

## Avaliação da variabilidade espacial da produtividade primária no bioma Pantanal

Luciana de Oliveira Pereira<sup>1</sup>  
Francielle da Silva Cardozo<sup>1</sup>  
Yhasmin Mendes de Moura<sup>1</sup>  
Leila Maria Garcia Fonseca<sup>1</sup>  
Gabriel Pereira<sup>1</sup>  
Fabrício Brito Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{luciano, cardozo, yhasmin, gabriel, fabricio}@dsr.inpe.br; leila@dpi.inpe.br

**Abstract.** Pantanal is one of the largest plains of sedimentation and flooding in the world, and its principal characteristic is a remarkable intra and interannual dynamic due to the floods that occur throughout the year, causing changes in vegetation cover and hence in the primary productivity, which is characterized by the carbon sequestration from the atmosphere through the vegetation. Therefore, the objective of this study is to examine the relationship between primary productivity and the wetlands magnitude in the biome from 2000 to 2009 to identify the areas where there is the greatest spatial variability of primary productivity and to infer the causes of these oscillations in different vegetation types. It was noticed that the areas that have the highest variability are composed by Forest Formations and Woody Savanna, coinciding with the areas that have a large tendency to increase primary productivity. In this context, Woody Savanna and Forest Formations were the classes that most contributed to the values of primary productivity in the last 10 years and consequently, the one that most contributed to carbon sequestration. Therefore, studies like this that aim to identify and quantify the relationship of primary productivity in the vegetation dynamics are of fundamental importance in the analysis of the carbon sequestration in the biome analyzed and, consequently, in the identification of the impacts arising from the changes in land use and land cover.

**Palavras-chave:** remote sensing, principal component analysis, carbon sequestration, vegetation dynamics, sensoriamento remoto, análise por componentes principais, sequestro de carbono, dinâmica da vegetação.

### 1. Introdução

O Bioma Pantanal é de suma importância no contexto nacional e internacional, sendo considerada uma das maiores planícies de sedimentação e inundação do mundo. Esta área é drenada pelo alto curso do rio Paraguai e seus afluentes (Silva e Abdon, 1998; Silva, 2002), e tem como principal característica uma notável dinâmica intra e interanual (Pereira et al., 2010). Ao longo do ano ocorrem inundações que são periódicas em concordância com o período seco que ocorre de abril a setembro e chuvoso que ocorre a partir de outubro. Segundo Cardozo et al., (2010), a magnitude das áreas inundadas variou consideravelmente nos últimos 10 anos. Neste contexto, é importante ressaltar que a intensidade, magnitude e tempo de permanência das inundações determinam os principais processos bióticos e abióticos, bem como as composições específicas das unidades de paisagem do Pantanal (Adamoli, 1995). Todo o bioma é influenciado pelas alterações no regime de inundações, causando mudanças na cobertura vegetal e, conseqüentemente, na produtividade primária.

A produtividade primária está relacionada com o carbono central na interface entre a planta e outros processos, descrevendo a remoção do carbono da atmosfera. Em escala global, é um dos parâmetros ecológicos mais modelados, que diferem na abordagem e complexidade, produzindo estimativas comparáveis (Field et al., 1995). A relação entre esta variável e a magnitude das inundações não é bem conhecida, pois o monitoramento de áreas como o Pantanal é uma tarefa difícil devido à grande extensão territorial e a dificuldade de acesso (Pott e Pott, 2004).

Desta forma, técnicas de sensoriamento remoto tem sido uma alternativa viável neste tipo de estudo, pois possibilita uma visão sinótica e repetitiva da área. Além disso, existem

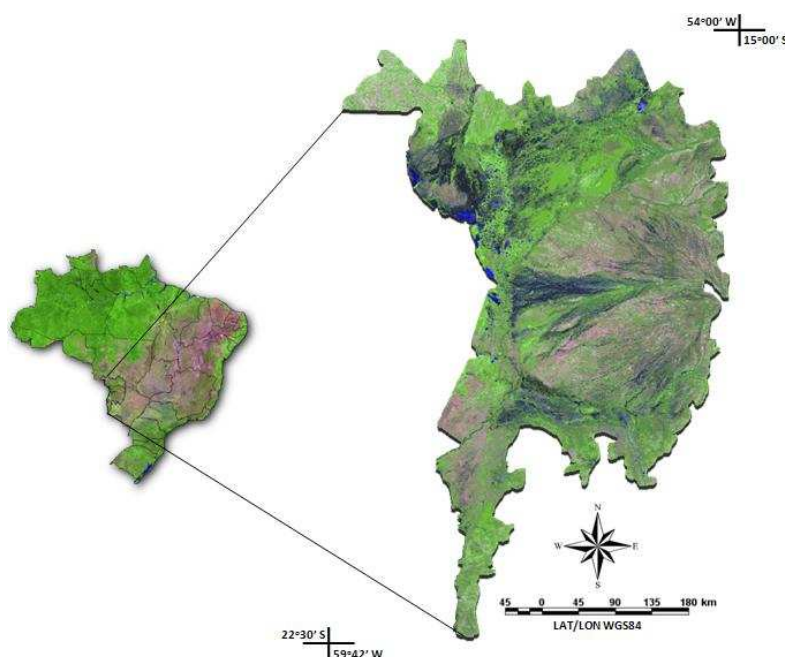
produtos como o MOD17A2 que fornecem dados de produtividade primária mensal que, aliados a técnicas de processamento de imagens como a Análise por Componentes Principais (PCA), possibilitam a extração de informações importantes sobre essa variável no Pantanal, melhorando o conhecimento sobre a dinâmica da área e oferecendo subsídios para a conservação e monitoramento do Bioma. A PCA possui grande aplicabilidade no estudo de áreas dinâmicas, pois analisa um conjunto de dados multivariados, reduzindo a sua dimensionalidade e gerando um novo conjunto de imagens descorrelacionadas entre si e que individualmente apresentam um conjunto particular de informações (Crosta, 1992).

Dadas às circunstâncias descritas, o presente trabalho tem o objetivo de analisar a relação existente entre produtividade primária e a magnitude das áreas alagadas do Pantanal entre o período de 2000 a 2009, bem como identificar as áreas onde ocorrem a maior variabilidade espacial da produtividade primária e inferir sobre as causas destas oscilações em diferentes fenologias vegetacionais.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de estudo

O Pantanal está situado entre as coordenadas  $59^{\circ}15'W$  e  $22^{\circ}10'S$ ; e  $54^{\circ}50'W$  e  $15^{\circ}30'$ , na porção centro-sul do Continente Sul-Americano, conforme Figura 1, possuindo uma área de aproximadamente 160 mil  $km^2$ , no qual 35,36% desse total estão situados no Estado do Mato Grosso e 64,64% no Estado do Mato Grosso do Sul.



**Figura 1.** Mapa de localização do bioma Pantanal. Imagem do sensor MODIS de março de 2010, composição 1B2G6R.

### 2.2 Descrição e aquisição dos dados

Neste trabalho foram utilizadas imagens do sensor MODIS/Terra (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) referentes aos produtos MCD12, MOD44B e MOD17A2, correspondentes aos os *tiles* V10, V11 e H12, que abrangem todo o bioma Pantanal.

O produto MOD12 possui 500 metros de resolução espacial e refere-se ao uso e cobertura da terra, contendo múltiplos esquemas de classificação que descrevem as propriedades de cobertura da terra derivadas de observações anuais. O esquema primário identifica 17 classes de cobertura da terra definidas pelo *International Geosphere Biosphere Programme* (IGBP),

que inclui 11 classes de vegetação natural, três classes de mosaicos e três classes de coberturas não-vegetadas.

O produto MOD44B é denominado de *Vegetation Continuous Field* (VCF) e representa uma estimativa global do percentual de cobertura florestal baseado em métricas obtidas a partir dos dados mensais de reflectância da superfície do sensor MODIS com resolução espacial de 500 metros. Os dados de VCF são utilizados para estudos de ciclos biogeoquímicos, manejo de ecossistemas, análise ambiental, entre outros. O algoritmo do VCF baseia-se em um algoritmo de árvore de regressão, e o percentual do dossel representa o total de radiação solar obstruída pelas árvores maiores que 5 metros (Hansen et al., 2003).

O produto MOD17A2, referente à produtividade primária bruta (GPP), é um composto cumulativo de valores de GPP, baseados no conceito de eficiência da utilização da radiação solar pela vegetação. Nessa lógica, a produtividade primária está linearmente relacionada com a radiação ativa absorvida pela fotossíntese (APAR). Essa radiação é interceptada e absorvida de acordo com a capacidade de absorção e área foliar da vegetação (Montieth, 1972). Os dados são originados a partir de um mosaico de 8 dias com 1 km de resolução espacial.

O mapa da tendência de aumento da produtividade primária está fundamentado no trabalho de Zhao e Running (2010) e os dados estão disponíveis em <http://www.ntsg.umd.edu/>.

### 2.3 Processamento e análise

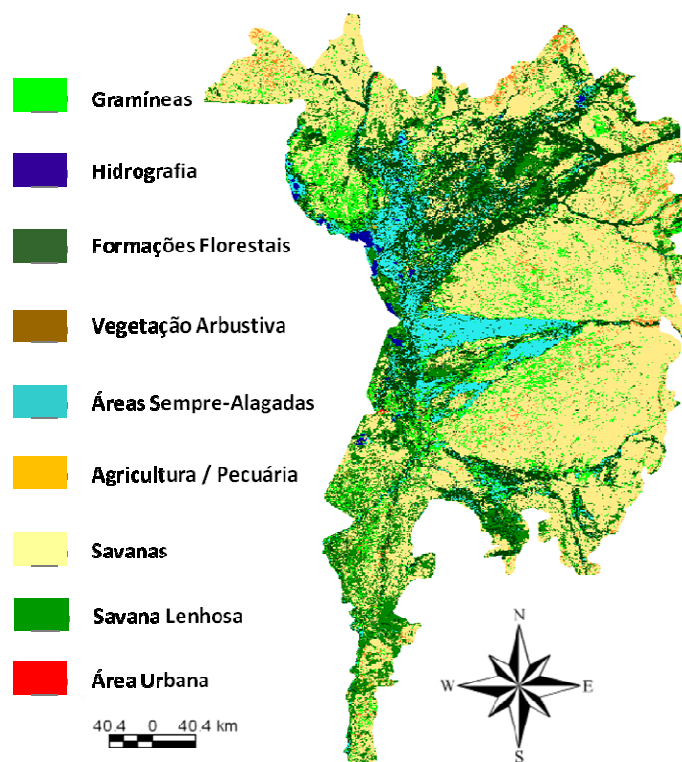
Todos os produtos (MOD12, MOD44BB e MOD17A2) foram convertidos do formato *Hierarchical Data Format* (HDF) para o formato geotiff, utilizando o aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT), os quais foram mosaicados e recortados segundo o limite da área de estudo. Em seguida, os produtos MOD12 e MOD44BB, referentes ao uso e cobertura da terra e percentual da cobertura florestal, respectivamente, foram importados para o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) como numérico, onde foram realizadas as edições finais, a partir da atribuição de cores, escalas e legendas para posterior análise.

As imagens do produto MOD17A2, referentes à produtividade primária, foram inseridas primeiramente no *software Environment for Visualizing Images* (ENVI 4.5), onde foram processadas por meio da análise por componentes principais para extrair as informações da variabilidade espacial da produtividade primária para o período compreendido entre 2000 e 2009, onde foi utilizada a componente principal 2 (PC2). Em seguida, a imagem foi inserida no SPRING onde também foi realizada a edição final, a partir da escolha de cores e inserção da escala e da legenda.

Além disso, foi feita uma avaliação da coerência entre o mapa de uso e cobertura da terra, utilizado pelo produto MOD17 e o mapa de percentual da cobertura florestal (VCF), para auxiliar na interpretação dos dados de produtividade primária, a partir da comparação visual e pela análise da tabulação cruzada dos dois mapas.

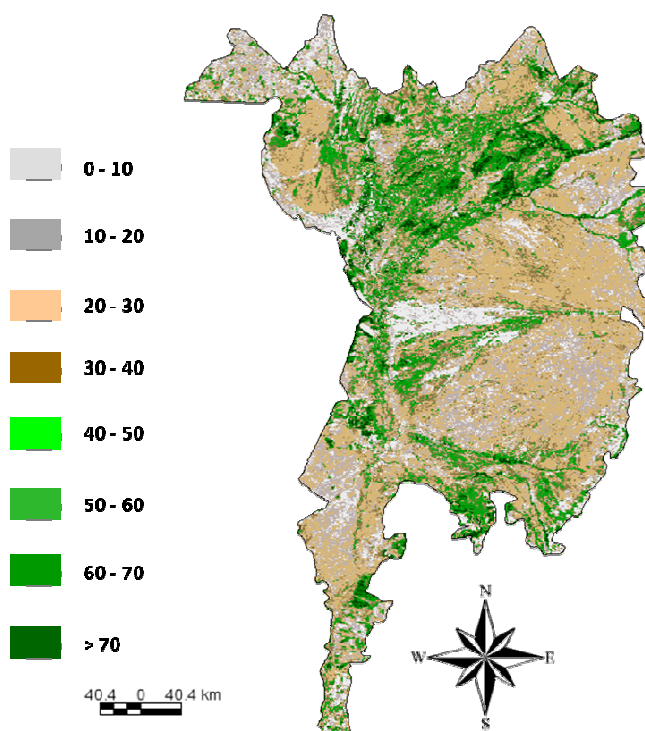
### 3. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra o mapa de uso e cobertura da terra extraído do produto MCD12 do sensor MODIS. Este mapa está dividido em 8 classes, sendo que a classe Savanas representam 42% da área mapeada, seguida da classe Savana Lenhosa com 21%, Formações Florestais (16%), Gramíneas (9%), Áreas permanentemente alagadas (6%), Agricultura/pecuária (2%), Vegetação Arbustiva (0.98%), Hidrografia (0.52%) e Área Urbana (0.02%).



**Figura 2.** Mapa do uso e cobertura da terra estimado a partir dos dados do produto MCD12 do sensor MODIS.

A Figura 3 representa o mapa extraído do produto VCF, que mostra o percentual de Cobertura Florestal presente no bioma pantanal. As classes que apresentam as cores mais claras denotam áreas que possuem pouca cobertura vegetal (0-10%), e as classes em tons de verde escuro estão associadas com a maior presença da cobertura vegetal na região de estudo (>70%).



**Figura 3.** Produto VCF para o bioma Pantanal estimado a partir dos dados do sensor MODIS.

Analisando as Figuras 2 e 3 e a Tabela 1, percebe-se que as classes de uso e cobertura da terra que coincidem com o maior percentual de cobertura florestal do mapa do produto VCF (>70%) são as Formações Florestais, com 20,6%, e a Savana Lenhosa, com 15,11%. As Formações Florestais (31,78%), a Savana Lenhosa (24,23%) e a Vegetação Arbustiva (18,52%) apresentaram valores representativos na classe que representa 40-50% de cobertura florestal do mapa VCF. Em relação à classe que representa 30-40%, percebeu-se que, com exceção da Hidrografia e da Área Urbana, o restante dos tipos de usos e coberturas da terra foram bem significativos. A Savana (48,79%), Gramíneas (43,4%), Agricultura/Pecuária (34,34%), Vegetação Arbustiva (33,73%) e Savana Lenhosa (27,49%) inseriram-se em maioria na classe que representa 20-30% de cobertura florestal do mapa VCF.

Em relação à classe de 10-20%, observou-se que a Agricultura/Pecuária (31,7%), Savanas (21,87%) e Gramíneas (20,50%) foram dominantes. A Hidrografia e a Área Urbana apresentaram-se em maioria em áreas representadas pela classe de 0-10%. Porém, observou-se uma inconsistência em relação às Áreas Constantemente Alagadas, pois estiveram em minoria nas áreas representadas por 0-10% e em maioria nas áreas que representam 40-50% de cobertura florestal do mapa VCF.

Como todos os produtos do sensor MODIS são projetados em uma escala de 1 km de resolução espacial, é difícil a obtenção precisa da cobertura da terra em áreas com vegetação complexa, podendo ocorrer erros de classificação. No entanto, estudos mostram que os mapas de vegetação do MODIS são precisos em 65-80% dos casos, com precisão maior para pixels amplamente homogêneos, permitindo o monitoramento coerente da cobertura global da terra (Hansen et al. 2000).

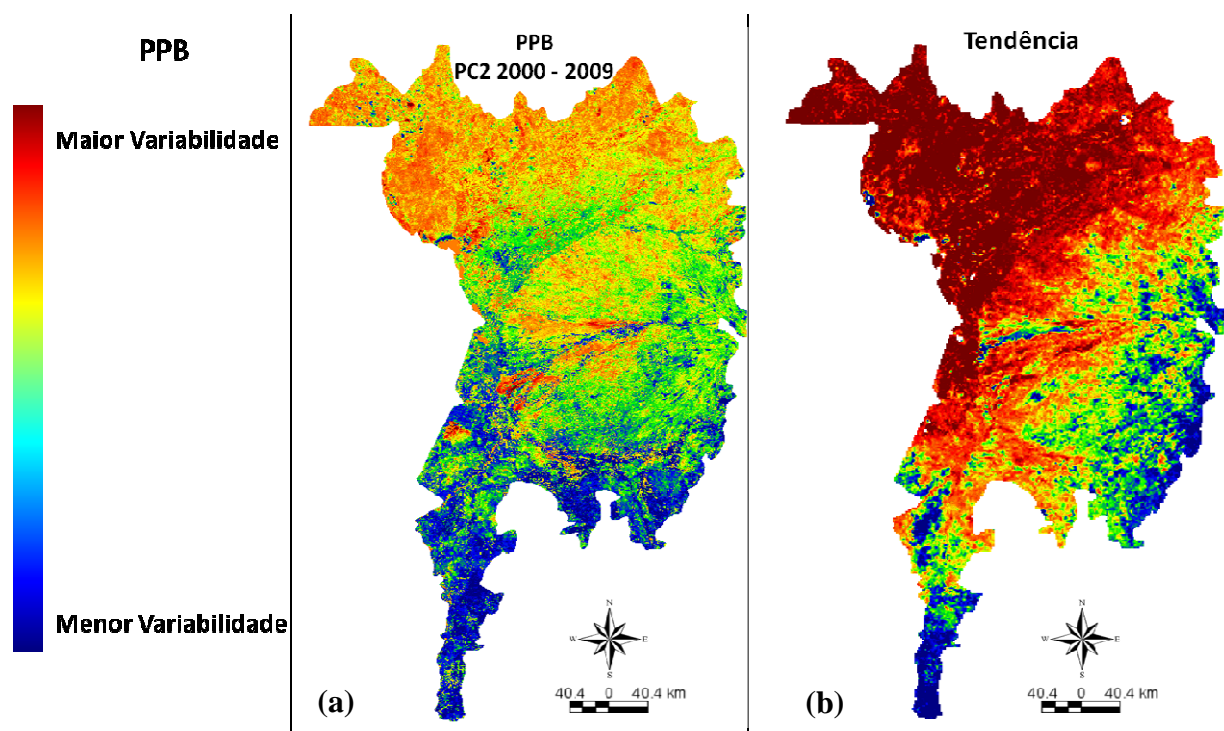
**Tabela 1.** Tabulação cruzada entre as classes de uso e cobertura da terra do produto MCD12 (linhas) e entre as classes do percentual de cobertura florestal do produto VCF (colunas).

	0-10	10--20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
<b>Hidrografia</b>	82.42	9.86	4.04	1.31	0.83	0.71	0.36	0.48
<b>Formações Florestais</b>	4.80	8.80	17.85	16.10	31.78	9.70	2.87	8.09
<b>Vegetação Arbustiva</b>	8.69	13.32	33.73	23.78	18.52	1.52	0.19	0.25
<b>Savana Lenhosa</b>	5.85	11.71	27.49	15.61	24.23	8.54	2.23	4.34
<b>Savanas</b>	12.37	21.87	48.79	10.95	5.29	0.56	0.06	0.12
<b>Gramíneas</b>	13.54	20.50	43.94	13.50	7.98	0.41	0.03	0.10
<b>Áreas Sempre-Alagadas</b>	30.26	17.63	14.98	13.78	17.16	3.56	1.29	1.34
<b>Agricultura/Pecuária</b>	20.81	31.29	34.34	8.75	4.35	0.39	0.03	0.05
<b>Área Urbana</b>	82.14	7.14	7.14	0.00	3.57	0.00	0.00	0.00

A Figura 4a representa a componente principal 2 (PC2) gerada a partir dos dados de produtividade primária do sensor MODIS. A Figura 4b representa a tendência de aumento da produtividade primária. Analisando a Figura 4a, percebe-se que as áreas que possuem as maiores variabilidades compreendem os locais que possuem Formações Florestais e áreas de Savana Lenhosa, que são sensíveis às variações das estações chuvosas e secas, e as áreas presentes no leque do Rio Taquari, que apresentam uma grande dinâmica intra e interanual, como demonstrado por Cardozo et al., (2010). Em geral, essas áreas coincidem com os locais que possuem uma grande tendência de aumento da produtividade primária, como pode ser visto na Figura 4b.

Ainda segundo a Figura 4a, as áreas com as menores variabilidades apresentam como classe dominante a savana, que por ser uma vegetação mais adaptada ao clima do bioma,

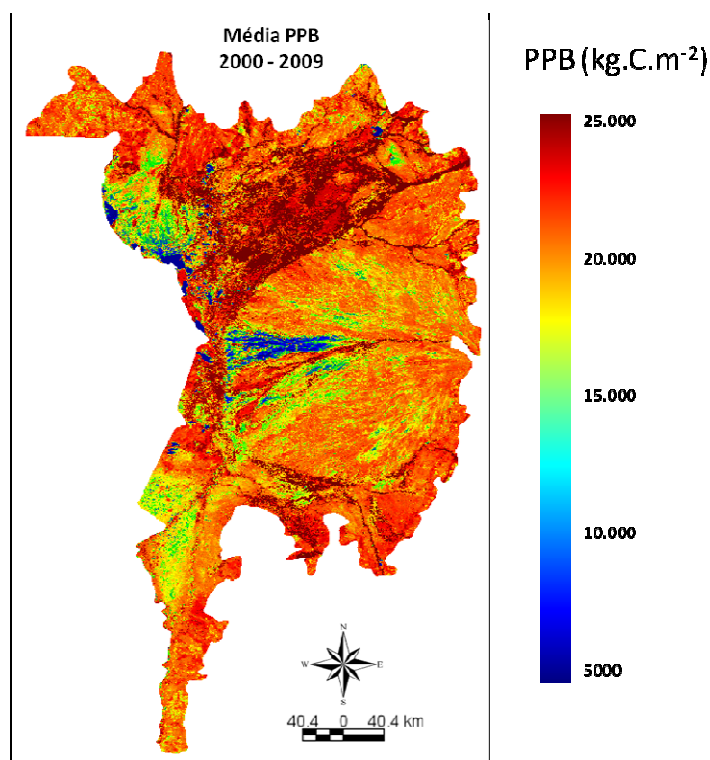
responde melhor às alterações climáticas, apresentando assim maior resiliência e uma relativa estabilidade em sua estrutura vegetacional e ciclo fenológico e, conseqüentemente, na produtividade primária (Silva et al., 2009). Aliado a este fato, esta área apresentou um número relativamente baixo nos eventos de alagamentos nos últimos 10 anos (Cardozo et al., 2010), o que corrobora com esta relativa estabilidade e, portanto, a probabilidade de aumento da produtividade primária é menor.



**Figura 4.** Mapa da principal componente 2 (a) gerada a partir da produtividade primária, e mapa de tendência de aumento da produtividade primária (b).

Em relação à Figura 5, podemos notar que a classe de uso e ocupação da terra que mais colaborou para o montante de produtividade primária média nos últimos 10 anos foram as Formações Florestais e a Savana Lenhosa, sendo que estas áreas foram compatíveis com as áreas de maior variabilidade apresentadas na Figura 4a (PC2). O mapa de tendência do aumento da produtividade primária (Figura 4b) também aponta as classes Formações Florestais e Savana Lenhosa, bem como a região do entorno, como as áreas com maior capacidade de aumentar a produtividade primária, mostrando assim a necessidade de preservação destas classes no contexto do sequestro de carbono.

As regiões que possuem valores baixos de produtividade primária estão representadas pelo centro do leque do rio Taquari e o leque do Rio Paraguai, pois são áreas que estão constantemente alagadas. É importante ressaltar que, quando ocorre o evento de alagamento, a lâmina de água impede a atividade plena da fotossíntese, diminuindo consideravelmente a produção primária e conseqüentemente o sequestro de carbono. Outro local, presente na região noroeste do bioma, chama a atenção pela menor contribuição na produtividade primária média, podendo-se inferir que esta área sofre alagamentos periódicos. Apesar das áreas sujeitas a alagamentos não serem regiões de grande contribuição na quantização da produção primária média, ela é responsável, mesmo que indiretamente, na manutenção do montante de produtividade primária das demais áreas, pois é inerente à dinâmica da região. As demais áreas apresentaram valores consideráveis de produtividade primária, fato esse que justifica a preservação e o manejo adequado deste bioma.



**Figura 5.** Mapa da média da produtividade primária de 2000 a 2009.

#### 4. Conclusões

A análise comparativa entre o mapa do uso e cobertura da terra do produto MOD12 e o mapa do percentual de cobertura florestal do VCF apresentou uma inconsistência em relação à classe Áreas Constantemente Alagadas.

As Formações Florestais e a Savana Lenhosa foram as classes que mais colaboraram para o montante de produtividade primária média nos últimos 10 anos, ou seja, que mais contribuíram para o sequestro de carbono. Já as regiões que menos contribuíram neste processo foram as áreas centrais do leque do rio Taquari e o leque do Rio Paraguai, pois são áreas que estão constantemente alagadas. Porém, deve-se ressaltar que elas são responsáveis, mesmo que indiretamente, pela manutenção do montante de produtividade primária das demais áreas.

Portanto, estudos como este, que visam a identificação e quantificação da relação da produtividade primária com a dinâmica da vegetação, são de fundamental importância para a análise da assimilação do carbono no bioma estudado e, conseqüentemente, dos impactos provocados pelas mudanças no uso e cobertura da terra.

#### Referências

Adamoli, J. Zoneamento ecológico do Pantanal baseado no regime de inundações. In: ENCONTRO SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A ESTUDOS NO PANTANAL, 1., 1995, Corumbá. **Anais.** São José dos Campos: Inpe, 2005. p. 15-17.

Cardozo, F. S.; Pereira, L. O.; Moura, Y. M.; Fonseca, L. M. G.; Pereira, G.; Kampel, M.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes, E. C. Utilização de Parâmetros Biofísicos para a Estimativa de Áreas Alagadas no Bioma Pantanal. In: 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2010. Cáceres. **Anais.** São José dos Campos: INPE, 2010. p. 809-817.

Crosta, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas – SP: IG/UNICAMP, 170 p, 1992.

Field, C. B.; Randerson, J. T.; Malmström, C. M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.

Hansen, M. C.; Defries, R. S.; Townshend, J. R. G.; Carroll, M.; Dimiceli, C.; Sohlberg, R. A. Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. **Earth Interactions**, v. 7, n. 10, p. 1-15, 2003.

Montieth, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**. v. 9, p.747-766, 1972.

Pereira, L. O.; Cardozo, F. S.; Moura, Y. M.; Fonseca, L. M. G.; Pereira, G.; Moraes, E. C. Delimitação das áreas alagadas do Pantanal a partir da análise por Componentes Principais e Transformada Wavelet. In: 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2010, Cáceres. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2010. p. 200-209.

Pott, A.; Pott, V. J. Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland. **Wetlands Ecology and Management**, v.12, p. 547-552, 2004.

Silva, J. S. V; Abdon, M. M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas subregiões. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 33. n. especial, p. 1703-1711, out. 1998.

Silva, R. C. **Estudo do Balanço de Radiação no Pantanal Sul Matogrossense**. 2002. 213 p. (INPE-9776—TDI/860). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Silva, F. B.; Pereira, G.; Zani, H.; Shimabukuro, Y. E.; Moraes, E. C. Estudo temporal da produtividade primária bruta na região do Pantanal Mato-Grossense utilizando dados do sensor MODIS e transformada wavelet. In: 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2009, Corumbá. **Anais**. São José dos Campos: Inpe, 2009. p. 633-641.

Zhao, M.; Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. **Science**, 329, 5994, p. 940-943, 2010.