (Clark Labs, 2014), com as respectivas amostras de treinamento, para cada ano hidrológico. A configuração utilizada para ART_a foi o parâmetro de escolha igual a 0,01, a taxa de treinamento igual a 0,93 e o parâmetro de vigilância igual 0,94. Para ART_b utilizou-se a taxa de treinamento igual a 1,00 e o parâmetro de vigilância igual 1,00. Dentre as várias simulações de ajuste, essa foi a combinação ótima de melhor generalização do modelo. A camada de mapeamento que conecta ART_a a ART_b possui duas dimensões referente às classes Água e Não-Água. Para a classificação sub-pixel foi utilizada a medida de Compromisso CMT.

Em relação à topologia da rede, a camada F1 contém o dobro de neurônios da dimensão das variáveis de entrada para preservar a amplitude das informações, neste caso, 2×23 variáveis de entrada igual a 46. O número de neurônios da camada F2 cresce dinamicamente durante o processo de aprendizagem e está diretamente relacionado à parametrização de ART_a. Quanto maior a taxa de treinamento, mais neurônios na camada F2 e mais informação de novos padrões é incorporada a rede. Quanto maior o parâmetro de vigilância, também mais neurônios são gerados na camada F2, o que produz imagens com pixels mais homogêneos, tendo valores mais elevados da medida CMT. O parâmetro de escolha determina o vencedor da classe de saída para determinado pixel e está sujeito ao teste de ressonância baseado no parâmetro de vigilância.

A **Figura 4** apresenta as imagens CMT da classe Água, resultado da classificação do Fuzzy ARTMAP, para os anos hidrológicos 2007/2008 e 2008/2009 do Pantanal.

O gradiente de variação das cores em tons de azul, para os tons de ciano, para os tons de verde e para os tons de amarelo, representa a transição da classe Água com altas proporções de água nos pixels, para a classe Não-Água que não foram inundadas. Pela análise visual da **Figura 4**, pode-se observar que as proporções da classe Água no ano hidrológico de 2007/2008, de grande cheia, são nitidamente maiores que no ano hidrológico de 2008/2009, de forte seca, confirmando a caracterização do ciclo hidrológico realizada a partir dos dados hidrométricos do rio Paraguai coletados em Ladário - MS.

As medidas CMT expressam o grau de compromisso dos pixels à classe Água. Então, a quantificação de áreas inundadas foi calculada a partir da multiplicação da área do pixel MODIS pelo somatório das medidas CMT Água dos pixels internos aos limites vetoriais do Pantanal, por meio da Equação 1. Para o ano hidrológico de 2007/2008, a estimativa da área inundada no Pantanal foi de 48.371 km². Para o ano hidrológico de 2008/2009, a estimativa da área inundada no Pantanal foi de 32.293 km², aproximadamente 33% menor do que o ano anterior.

Quando comparada à simples contagem de pixels, classificados a partir de métodos tradicionais de mapeamento, as medidas CMT tendem a apresentar estimativas mais confiáveis, ao considerar que um pixel pode ser constituído por diferentes proporções de água e por outras coberturas.

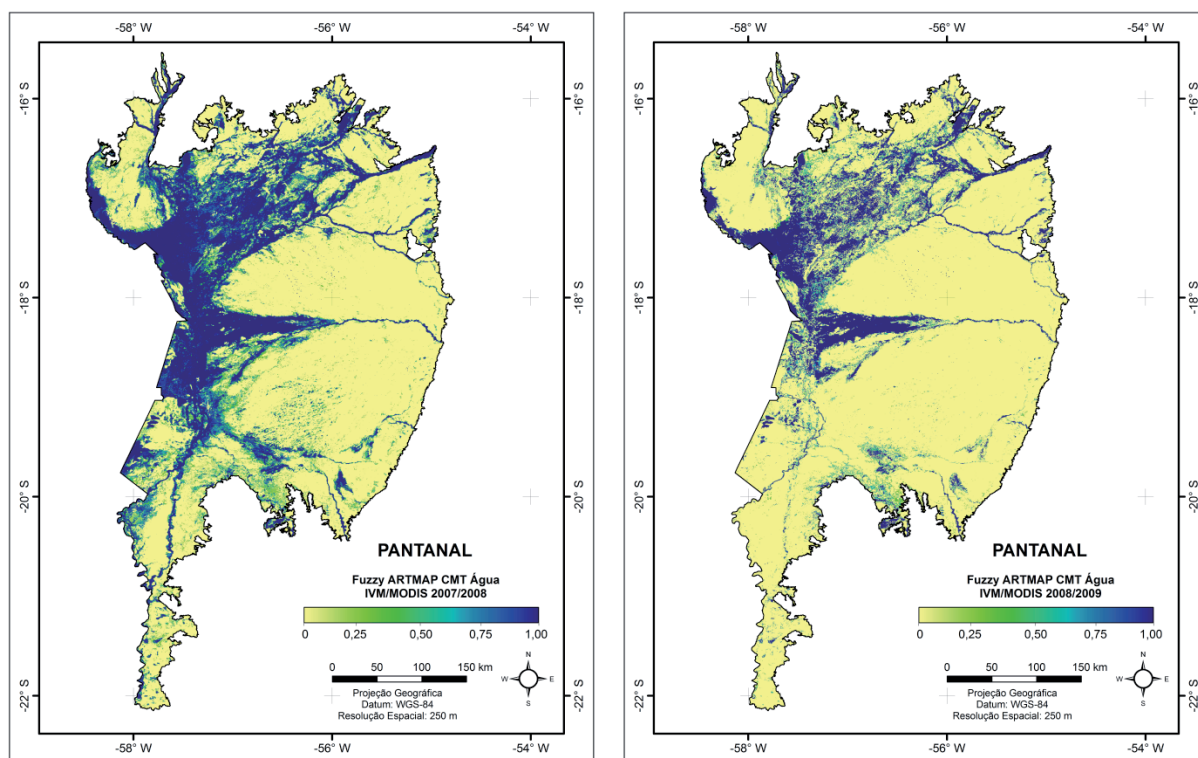


Figura 4. Imagens CMT Água dos anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009

A validação de estudos desta natureza e nesta abrangência espacial é bastante complexa, sendo altamente dependente de informações locais, coletadas em diversas épocas do ano, não disponíveis neste trabalho. Nesse sentido, foi conduzida uma comparação dos resultados com aqueles obtidos por Padovani (2010) nos mesmos anos hidrológicos a partir de um modelo de mistura espectral, também aplicado às imagens MODIS. A comparação com as estimativas aqui apresentadas indicou a mesma tendência e magnitude daquelas encontradas pelo autor, que quantificou a área inundada de 52.894 km² para o ano hidrológico de 2007/2008 e cerca de 22.000 km² para o ano hidrológico 2008/2009.

Apesar dos métodos apresentarem valores diferentes, há que se considerar que esses resultados são estimativas e não os dados reais das áreas inundadas do Pantanal. Dessa forma, não é possível dizer quais valores são os corretos, mas fica clara a constatação, em ambos os trabalhos, da convergência entre as estimativas de inundação, confirmando a caracterização do ciclo hidrológico realizada a partir dos dados hidrométricos do rio Paraguai coletados em Ladário - MS.

5. Conclusões e Sugestões

Os dados da banda do infravermelho médio do MODIS possibilitaram o monitoramento de áreas propensas a inundação no Pantanal durante os anos hidrológicos de 2007/2008 e 2008/2009.

O período de seca e cheia é bastante variável em todo o Pantanal, ocorrendo de norte para sul e de leste para oeste.

A medida de compromisso do classificador Fuzzy ARTMAP possibilitou a quantificação de áreas inundadas do Pantanal, demonstrando potencial para a análise sub-pixel de séries temporais de dados MODIS.

As proporções de água obtidas a partir da medida de compromisso confirmaram a caracter-

ização do ciclo hidrológico realizada a partir dos dados hidrométricos do rio Paraguai coletados em Ladário - MS.

Em estudos futuros, sugere-se utilizar um mapa temático de referência de qualidade que possibilite selecionar amostras de treinamento por classes específicas de uso da terra, com o propósito de refletir melhor a variabilidade espectral entre as classes e, assim, auxiliar no processo de aprendizagem para o reconhecimento de padrões.

6. Referências

- 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**, v. 59, n. 1, p. 115-122, 2007.
- Carpenter G. A.; Crossberg, S.; Reynolds, J. H. Artmap: Supervised real-time learning and classification of non-stationary data by a self-organizing. **Neural Networks**, v. 4, n. 5, p. 565-588, 1991.
- Carpenter, G. A., Crossberg, S.; Markuzon, N.; Reynolds, J. H.; Rosen, D. B. Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 3, n. 5, p. 698-713, 1992.
- Clark Labs. **Products**. Disponível em <<http://www.clarklabs.org/index.cfm>>. Acesso em 6 jul. 2014.
- Colwell, R. N. (Ed.) **Manual of remote sensing**. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry, 2 edition, v. 1, 1232p., 1983.
- Embrapa Informática Agropecuária. **Banco de Produtos MODIS na base Estadual Brasileira**. Disponível em <<http://www.modis.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em 6 jul. 2014.
- Esquerdo, J. C. D. M.; Antunes, J. F. G.; Andrade, J. C. de. **Desenvolvimento do banco de produtos MODIS na Base Estadual Brasileira**. (Comunicado Técnico, 100) - Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 7 p., 2010.
- Exelis. Visual information solutions. **Products & Services**. Disponível em <<http://www.exelisvis.com/ProductsServices.aspx/>>. Acesso em 6 jul. 2014.
- Galdino, S.; Clarke, R. T. **Levantamento e estatística dos níveis hidrométricos do rio Paraguai em Ladário, MS - Pantanal**. Período 1900-1994. (Documentos, 14) - Corumbá: Embrapa Pantanal, 72 p, 1995.
- Galdino, S.; Vieira, L. M.; Oliveira, H. de; Cardoso, E. L. **Impactos da Agropecuária nos Planaltos sobre o Regime Hidrológico do Pantanal**. (Circular Técnica, 37) - Corumbá: Embrapa Pantanal, 6p, 2002.
- Giacco, F; Thiel, C.; Pugliese, L; Scarpetta, S.; Marinaro, M. Uncertainty Analysis for the Classification of Multi-Spectral Satellite Images Using SVMs and SOMs. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 10, p. 3769-3779, 2010.
- Junk, W. J.; Cunha, C. N.; Wantzen, K. M.; Petermann, P.; Strussmann, C.; Marques, M. I.; Adis, J. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **Aquatic Sciences**, v. 68, n. 3, p. 278-309, 2006.
- Latorre, M. L.; Shimabukuro, Y. E.; Anderson, L. O. **Sensor MODIS: Produtos para Ecossistemas Terrestres - MODLAND**. In: O Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil - Shimabukuro, Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Ceballos, J. C. (Coords). São José dos Campos: Editora Parêntese, SP, Brasil, 2007.
- Li, Z. **Development of soft classification algorithms for neural network models in the use of remotely sensed image classification**. 98p. Thesis (Doctor of Philosophy in the Graduate School of Geography) - Clark University, Worcester, 2007.
- Li, Z. Fuzzy ARTMAP based neurocomputational spatial uncertainty measures. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 74, n. 12, p. 1573-1584, 2008.
- Mannan, B.; Roy, J. Fuzzy ARTMAP supervised classification of multispectral remotely-sensed images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, p. 767-774, 1998.
- Marinha do Brasil. **Serviço de Sinalização Náutica do Oeste**. Disponível em <<https://www.mar.mil.br/ssn-6/>>. Acesso em 27. abr. 2012.

Padovani, C. R. **Dinâmica Espaço-Temporal das Inundações do Pantanal**. 174p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura «Luiz de Queiroz», Piracicaba, SP, 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**, v. 34, Num. Esp., p. 745-755, 2009.

Silva, J. dos S. V. da; Abdon, M. de M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 33, Num. Esp., p. 1703-1711, 1998.

Soares, J. V.; Batista, G. T; Shimabukuro, Y. E. **Sensor MODIS: Histórico e Descrição**. In: O Sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil - Shimabukuro. Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Ceballos, J. C. (Coords). São José dos Campos: Editora Parêntese, SP, Brasil, 2007.

Van Niel, T. G.; Mcvicar, T. R.; Datt, B. On the relationship between training sample size and data dimensionality: Monte Carlo analysis of broadband multi-temporal classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n.4, p. 468-480, 2005.