

MAPEAMENTO DA COBERTURA DA TERRA DO ESTADO DO MATO GROSSO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE DADOS MULTITEMPORAIS DO SENSOR MODIS

Liana Oighenstein ANDERSON¹

Yosio Edemir SHIMABUKURO¹

André de LIMA¹

José Simeão de MEDEIROS¹

Resumo

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante fonte de informações para monitorar os recursos naturais da Terra, devido à possibilidade de se adquirir dados sobre grandes extensões geográficas. As imagens derivadas de produtos do sensoriamento remoto são uma excelente fonte de dados para produzir mapas de cobertura vegetal e uso da terra. Estimativas recentes das mudanças que vem ocorrendo na cobertura da terra apontam para a intensificação da agricultura, desmatamentos nos trópicos, expansão das áreas de pastagens e urbanização como as principais forçantes atuais. Desta forma, é inquestionável a importância de se realizar um mapeamento acurado das diferentes formações vegetais, tanto como base para estudos de conservação, quanto para estudos que envolvam questões relacionadas às mudanças globais, como alterações no clima, no ciclo do carbono e no balanço hídrico. O principal objetivo do presente trabalho é apresentar uma proposta metodológica para o mapeamento da cobertura da terra a partir da utilização de dados multitemporais do sensor MODIS. No mapa de cobertura da terra gerado nesta pesquisa, apresenta-se além da classificação de diferentes classes vegetais, as áreas antropizadas e as áreas onde existe o cultivo de soja, para o Estado do Mato Grosso.

Palavras-Chave: Mapeamento da cobertura da terra; Sensoriamento Remoto; Sensor MODIS; Estado do Mato Grosso.

Abstract

Land cover mapping over Mato Grosso State using Modis Sensor multitemporal data

On the last decades, the remote sensing became an important source of information to monitor the natural resources of the planet, due to its possibility to acquire data over large regions. The images derived from remote sensing instruments are an excellent source of data to produce land cover and vegetation maps. Recent estimates of changes occurring in the land cover point to the agricultural intensification, deforestation in the tropic, pasturelands expansion, and urbanization as the currently main forces. So, it is unquestionable the importance of developing an accurate map of the different vegetation formations, as base for conservation studies, and studies that involve global change, such as climate change and carbon and hydrological balance. The main objective of this paper is to present a methodological approach to land cover mapping using MODIS multitemporal sensor data. The map generated in this research presents the classification of different vegetation classes, anthropic areas and soybean cultivation areas, over the Mato Grosso State.

Keywords: Land cover mapping; Remote Sensing; MODIS sensor; Mato Grosso State.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): Av. dos Astronautas, 1.758, 12227-010, São José dos Campos - SP, Fone: +55 (12) 3945-6908, Fax: +55 (12) 3945-6449, email:{liana, yosio, andre, simeao}@ltid.inpe.br

INTRODUÇÃO

Em uma escala global, a mudança do uso da terra e da cobertura vegetal está ocorrendo em passos acelerados, principalmente nos trópicos. Estas mudanças nos ecossistemas terrestres estão fortemente associadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico principalmente em países subdesenvolvidos, onde não se encontram planejamentos para a ocupação do território, nem projetos e estudos para explorar de maneira sustentável os recursos da terra, ou quando estes estudos existem, falta coordenação das ações e objetivos políticos. Segundo Lambin (1997) o conhecimento e o entendimento destes processos ainda estão muito fragmentados para avaliar e estimar o vasto impacto destas mudanças nos sistemas naturais e humanos.

Alterações da cobertura vegetal devido às atividades humanas exercem grande influência nos ciclos biogeoquímicos e climáticos do sistema terrestre. Os ecossistemas terrestres exercem um controle nos ciclos biogeoquímicos, o que por sua vez influenciam significativamente os sistemas climáticos através de propriedades radiativas dos gases de efeito estufa e outros gases reativos (FRIEDL et al., 2002).

Algumas ferramentas importantes para se detectar e mapear estas mudanças são os produtos do sensoriamento remoto obtidos por plataformas orbitais e os sistemas de informações geográficas. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante fonte de informações para monitorar os recursos naturais da Terra, devido à possibilidade de se adquirir dados sobre grandes extensões geográficas, e assim, os processos que ocorrem nestas áreas podem ser melhor compreendidos a partir destes monitoramentos.

Neste contexto, o mapeamento da cobertura vegetal e seu monitoramento mostram-se de extrema importância, e existe um esforço por parte da comunidade científica em melhorar a acurácia destes estudos. Estes trabalhos visam observar as mudanças devido a fatores naturais e antrópicos (ZHAN et al., 2002), buscar uma maior eficiência nas elaborações de planos de manejo de recursos naturais, assim como na análise da paisagem (SOARES FILHO, 2001), delimitar as áreas prioritárias para a conservação (SOUZA et al., 1998), ou ainda realizar estudos que envolvem tópicos sobre mudanças globais (JUSTICE et al., 2002), modelagens de ciclos biogeoquímicos, estimativas de emissão de carbono (DEFRIES et al., 2002) dentre outros.

Estimativas recentes das mudanças que vem ocorrendo na cobertura vegetal e uso da terra apontam para a intensificação da agricultura, desmatamentos nos trópicos, expansão das áreas de pastagens e urbanização como as principais forçantes atuais.

Desta forma, é inquestionável a importância de se realizar um mapeamento acurado das diferentes formações vegetais, tanto como base para estudos de conservação, quanto para estudos que envolvam questões relacionadas às mudanças globais, como alterações no clima, no ciclo do carbono e no balanço hídrico, devido à causas naturais e/ou antrópicas.

As imagens derivadas de produtos do sensoriamento remoto são uma excelente fonte de dados para produzir mapas de cobertura vegetal e uso da terra. Estes mapas geralmente são gerados a partir de técnicas de processamento de imagens, derivados de produtos da classificação digital.

Até recentemente, o AVHRR era o único instrumento viável para fornecer dados para o mapeamento global da vegetação. Atualmente com a disponibilidade dos dados MODIS, que possui os atributos espectrais, espaciais e geométricos mais finos do que o AVHRR, abre-se uma nova possibilidade de pesquisas e desafios para a geração de mapas baseados em dados de sensoriamento remoto (FRIEDL et al., 2002, DEFRIES et al., 1998).

O principal objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados do mapeamento da cobertura da terra para o Estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS.

SENSOR MODIS

O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999, começando a coletar dados em fevereiro de 2000, com o horário de passagem as 10:30 hs da manhã no equador. Dentre os sensores que este satélite transporta, o principal deles, o sensor MODIS, foi projetado para atender os requerimentos de três campos de estudos diferentes: atmosfera, oceano e terra. Este sensor apresenta bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e para oferecer uma cobertura global quase diariamente (JUSTICE, 2002). As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações técnicas do satélite terra/Sensor Modis

As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um dado comprimento de onda, cuidadosamente escolhidos para a observação de feições das

Órbita do satélite Terra	705 Km, síncrona com o Sol, polar; 10:30 a.m descendente
Cobertura de repetição do satélite Terra	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Cobertura dos imageamentos do sensor MODIS	± 55°; 2330 km ("scans" contínuos no nadir no equador)
Resolução espacial do sensor MODIS	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) no nadir
Precisão radiométrica do sensor MODIS	5% Absoluto, <3 µm; 1% Absoluto, >3 µm; 2% de reflectância
Alcance espectral do sensor MODIS	0,4 -14,4 µm
Quantização do sensor MODIS	12 bits
Taxa de Dados do satélite Terra	6,2 Mbps (média), 10,8 Mbps (dia), 2,5 Mbps (noite)
Força do satélite Terra	162,5 W (média para uma órbita), 168,5 W (pico)

Fonte: adaptada de Justice et al. (2002).

propriedades das nuvens, dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo. As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm e 2155 nm, de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético (3660 nm a 14385 nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (JUSTICE et al., 2002).

As bandas desenvolvidas para o monitoramento da superfície terrestre têm uma herança do Landsat/ TM e NOAA/AVHRR, com capacidades melhoradas tanto nos menores comprimentos de onda quanto no infravermelho.

A faixa espectral de cada uma das bandas e suas aplicações para o monitoramento da superfície terrestre podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Bandas espectrais do Sensor Modis para o estudo da superfície terrestre

As bandas do MODIS para o estudo da superfície terrestre (land bands) possuem

Uso preliminar	Bandas	Largura da banda (nm)
Terra/ Nuvens / Limites de aerossóis	1	620-670
	2	841-876
Terra/ Nuvens/ Propriedade de aerossóis	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155

Fonte: Adaptada do website <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html>

resolução espacial de 250 m (para os canais do vermelho e infravermelho próximo) e 500 m (para as bandas do azul, verde e infravermelho médio).

Em relação à resolução temporal, o sensor MODIS possui um intervalo quase diário para a revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas tanto terrestres, quanto oceânicas.

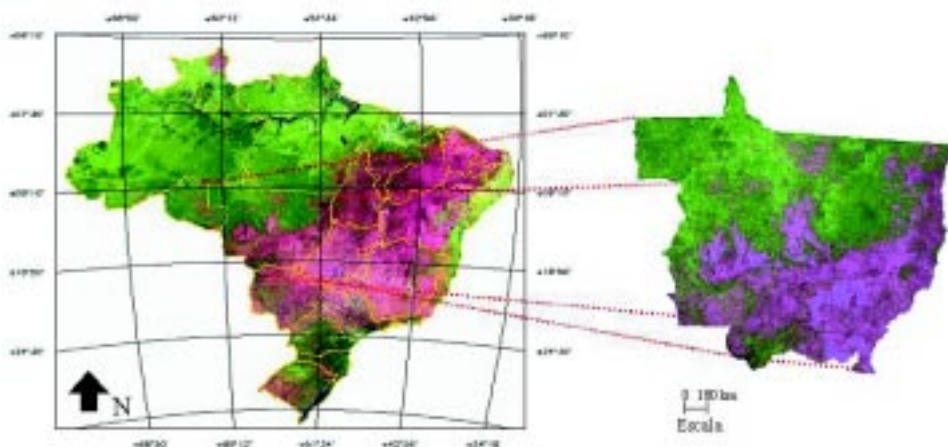
A geolocalização (georreferenciamento) do sensor MODIS foi estabelecida através do uso de uma técnica paramétrica, onde pontos de controle foram aplicados somente para remover as direções tendenciosas. Sua orientação em relação à Terra é obtida através de sensores a bordo do satélite (TELLES et al., 1995). Os produtos de georreferenciamento definem as coordenadas geodésicas, elevação do solo (altitude), e ângulos zenitais solar e azimutal para cada amostra de 1 Km do MODIS. No momento do lançamento, o sensor MODIS apresentava uma precisão de geolocalização de 1.700 metros, e em dezembro de 2000, a acurácia de geolocalização atingiu 50 metros, conforme havia sido planejado pelo projeto.

Informações adicionais podem ser encontradas em Anderson et al. (2003), em que se relata o contexto e os principais objetivos da NASA em promover um projeto de longa duração, iniciando-se com o lançamento do satélite Terra, que transporta, dentre outros, o sensor MODIS.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo proposta para a realização deste trabalho é o Estado do Mato Grosso, localizado na região Centro-oeste do Brasil, entre as coordenadas 06° 00' e 19° 45' de latitude sul e 50° 06' e 62° 45' de longitude oeste, com uma extensão territorial de cerca de 900.000 km² (Figura 1). Esta região apresenta uma grande diversidade de tipos de formações vegetais, além disso, nesta área vem ocorrendo uma alta taxa na conversão da cobertura vegetal, devido à utilização da agricultura mecanizada e pecuária nas áreas de cerrado, bem como o desmatamento e queimadas nas áreas de floresta. Neste contexto, o Mato Grosso mostra-se extremamente interessante para os fins deste estudo.

Figura 1- Localização geográfica da área de estudo



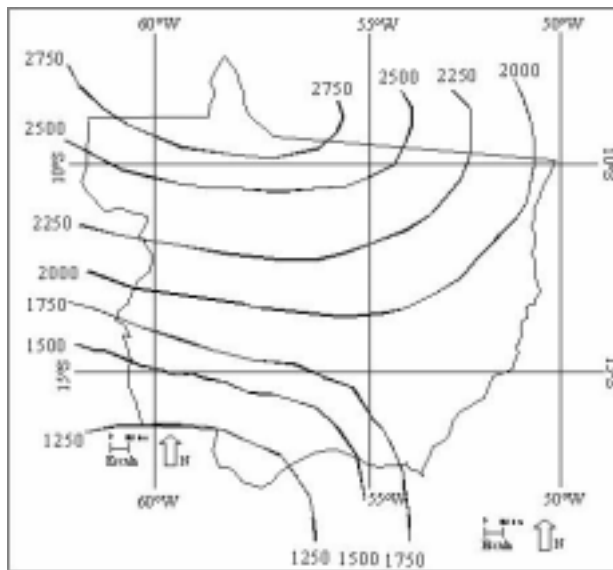
a) Aspectos Fisiográficos

A distribuição e estrutura básicas dos ecossistemas têm uma história onde as variáveis abióticas (clima, pedologia, relevo, disponibilidade de nutrientes, etc.) estão associadas a variáveis bióticas (variabilidade ecológica, competição, predação, simbiose, endemismos, etc.) para produzir um padrão natural de biodiversidade, resultado de um longo processo de coevolução da parte viva e não viva do planeta, onde o clima é a principal variável na distribuição da vegetação.

Decorrentes de uma série de fatores geográficos (posição continental, extensão latitudinal e relevo) e dinâmicos (sistemas de circulação atmosférica), o comportamento da temperatura na região Centro-oeste é muito variado. A continentalidade, impedindo a interferência das influências marítimas, permite que a variação da latitude seja responsável pela temperatura cerca de 26°C no extremo norte e de 22°C no extremo sul da região. O relevo, através da altitude, faz com que as mais altas chapadas sedimentares e superfícies cristalinas do centro-sul da região possuam temperatura média anual entre 22°C e 20°C. Portanto, apesar de suas latitudes predominantemente tropicais, esta região apresenta uma importante variação de temperatura ao longo do espaço geográfico (NIMER, 1977).

Segundo Nimer (1977), as características do regime de chuvas nessa área deve-se quase exclusivamente aos sistemas de circulação atmosférica. Distingue-se um núcleo mais chuvoso ao norte do Mato Grosso, onde a pluviosidade anual atinge valores muito elevados, superiores a 2.700 mm, com estes valores decrescendo para o leste e sul atingindo 1.250 mm (Figura 2). Entretanto, a precipitação não se distribui igualmente ao longo do ano. Mais de 70% do total de chuvas acumuladas durante o ano se precipita de novembro a março, sendo geralmente mais chuvoso o trimestre janeiro-março no norte do Estado, dezembro-fevereiro no centro e novembro-janeiro no sul. Durante esses trimestres chove em média 45 a 55% do total anual. Em contrapartida, o inverno é excessivamente seco.

Figura 2 - Isoietas anuais em mm do Estado do Mato Grosso sobre uma imagem MODIS referente a época chuvosa, composição RGB das bandas 1,2 e 7



O relevo nesta região repousa sobre a porção do escudo brasileiro denominada de Maciço do Brasil Central ou Maciço Mato-Grossense. Este Maciço apresenta-se soerguido para o sul, onde são encontradas suas maiores altitudes: 800-1200 metros na Serra Azul e 500-800 metros na Chapada dos Guimarães. Para o norte, o grande conjunto Pré-cambriano inclina-se em direção da Bacia Amazônica, apresentando altitudes médias de 200-500 metros, quebrados pelos relevos divisórios (500-800 metros) dos rios que correm para o Amazonas (MOREIRA, 1977).

b) Aspectos Vegetacionais

As informações apresentadas neste item foram adaptadas do projeto RADAMBRASIL (1980). A folha SC.21 - Juruena foi selecionada com intuito de fornecer informações sobre a vegetação da região norte do Estado; a folha SD.21 - Cuiabá

foi utilizada para se obter informações dos tipos de vegetação presentes na região central da área de estudo; e a folha SE.21 - Corumbá foi utilizada para a aquisição de dados relativos a vegetação presente na região sul do Estado do Mato Grosso.

- **Formação Arbórea Densa (Cerradão):** as árvores geralmente apresentam pouco mais de 5 metros de altura, densamente dispostas, cujas copas não se tocam, sem um nítido estrato arbustivo e com um tapete graminoso ralo, em tufos, podendo ocorrer palmeiras anãs intercaladas e plantas lenhosas rasteiras. Estas áreas quase sempre encontram-se intercaladas com os agrupamentos da formação de fisionomia Arbóreo Aberta.
- **Formação Arbórea Aberta (Campo Cerrado):** as árvores apresentam-se esparsadas, com uma altura variando de 2 a 5 metros, esgalhadas e bastante tortuosas, dispersas sobre um tapete contínuo de hemicriptófitas (gramíneas, principais produtoras primárias com alta rebrota após a queima), intercaladas de plantas arbustivas baixas e outras lenhosas rasteiras, geralmente provida de xilopódios.
- **Formação Gramíneo-Lenhosa (Campo Limpo):** Essa formação caracteriza-se por um tapete graminoso e ralo em mistura com arbustos eretos e decumbentes, sendo comum à ocorrência de palmeiras anãs.
- **Floresta Ombrófila Densa Tropical:** ocorre sempre em locais com características bioclimáticas de curto período seco (de 0 a 2 meses) e temperatura acima de 25° C. Sua área de ocupação é diminuída em grandes proporções a medida que avança para o sul. Esta região é constituída de árvores com alturas entre 20 e 30 metros, troncos retos e bem copados que representam os estratos dominantes e co-dominantes. Apresentam um grande número de espécies, muitas de excelente propriedade e de ótima potencialidade de madeira por unidade de área.
- **Floresta Estacional Decidual Tropical:** compreende uma vegetação sobre solos deficientes de areia quartzosas, localizado entre o contato da Floresta Estacional com uma vegetação de aspecto fisionômico de savana. É caracterizada pela formação Submontana com dossel emergente, em que em épocas desfavoráveis, mais de 60% perdem suas folhas e há um grande número de epífitas. Possui um grande número de plantas graminóides e espécies decíduas, cerca de 50 a 60 por hectare, sobre uma espessa camada de material orgânico não decomposto. A fisionomia de emergentes decíduas é de uma certa homogeneidade de determinadas espécies.
- **Formações Pioneiras:** são aquelas que ocorrem ao longo dos cursos dos rios e ao redor de depressões fechadas que acumulam água, onde se observam vegetações campestres herbáceas lenhosas de terófitas, geófitas, e às vezes, hemicriptófitas, que podem passar por um processo de sucessão natural. Estas formações ocupam áreas pedologicamente instáveis, com sedimentos pouco consolidados, sob o processo de acumulação fluvial ou lacustre.
- **Formação Savana Estépica ou Savana Parque:** ocorre geralmente em relevo plano, com altitudes que não ultrapassam 200 metros do nível do mar, com exceção dos testemunhos com bases calcáreas que se distinguem em meio aos terrenos alagáveis, onde se fixam as formações vegetais densas. A vegetação dominante é a graminóide, seguida de esparsos agrupamentos de vegetação densa, sob um regime de longo período de enchimento do solo.

c) Mudanças na cobertura da terra

O Mato Grosso vem ganhando espaço no cenário nacional econômico e político, devido a um grande aumento na produção agropecuária, e relacionado a questões de conservação do ambiente. Serão analisados a seguir os principais fatores que têm contribuído para a mudança no uso e na cobertura da terra para esta região: a agropecuária, as queimadas e o desmatamento.

Hoje, os resultados da ocupação no Estado do Mato Grosso representam um grande impacto no seu meio ambiente original. Este processo gerou uma paisagem modificada, na qual destacam-se manchas de áreas agrícolas e de pastagens, distribuídas em lotes de 50 a 1000 ha, que se dispõem ao redor das grandes propriedades de companhias agropecuárias, e em meio a áreas de remanescentes florestais (SOARES FILHO, 2001).

Souza et al. (1998) realizaram um estudo na região da Chapada dos Parecis, chegando a conclusão de que as reservas indígenas estudadas sofreram diferentes tipos de pressão por parte do entorno agrícola: primeiramente, as fronteiras de reservas indígenas próximas as de agricultura ostensiva em grandes propriedades não sofreram invasão, e segundo, as fronteiras de reservas indígenas estabelecidas nas vizinhanças de propriedades pequenas ocorreram efetivamente invasões. Segundo estes autores, os vetores desta pressão e mesmo da invasão são as estradas.

Assunção (1987), Derenne et al. (2001) e Anderson et al. (2003) realizaram estudos na região de cerrados do Estado do Mato Grosso, chegando a resultados que apontam um incremento das áreas plantadas para culturas agrícolas, principalmente de soja e milho.

MATERIAIS

Os materiais utilizados nesse trabalho são descritos a seguir:

- a) dados MODIS: são disponibilizados na forma de produtos. Para esta pesquisa utilizou-se o produto MOD13, constando de 144 mosaicos quinzenais MODIS para o ano de 2002, com resolução espacial de 250 metros. Os produtos MODIS são disponibilizados segundo um sistema de referenciamento realizado em relação a uma grade determinada pelos planos horizontal e vertical, também denominado "Tile". Desta forma, são necessárias 6 cenas para compor 1 mosaico do Estado do Mato Grosso. Essas cenas são listadas a seguir:

- H 11 V 9; H 11 V 10; H 12 V 9; H 12 V 10; H 13 V 9 e H 13 V 10.

O produto MOD13 se refere às imagens índices de vegetação (NDVI e EVI), incluindo as bandas utilizadas para a geração destes índices: azul, vermelho, infravermelho próximo, além de uma banda localizada na faixa do infravermelho médio (banda 7). Este produto apresenta estas imagens geradas automaticamente e disponibilizadas na forma de mosaicos quinzenais, mensais e anuais.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é uma relação entre medidas espectrais (reflectância - r) de duas bandas localizadas na faixa do infravermelho próximo (700-1300 nm) e na do vermelho (600-700 nm), e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1, utilizando-se a equação:

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

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa e o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel, reduzindo assim as influências atmosféricas. O EVI é calculado através da seguinte equação:

$$\text{EVI} = G (\tau\text{IVP} - \tau\text{V}) / (L + \tau\text{IVP} + C1 \tau\text{V} - C2 \tau\text{A})$$

Onde:

τA = reflectância na banda do azul;

τV = reflectância na banda do vermelho;

τIVP = reflectância na banda do infravermelho próximo;

L = fator de ajuste para os componentes abaixo do dossel (canopy background);

C1 e C2 = coeficientes para ajuste das resistências dos efeitos dos aerossóis da atmosfera; e G = fator de ganho.

Estes coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são: L=1, C1=6, C2=7,5 e G = 2,5 (Huete et al., 1994).

- b) Mapa de vegetação na forma digital fornecido pela PRODEAGRO/ FEMA.
- c) Dados de verdade terrestre: pontos coletados com Global Position System (GPS) e fotografias adquiridas durante o trabalho de campo para validação do resultado final.
- d) Dados do projeto PRODES digital.

METODOLOGIA

O banco de dados geográficos do Estado do Mato Grosso foi elaborado de forma a armazenar os dados relevantes para a realização do trabalho proposto nesta pesquisa. Para isso, foi utilizado o aplicativo SPRING 3.6.03 (CÂMARA et al., 1996).

O banco de dados foi definido com os seguintes parâmetros técnicos:

- Sistema de projeção cartográfica: Foi selecionada a projeção Lambert por se tratar de uma área de estudo bastante extensa, com o intuito de evitar distorções nas imagens;
- Datum: WGS84;
- Retângulo envolvente da área de estudo: Longitude Oeste 64° 00' 00'' e 48° 00' 00'', Latitude Sul: 19° 00' 00'' e 6° 00' 00'';
- Origem: Latitude Norte 00° 00' e Longitude Oeste 53° 15' ; primeira latitude: Sul 3° 20', segunda latitude: Sul 16° 40'.

Após a aquisição de todas as imagens MODIS referentes ao ano de 2002, foram gerados mosaicos mensais, através da ferramenta de análise LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) disponível no SPRING. O programa foi escrito de forma a selecionar os pixels, com base no valor mais alto do NDVI entre as datas, para a eliminação de nuvens. Esta etapa teve como objetivo reduzir o número de dados utilizados e tamanho do banco, com a finalidade de agilizar o tempo de processamento.

A partir dos mosaicos mensais, foi aplicado o modelo de mistura espectral para toda a série temporal, nas bandas do produto MOD13: azul, vermelho, infravermelho

próximo e infravermelho médio. Os modelos foram gerados independentemente, e partiu-se da hipótese que é possível encontrar um pixel puro ou *endmember* nas imagens MODIS, dada a diversidade e características da área estudada, para ser utilizado como dado de entrada para o modelo.

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes, tais como solo, sombra e vegetação, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas, gerando imagens fração solo, vegetação e sombra (SHIMABUKURO; SMITH, 1991). O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a \cdot \text{veg}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{sombra}_i + e_i$$

Onde r_i é a resposta do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; veg_i , solo_i e sombra_i são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e_i é o erro na banda i e i indica a banda a ser utilizada (SHIMABUKURO et al., 1997).

Com o objetivo de selecionar as datas das imagens que seriam utilizadas para a classificação das formações vegetais no Estado do Mato Grosso, os mosaicos NDVI e EVI da série temporal para o ano de 2002 foram processadas no software PCI (ESA, 1994), em duas etapas:

- 1) Gerar as assinaturas dos alvos para os dois índices de vegetação: com base no mapa de vegetação para o Estado do Mato Grosso fornecido pela FEMA/PRODEAGRO, selecionou-se cerca de 25 amostras para cada um dos tipos de formações vegetais em composições coloridas de imagem NDVI e EVI sobre áreas homogêneas.
- 2) Gerar a seleção de canais para a classificação: a partir das assinaturas geradas, foi utilizado o módulo de seleção de canais para a classificação das imagens. Este módulo analisa a média e desvio padrão para cada um dos canais e gera a matriz de correlação, matriz de covariância, matriz de covariância inversa e matriz de covariância inversa triangular. O resultado final é disponibilizado conforme o número de canais que o usuário pretende utilizar para realizar a classificação. Os resultados obtidos para as imagens NDVI e EVI são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Seleção das melhores datas para realizar a classificação, segundo o número de imagens definidas a serem utilizadas, a partir dos dados NdvI e Evi. em vermelho destacam-se as datas diferentes para os dois dados

Número de imagens utilizadas	Meses selecionados	
	NDVI	EVI
1	8	8
2	8,9*	7*,8
3	7,8,9	7,8,9
4	7,8,9,11*	4*,7,8,9
5	6-9,11*	4*,6-9
6	4,6-9,11	4,6-9,11
7	4-9,11	4,6-11
8	4-11	2*,4,6-11
9	3-11	2*,4,5-11
10	3*-12	1*,2*,4-11
11	1,3-12	1,2*-12

* Indica meses diferentes entre os dois índices.

Nesta pesquisa optou-se pela utilização de 4 datas no processo de classificação, principalmente devido à limitações computacionais. Com o objetivo de definir entre a utilização do NDVI ou EVI para o processo de classificação, aplicou-se o teste estatístico Tukey. Para isso assumiu-se que a distribuição das amostras é normal e a variância entre elas é homogênea. A partir dos resultados desta comparação múltipla, obtidos para o NDVI e EVI, verificou-se que o NDVI possibilitou a separação entre um maior número de formações vegetais.

Os processos de segmentação e extração de regiões são propostos para a fase anterior à classificação. Para realizar a segmentação são definidos dois limiares: (a) limiar de similaridade e (b) limiar de área. Os limiares utilizados neste processo foram 15 para similaridade e 10 para área. A opção por estes limiares foi definida segundo a limitação computacional, dado o número de imagens utilizadas e o tamanho da área de estudo.

As imagens NDVI dos meses de julho, agosto, setembro e novembro foram utilizadas como dados de entrada na etapa de segmentação. Para a fase de extração de regiões, além das imagens NDVI, foram utilizadas também as imagens fração solo, sombra e vegetação, referentes aos quatro meses selecionados. Desta forma garantiu-se que as informações presentes em todas as bandas espectrais fossem levadas em consideração para a delimitação estatística das regiões com diferentes coberturas da terra: nas imagens NDVI as respostas das bandas do vermelho e infravermelho próximo; e nas imagens fração as respostas das bandas azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio.

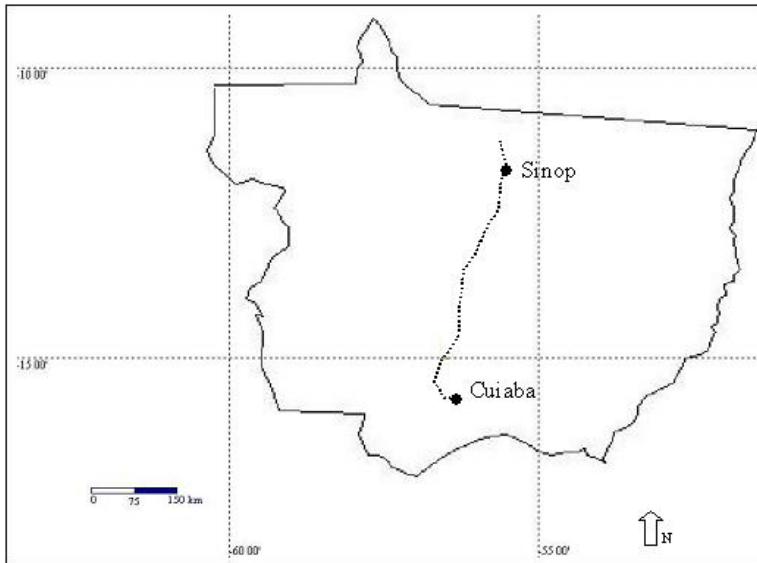
Para o processo de classificação não supervisionada das imagens, foram geradas 13 imagens classificadas, a partir de classificadores não supervisionados (Isoseg, Histograma e K-média) com diferentes limiares, disponíveis na versão 4.1Beta do SPRING.

Para a geração do mapa de vegetação foi realizada a avaliação das classes de vegetação em cada uma das imagens classificadas. Esta avaliação foi baseada em dois tipos de dados distintos: em dois mosaicos gerados para a estação seca e estação chuvosa (mês de março e mês de agosto), e no mapa de vegetação disponibilizado pela FEMA/PRODEAGRO. As melhores classificações geradas para cada uma das classes foram mapeadas independentemente, e mosaicadas para diferentes planos de informação. A etapa seguinte foi a edição destas classes para garantir uma melhor qualidade e eliminar erros dos classificadores.

Após a edição de todas as classes temáticas, foi realizado um mosaico com todos os temas classificados para um mesmo plano de informação, constituindo-se assim o mapa da cobertura da terra para o Estado do Mato Grosso.

Para a validação do mapa final da cobertura da terra, realizou-se um trabalho de campo nos meses de junho/julho de 2003, onde foram coletados pontos de GPS para a caracterização de algumas fisionomias vegetais e de uso da terra. A região do Estado do Mato Grosso visitada pode ser observada na figura 3.

Figura 3 - Localização dos pontos visitados, coletados com GPS durante o trabalho de campo, em junho/julho de 2003



RESULTADOS E DISCUSSÃO

No processo de classificação notou-se que não houve uma grande diferença entre as imagens classificadas a partir das imagens fração e NDVI para 4 datas, utilização apenas das imagens fração das 4 datas selecionadas, utilização das imagens fração do mês de agosto e imagem NDVI do mês de agosto. Em todas as classificações testadas, observou-se que existe uma distinção clara entre pelo menos duas classes (a floresta e as formações de cerrado), que portanto são possíveis de se mapear. O resultado final do processo de classificação e mapeamento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso pode ser observado na Figura 4.

As estimativas de área dos temas classificados no mapa gerado foram:

Lagos Permanentes: 2.700 km²; Formações Pioneiras: 4.000 km²; Área inundada na época de chuva: 16.200 km²; Contato entre Floresta Ombrófila Aberta e Savanas: 30.000 km²; Soja: 41.198 km²; Savana Parque: 42.400 km²; Savana Arbóreo Aberta: 114.200 km²; Áreas antropizadas: 135.000 km²; Savana Gramíneo-lenhosa: 152.400 km²; Floresta Ombrófila Aberta: 354.700 km².

Para analisar de uma maneira mais clara a contribuição de cada classe detectada para a área total do Estado do Mato Grosso, organizou-se os dados da seguinte forma (Figura 5):

Figura 4 - Mapa da cobertura da terra do Estado do Mato Grosso

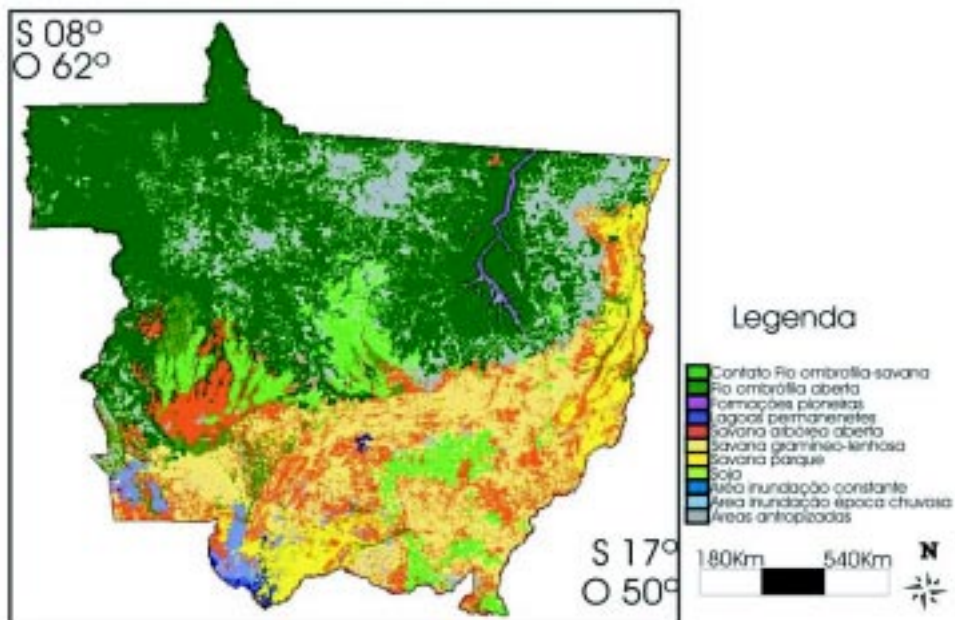
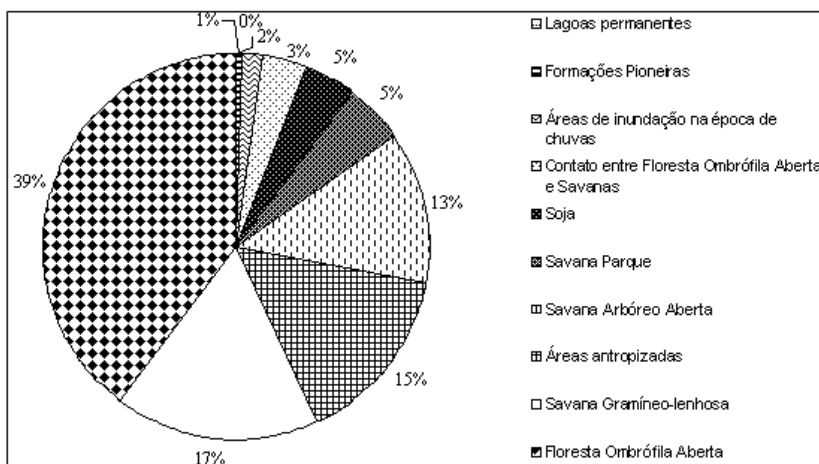


Figura 5 - Porcentagem da contribuição de cada uma das classes mapeadas para a cobertura da terra do Estado do Mato Grosso



Na Figura 5 observa-se que a formação de Floresta Ombrófila Aberta ocupa 39% da cobertura vegetal da área de estudo, enquanto que a formação de Savana Gramíneo-lenhosa, a segunda formação com maior representatividade no Estado, ocupa uma área de 17%, seguida das áreas antropizadas, que ocupa 15% da cobertura do solo. A estimativa das áreas antropizadas não contabilizou as áreas de soja plantadas, pois foi possível separar no processo de classificação estes dois tipos de uso da terra, no entanto, se juntarmos as áreas de soja com as áreas antropizadas, temos uma área total de conversão da cobertura da terra pelo homem de 20% da área total do Estado.

As classes localizadas na região sul do Estado foram divididas entre áreas de Savana Parque (áreas que podem sofrer o processo de alagamento na época das chuvas), áreas permanentemente alagadas e áreas alagadas no período das cheias. As áreas que permanecem alagadas na época das chuvas possuem o tipo de formação vegetal de Savana Parque, e assim, pode-se contabilizar então uma área de 7% do Estado ocupado por esta formação vegetal.

Para a análise da proporção de cultura de soja em áreas de savana e em áreas de floresta, utilizou-se como limite entre as duas formações a máscara de não-floresta do PRODES. A porcentagem mostra que 88% da área plantada de soja está sobre a região de formações de cerrado, e 12% da área plantada está sobre as áreas de florestas convertidas.

Do total de áreas antropizadas, que foram mapeadas em 16% da área total do Estado, não foi possível estabelecer com exatidão o quanto destas áreas foram alteradas em áreas de cerrados e florestas, pois uma grande parte desta ocupação está sobre a região de contato entre os dois tipos de vegetação, e não existe um limite claro entre eles.

CONCLUSÕES

A análise da assinatura espectral das amostras adquiridas nas imagens NDVI, de janeiro a dezembro, com o objetivo de selecionar as melhores datas para garantir a classificação do maior número de classes mostrou-se fundamental para atingir o resultado. Aliado a isso, a etapa de segmentação de imagens, que se utilizou apenas 4 imagens NDVI selecionadas, e a etapa de extração de regiões, em que se utilizou todas as imagens mensais do NDVI e das imagens fração, mostraram-se essenciais para o mapeamento das classes.

Com base na metodologia utilizada no processo anterior à classificação, o número de imagens usadas para a aplicação dos algoritmos de classificação não mostrou ser um fator crucial para se atingir o resultado esperado.

O processo de mosaicagem das classes selecionadas, a partir dos resultados obtidos por diferentes classificadores, permitiu a verificação e edição destas classes separadamente para a geração do mapa final de cobertura da terra.

O resultado final da classificação da cobertura da terra para o ano de 2002 foi considerado satisfatório, pois permitiu o mapeamento de um maior número de classes que os mapas já gerados com sensores de baixa resolução espacial, temporal e espectral.

As resoluções espacial e espectral mostraram-se adequadas para a realização desta etapa do trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado do primeiro autor. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto (Proc. 2003/01727-0).

REFERÊNCIAS

ANDERSON, L.O.; LATORRE, M.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ARAI, E.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: uma abordagem geral. **Publicação técnica**. INPE-10131-RPQ/752. São José dos Campos, 2003.

ASSUNÇÃO, G.V. **Avaliação do incremento de áreas preparadas para plantio no Estado do Mato Grosso entre os anos 84/85 e 85/86 utilizando dados Landsat**. São José dos Campos: INPE, Nov. 1987. 29 p. (INPE-92591).

CÂMARA, G; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n.3, p. 395-403, 1996.

DEFRIES, R.S; HANSEN, M.; TOWNSHEND, J.R.G.; SOHLBERG, R. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, no. 16, p.3141- 3168, 1998.

DEFRIES, R.S.; HOUGHTON, R.A.; HANSEN, M.C.; FIELD, C.B.; SKOLE, D. **Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America [online]. v. 99, n. 22, p. 14256-14261, Out. 2002. <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.182560099>. Visitado em 7 dezembro 2002.

DERENNE, M.; SETZER, A.; FRANÇA, H. O cinturão de soja e milho em Mato Grosso nos mosaicos IVDN/AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 41-49.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Using PCI Software** (PCI). Ontário, Canadá: Dez. 1994. 478 p.

FRIEDL, M.A.; MCIVER, D.K.; HODGES, J.C.F.; ZHANG, X.Y.; MUCHONEY, D.; STRAHLER, A.H.; WOODCOCK, C.E.; GOPAL, S.; SCHNEIDER, A.; COOPER, A.; BACCINI, A.; GAO, F.; SCHAAF, C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 287-302, 2002.

HANSEN, M.C.; DEFRIES, R.S.; TOWNSHED, J.R.G.; MARUFU, L.; SOHLBERG, R. Development of MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 320-335, 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 224-234, 1994.

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

LAMBIN, E.F. Modeling and monitoring land-cover changes processes in tropical regions. **Progress in Physical Geography**, v. 2, n. 3, p. 375-393, 1997.

MOREIRA, A.A.N. Relevô. In IBGE. **Geografia do Brasil. Região Centro-Oeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 364 p.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. **Geografia do Brasil. Região Centro-Oeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 364 p.

RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SC. 21 - Juruena. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1980. 456 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.20).

SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991

SHIMABUKURO, Y.E.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; DUARTE, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1997. 16 p. (INPE-6147-PUD/029).

SOARES FILHO, B.S. Fragmentação da paisagem florestal em função da estrutura e dinâmica fundiária no norte do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 987-995.

SOUZA, I.M.; MARTINI, P.R.; DUARTE, V.; MOREIRA, M.A.; AULICINO, L.C.N.; RODRIGUEZ YI, J.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; RUDORFF, B.F.T. Parques indígenas e fronteiras agrícolas na Chapada dos Parecis (MT): uma análise temporal por imagens TM-LANDSAT. [CD-ROM] In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9, 1998. **Anais...** Santos, SP: INPE, 1998.

TELLES, J.; SAMII, M.V.; DOLL, C.E. Overview of TDRSS. **Advances in Space Research**, v. 16, p. 1267-1276, 1995.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R.A.; TOWNSHEND, J.R.G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M.L.; EASTMAN, J.C.; HANSEN, M.C.; DEFRIES, R.S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 336-350, 2002.

Recebido em setembro de 2004

Aceito em novembro de 2004