

Classificação Espectral de Fitofisionomias em Área de Floresta Tropical Utilizando Dados do Sensor Aster

Spectral Classification of Phytophysionomies in Tropical Forest Area Using Aster Data Sensor

Gustavo Manzon Nunes^a; Carlos Roberto de Souza Filho^b; Laerte Guimarães Ferreira^c; Luiz Eduardo Vicente^d; Maricécia Tatiana Vilani^e

^aUniversidade Federal do Mato Grosso, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Florestais e Ambientais. MT, Brasil.

^bUniversidade Estadual de Campinas, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Geociências. SP, Brasil.

^cUniversidade Federal de Goiás. GO, Brasil.

^dEmpresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. SP, Brasil.

^eUniversidade de Cuiabá, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais. MT, Brasil.

*E-mail: gustavomn@gmail.com

Resumo

Este artigo pretende avaliar a capacidade dos dados gerados pelo sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER)/Terra, na discriminação de fitofisionomias existentes na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã (RDSA). Os dados ASTER analisados incluem os intervalos espectrais do visível (0.52-0.69 μm), infravermelho próximo (0.78-0.86 μm) e infravermelho de ondas curtas (1.60 a 2.43 μm), sendo que nas bandas destes intervalos foram aplicadas técnicas de classificação espectral adaptadas para os dados deste sensor como *Spectral Angle Mapper* (SAM), *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), além do NDVI. Através da técnica SAM foi possível a discriminação de seis fitofisionomias predominantes na RDSA. Através da técnica MTMF, que envolve um algoritmo de classificação mais robusto, informações equivalentes foram obtidas. Foi possível ainda a associação e detecção dos padrões espectrais da cobertura vegetal, mostrando a estreita relação com o índice NDVI.

Palavras-chave: Mapeamento. Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã. Vegetação.

Abstract

This article aims to evaluate the data capacity created by a sensor named Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)/Terra, in the phytophysionomies description of Amanã Sustainable Development Reserve (RDSA). The ASTER data analyzed include the spectral intervals of visible (0.52-0.69 μm), near-infrared (0.78-0.86 μm) and shortwave infrared (1.60 to 2.43 μm), wherein these intervals bands were applied the spectral classification techniques adapted to the data from this sensor as Spectral Angle Mapper (SAM), Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) plus NDVI. By SAM technique was possible to distinguish six predominant phytophysionomies in the RDSA. By MTMF technique that involves a more robust classification algorithm, equivalent information was obtained. It was also possible to associate and detect spectral patterns of vegetation, showing the close relationship with the NDVI index.

Keywords: Amanã Sustainable Development Reserve. Mapping. Vegetation.

1 Introdução

Se por um lado, áreas extensas oferecem a vantagem de permitir a conservação de grandes unidades de paisagem, incentivando uma abordagem regional da conservação da biodiversidade, por outro, o manejo e monitoramento de grandes áreas protegidas é mais oneroso, além de trazer desafios operacionais mais difíceis de serem superados. Assim, instrumentos e técnicas que auxiliem no acompanhamento e ordenamento do manejo, seja ele dos recursos naturais e componentes da biodiversidade, seja o próprio manejo da unidade de conservação, são necessários, de modo que o mapeamento em áreas pequenas seja replicado em escalas mais amplas, com a mesma acuidade e precisão.

Especificamente, técnicas de processamento digital aplicadas aos dados provenientes de sensores remotos são ferramentas ideais para organizar informações, planejar ações futuras e criar cenários distintos para análise dos diferentes aspectos da conservação.

Em relação à discriminação de classes de uso da terra, os

resultados dependem das características do sensor (resoluções espacial, espectral, temporal e radiométrica), das técnicas utilizadas durante o processamento da imagem (erro no georreferenciamento, método de classificação, tamanho e heterogeneidade das áreas de treinamento) e da resposta espectral dos alvos (CAMPBELL, 1996; FOODY, 2002; SMITH *et al.*, 2003).

Segundo Carvalho *et al.* (2003), o sinal de reflectância da vegetação obtido por sensores remotos é resultado de uma complexa interação entre fatores bioquímicos e biofísicos do dossel, além de sua organização na paisagem. Esses dados de reflectância podem ser utilizados para explorar propriedades ecológicas, o que normalmente requer o uso de modelos, os quais, por sua vez, são afetados pelas grandes variações na cobertura vegetal (e.g. diversidade de espécies, fenologia, etc.).

Os problemas encontrados na discriminação das classes de vegetação que formam um gradiente contínuo, em particular em paisagens altamente heterogêneas, como as da

Amazônia, também se devem, em grande parte, às limitações das já citadas resoluções dos sensores. Lacruz e Santos (1997) reportam, para ambientes de matas ripárias, problemas devido à sua forma estreita, que dificulta a obtenção de áreas de treinamento representativas.

Assim, na medida em que a acuidade decresce com o aumento da heterogeneidade e da fragmentação, é necessário o uso de sensores com maiores resoluções (SMITH *et al.*, 2003, POWELL *et al.*, 2004). Uma opção neste sentido é o sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), cuja maior resolução espacial, espectral e radiométrica, comparativamente ao sensor ETM+ ou CBERS CCD, por exemplo, favorece uma discriminação mais precisa e detalhada das distintas fitofisionomias que compõem o dossel vegetal.

O sensor multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* - ASTER é parte do programa *Earth Observing System* - EOS-NASA, e está a bordo do satélite TERRA, lançado em dezembro de 1999. Este sensor possui três sistemas independentes, que coletam dados em 14 bandas espectrais: 3 bandas nas faixas do visível (VIS - *visible*) ao infravermelho próximo (NIR - *near infrared*) com resolução espacial de 15m, 6 bandas no infravermelho de ondas curtas (SWIR - *shortwave infrared*) na resolução de 30m e 5 bandas na região do infravermelho termal (TIR - *thermal infrared*) com resolução de 90m (ABRAMS, 2000).

O sensor ASTER, em relação à resolução espectral, situa-se entre o sensoriamento remoto multiespectral de baixa resolução (e.g., Landsat TM e ETM+) e o hiperespectral, também denominado de espectroscopia de imageamento. Esse último compreende a aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais registradas e contíguas, de forma a possibilitar, pixel a pixel, a obtenção de curvas de reflectância em toda a faixa do espectro refletido (SOUZA FILHO, 2004).

Ainda que as técnicas utilizadas no processamento de imagens hiperespectrais possuam diferenças com relação às técnicas aplicadas aos dados multiespectrais, notadamente quanto ao seu caráter eminentemente quantitativo (RUBIN, 1991), estas também mostram resultados satisfatórios quando aplicadas às imagens ASTER (KRUSE *et al.*, 2002; SOUZA FILHO *et al.*, 2003; VICENTE; SOUZA FILHO; PEREZ FILHO, 2007; NUNES; SOUZA FILHO; FERREIRA, 2007).

Dados obtidos com sensores hiperespectrais, como, por exemplo, o *AVIRIS/JPL* (224 bandas, aeroportado) e o *Hyperion/NASA GSFC* (220 bandas, orbital), requerem tipos de processamento específicos, visto a grande dimensão espectral dos dados e a possibilidade de extração de assinaturas espectrais de detalhe a partir dos mesmos. Esse processamento envolve uma abordagem por análise espectral ou quantitativa (discriminação e quantificação dos elementos componentes do alvo), na qual o pixel torna-se um elemento isolado, expresso nas suas características espectrais, através da medida direta de suas propriedades de interação energia-matéria.

O processo de classificação espectral explora o fato de que muitos materiais apresentam bandas de absorção que são diagnósticas de sua presença na imagem. Assim, quanto melhor for a resolução espectral disponível no sensor, mais facilmente a cobertura vegetal, bem como outros tipos de cobertura da terra, poderá ser caracterizada.

Métodos de classificação espectral são aplicados mediante o conhecimento prévio dos alvos. Ou seja, são supervisionados e baseados na amostragem e análise de assinaturas espectrais. Tais assinaturas podem ser obtidas tanto pela coleta de pixels de referência (*endmembers*) diretamente da imagem, com o auxílio de alvos de controle, ou através de bibliotecas espectrais obtidas em condições de campo ou laboratório. A comparação entre medidas de sensores remotos imageadores e aquelas obtidas em laboratório é válida uma vez que a interação física básica e as propriedades espectrais obtidas em ambos os instrumentos se equivalem (MUSTARD; SUNSHINE, 1999). Nestes casos deve-se considerar condições de imageamento *in situ* como: influência atmosférica, sombras topográficas, ângulo de visada do sensor (IFOV), as quais devem ser compensadas por modelos matemáticos.

Essa abordagem tem proporcionado bons resultados não apenas em sua aplicação à dados gerados por sensores hiperespectrais, mas também na sua versão adaptada à dados obtidos por sensores multiespectrais, particularmente o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (SOUZA FILHO *et al.* 2003; GALVÃO; ALMEIDA FILHO; ICARO, 2005, DUCART; CRÓSTA; SOUZA FILHO, 2005; NUNES; SOUZA FILHO; FERREIRA, 2007).

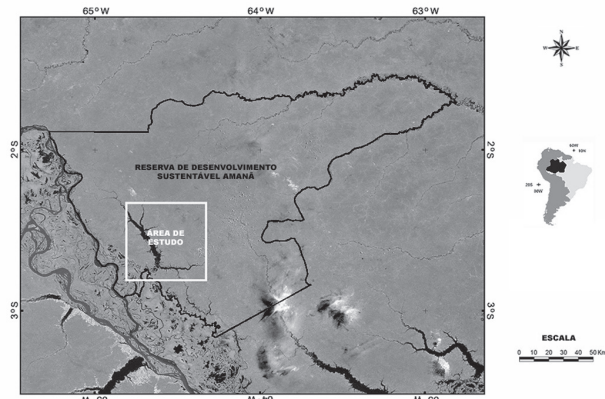
Desta forma, o objetivo deste trabalho foi realizar a discriminação e caracterização da cobertura vegetal na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã - RDSA. Para isso foram utilizadas as técnicas de classificação espectral SAM e MTMF, aplicadas às imagens do sensor ASTER, juntamente com a utilização dos parâmetros fenológicos extraídos do Índice de Vegetação NDVI, como suporte a análise.

2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A RDSA (Reserva de Desenvolvimento Sustentável Amanã) é uma unidade criada através do Decreto Estadual 19.021, de 4 de agosto de 1998, pelo Estado do Amazonas e administrada pelo IPAAM, cuja implementação está sendo realizada pela Sociedade Civil Mamirauá. A reserva compreende uma área de 23.500 km² da região Central do Estado do Amazonas (municípios de Barcelos, Coari, Codajás e Maraã) e está localizada entre as águas escuras do Rio Negro e as águas brancas dos rios Japurá e Solimões. Seus limites geográficos são: 01°35'43" S e 03°16'13" S e 62°44'10" W e 65°23'36" W. (Figura 1)

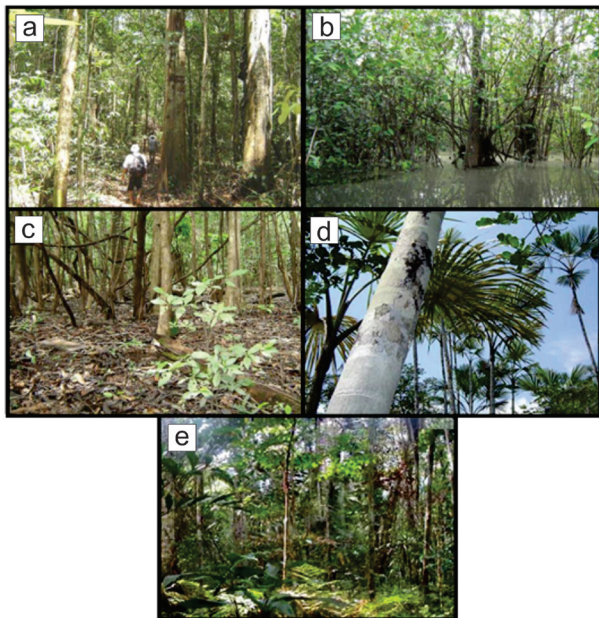
Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Os autores.

A área selecionada para esse estudo compreende parte da RDSA e é delimitada pelas coordenadas 02°18'42" S e 02°47'14" S e 64°18'55" W e 64°46'10" W. Nesta área, são encontradas as seguintes fitofisionomias: Floresta de Terra Firme, Floresta Aberta com Palmeiras, Campinarana, Floresta de Igapó e Floresta de Várzea (Figura 2).

Figura 2 - Registros das 5 fitofisionomias existentes na área: a) Floresta de Terra Firme, b) Floresta de Igapó, c) Floresta de Várzea, d) Floresta Aberta com Palmeiras e e) Campinarana



Fonte: Os autores.

2.2 Etapas de processamento de imagens

A imagem utilizada nesse estudo foi gerada pelo sensor ASTER em 20/02/2003 e adquirida no Nível 1B de processamento (Abrams, *et al.* 2002), ou seja, com correções geométricas e radiométricas aplicadas. Nesse nível de processamento, os dados são fornecidos com o datum padrão WGS-84 e no sistema de projeção UTM.

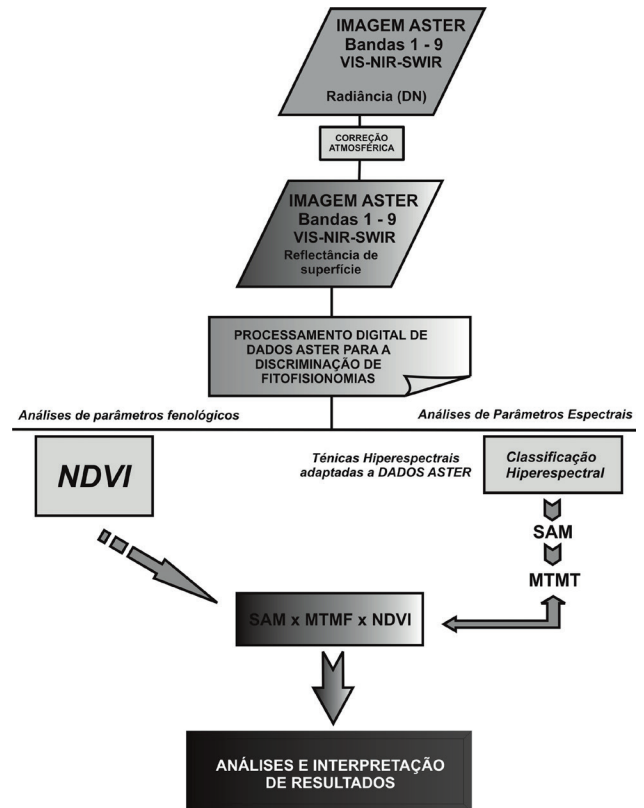
Foram utilizadas as bandas 1 a 9 do Sensor ASTER, compreendendo os intervalos espectrais do visível (0.52-0.69 μm), infravermelho próximo (0.78-0.86 μm) e infravermelho

de ondas curtas (1.60 a 2.43 μm), onde aplicou-se as técnicas de classificação espectral adaptadas para os dados deste sensor (*Spectral Angle Mapper* (SAM) e *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF)) e o Índice de Vegetação NDVI.

A coleta e interpretação dos *endmembers* na imagem foram baseadas em informações obtidas nas campanhas de campo, quando foi possível conhecer e georeferenciar sítios de ocorrência das fitofisionomias mais representativas da área de estudo. Ademais, foram utilizados na locação desses *endmembers*: (i) Cartas Imagem de Radar – Projeto RADAMBRASIL – Escalas 1:1.000.000 / 1:250.000 (1984), (ii) Cartas da Cobertura Vegetal do Bioma Amazônico / PROBIO, – Escala 1:250.000 (2006), (iii) Base cartográfica integrada digital do Brasil ao milionésimo do IBGE, – Escala 1:1.000.000 (2004), (iv) Base cartográfica do SIPAM - Escala 1:250.000 (2004).

As etapas de que compreendem aos processamentos digitais da imagem ASTER, além das análises que foram realizadas, podem ser visualizadas resumidamente na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma apresentando as etapas de processamento e análises em dados do sensor ASTER



Fonte: Os autores.

2.3 Correção atmosférica e geométrica

Na primeira etapa de processamento foi realizada a correção atmosférica com os dados da cena original ASTER (L1B), que foram convertidos para reflectância a partir de procedimentos de correção atmosférica, com a utilização do modelo de transferência radiativa *Moderate Resolution*

Atmospheric Radiance and Transmittance Model (MODTRAN), tendo por base parâmetros regionais. As seguintes condições de imageamento foram consideradas no modelo utilizado: (i) elevação média da região de estudo, (ii) altitude da plataforma, (iii) data da passagem, (iv) níveis de aerossóis (visibilidade), (v) coordenadas da área, (vi) quantidade de vapor d'água na atmosfera e (vii) modelo atmosférico (tropical) (ACORN, 2002). Previamente à correção atmosférica, as bandas SWIR do ASTER foram submetidas à correção do efeito *crossstalk* utilizando o *crossstalk correction software* (ERSDAC, 2003). O efeito *crossstalk* ocorre devido a dispersão da luz incidente na banda ASTER 4, a qual é transportada para o plano focal de outras bandas do SWIR, causando o aparecimento de “fantasmas” na interface entre superfícies de terra e água (Iwasaki e Tonooka, 2005).

Posteriormente foi realizada a reamostragem espacial de pixels, dada a diferença de resolução espacial entre as bandas do VIS-NIR (15m) e do SWIR (30m), e visando o aproveitamento de ambos os conjuntos de bandas, foi realizada uma reamostragem das bandas do SWIR, aumentando artificialmente sua resolução para 15m, permitindo, assim, a composição de um *dataset* com nove bandas espectrais. Essa reamostragem é fundamental para etapas de processamento posteriores.

2.4 Análise das imagens

Tendo em vista a análise das imagens foi utilizado inicialmente o algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM), que teve como objetivo o mapeamento das fitofisionomias presentes na cena selecionada. Este processo de classificação supervisionada teve por base a amostragem de regiões de interesse, correspondentes aos cinco tipos de cobertura vegetal identificadas na área de estudo, diretamente na imagem do sensor ASTER. Isto se deve a não existência de uma biblioteca espectral para a identificação da vegetação em ecossistemas com Floresta Tropical. A partir das regiões de interesse foi possível a extração de *endmembers* para cada fitofisionomia, conforme a Figura 4.

Para a melhor definição da classificação, optou-se pelo monitoramento dos ângulos nas imagens *rules*, considerando os ângulos médios gerados a partir da área de interesse previamente selecionada. Dessa maneira, gerou-se uma imagem em níveis de cinza com baixo contraste, tendo em destaque as cinco fitofisionomias.

A seguir foi utilizado o algoritmo *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF), que teve por objetivo verificar os resultados obtidos com o classificador SAM, bem como detalhar, no nível de sub-pixel, as fitofisionomias Campinarana e Floresta de Igapó.

Visando complementar a análise utilizou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), cujos intervalos e variações foram avaliados em relação às classes delimitadas pela classificação SAM.

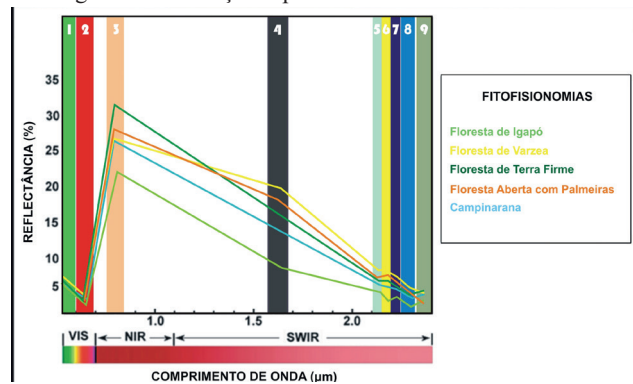
3 Resultados e Discussão

3.1 Comportamento espectral da vegetação em dados ASTER

A seguir, são apresentadas ponderações sobre o comportamento espectral da vegetação para a Floresta de Terra Firme, Floresta Aberta com Palmeiras, Campinarana, Floresta de Igapó e Floresta de Várzea, considerando a distribuição de sua resposta nas nove bandas do ASTER compreendidas no espectro refletido.

Na região do visível, que compreende a faixa espectral de 0,4 a 0,7 μ m os pigmentos existentes nas folhas que compõem o dossel superior dominam a reflectância espectral. Segundo Knipling (1970), os pigmentos são compostos pelas clorofilas “a” e “b”, em maior quantidade, e pelos carotenóides, xantofilas e antocianinas. Nesta porção do espectro não houve diferença significativa entre as cinco fitofisionomias estudadas. Nesta faixa espectral, a reflectância para a vegetação são menores que 15%, com um pico máximo em 0,55 μ m (Figura 4).

Figura 4 - Respostas espectrais das cinco fitofisionomias investigadas na resolução espectral do sensor ASTER



Fonte: Dados da pesquisa.

Na região que representa os comprimentos de onda correspondentes ao verde (banda 1), na maioria das plantas ocorre transmitância parcial e a radiação é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. A absorção cresce proporcionalmente com o aumento do conteúdo de clorofila “b”. As clorofilas “a” não absorvem a luz na região do verde. Também o pigmento β -caroteno absorve a energia solar na região de 0,4 a 0,53 μ m.

Observou-se para esta região um comportamento semelhante em todas as fitofisionomias, com a reflectância variando de 6 a 7%. A fotossíntese ocorre de forma mais eficiente na região do vermelho, compreendida entre os comprimentos de onda 0,6 e 0,7 μ m (Banda 2), onde as reações fotoquímicas são captadas pelos pigmentos do cloroplasto. Nesta região, na qual foi constatada a menor reflectância (em torno de 1%), todas as cinco fitofisionomias absorveram a radiação incidente.

Na região do Infravermelho Próximo (NIR), o comportamento da energia eletromagnética, quanto à reflexão, transmissão e absorção, é dominado pelas propriedades ópticas da folha, que dependem das estruturas celulares internas das mesmas (TUCKER; GARRATT, 1977). Há também contribuição indireta do conteúdo de água infiltrada nas

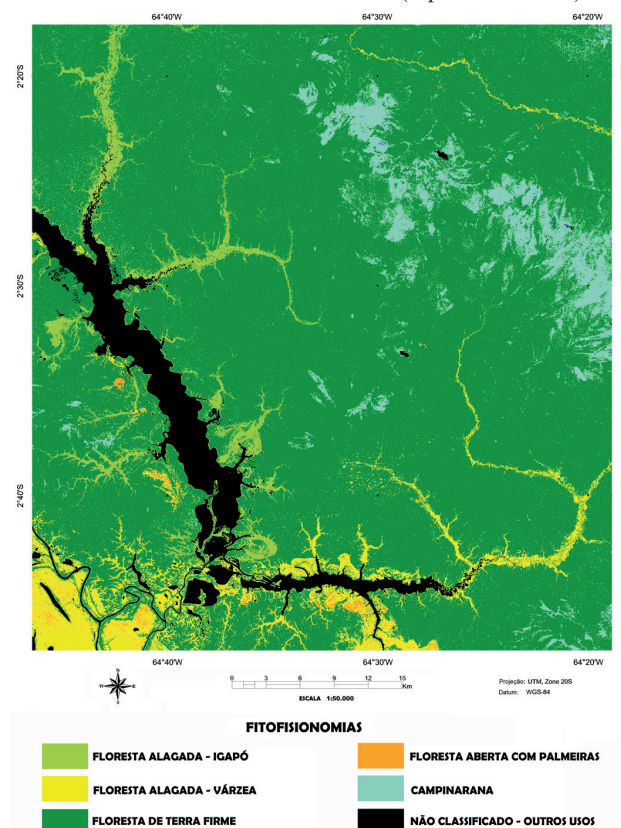
folhas do dossel vegetativo. Nesta região, comparativamente, os maiores valores de reflectância foram observados para a Floresta de Terra Firme (31%), visto a melhor definição, nesta fitofisionomia, da arquitetura do dossel superior e da estrutura celular das folhas. A Floresta de Várzea, Floresta Aberta com Palmeiras e a Campinarana encontram-se em áreas periodicamente alagadas, o que causa alterações na relação água-ar do mesófilo e, conseqüentemente, uma maior absorção da REM (reflectância em torno de 25%). Já a Floresta de Igapó apresentou a menor reflectância (21%), devido a presença constante de água junto ao solo.

Na região do comprimento de ondas do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR), correspondente as bandas 4 (1,65 μm), banda 5 (2,16 μm), banda 6 (2,20 μm), banda 7 (2,26 μm), banda 8 (2,33 μm) e banda 9 (2,40 μm), a absorção devido a água predomina na assinatura espectral dos alvos. A curva espectral da Floresta de Igapó aparece mais atenuada ao longo do SWIR. Isso é interpretado como sendo reflexo do pequeno porte dessa fitofisionomia, que apresenta estrutura menos adensada e é encontrada em ecossistemas permanentemente alagados. Para a Floresta de Várzea, constata-se que a partir do intervalo médio da Banda 4 (1,65 μm), o pico de reflectância é maior do que aquele apresentado pela Floresta de Terra Firme. Este fato pode ser explicado devido a Floresta de Várzea possuir um dossel superior menos adensado, com maiores espaços, permitindo que a água líquida flua mais facilmente para outras estruturas da planta, lâmina d'água e solo. Ao contrário, a Floresta de Terra Firme possui uma melhor arquitetura do dossel (índice de área foliar e distribuição angular das folhas), maior número de estratos arbóreos e maior contribuição de outros elementos do dossel (troncos, galhos, etc.). Assim, ao longo do SWIR, há feições de absorção devidas à abundância de compostos bioquímicos, sendo sensível a diferença entre as fitofisionomias de Várzea, Terra Firme e Floresta Aberta com Palmeiras. A Campinarana, por possuir espécies de porte alto e médio, além de elevado endemismo, apresentou decréscimo contínuo da reflectância no SWIR, de comprimento de onda menores para maiores. A reflectância desta tipologia na Banda 4 (1,65 μm) foi maior do que a Floresta de Igapó, apresentando um pico de absorção próximo a 8%.

3.2 Classificação SAM e Índice NDVI

A Figura 5 apresenta o resultado da classificação espectral com o algoritmo SAM. Pôde-se observar que as Florestas de Várzea e Florestas de Igapó encontram-se em regiões no entorno do Lago Amanã e ao longo dos igarapés, sendo que estas fitofisionomias são caracterizadas por estarem respectivamente, periodica e permanentemente alagadas. A Floresta de Terra Firme, dominante na cena, aparece em áreas mais altas, em um habitat distinto geomorfológicamente das outras duas tipologias florestais.

Figura 5 - Mapa temático gerado com o algoritmo SAM, com base nas nove bandas do sensor ASTER (espectro refletido)



Fonte: Dados da pesquisa.

A fitofisionomia Campinarana, aparece associada aos gradientes de inundação. A área abrangida por cada uma destas fitofisionomias, conforme os resultados da classificação SAM, bem como obtidos em mapeamentos anteriores, são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Distribuição dos valores NDVI para cada fitofisionomia, conforme os limites mapeados através da técnica SAM

Fitofisionomia	Varição dos Valores de NDVI
Floresta de Terra Firme	0,77 a 0,80
Floresta de Várzea	0,66 a 0,78
Floresta Aberta com Palmeiras	0,74 a 0,77
Floresta de Igapó	0,62 a 0,75
Campinarana	0,78 a 0,82

Fonte: Dados da pesquisa.

Da mesma forma, uma avaliação dos resultados da classificação SAM quanto às relações e padrões de distribuição obtidos para as cinco classes mapeadas, também pode ser inferida através dos intervalos de valores da imagem NDVI associados a cada uma destas classes (Quadro 1).

É interessante observar que valores NDVI mais altos e homogêneos são observados para as fitofisionomias Floresta de Terra Firme e Campinarana, respectivamente, as quais apresentam estrutura do dossel superior mais bem definida, mais níveis de estratos arbóreos, maior densidade de vegetação e predomínio de árvores de grande porte. Por outro

lado, a Floresta de Várzea, a Floresta Aberta com Palmeiras e a Floresta de Igapó tendem a apresentar valores NDVI mais baixos e variados, haja vista a ocorrência de árvores de menor porte, maior espaçamento entre as espécies arbóreas, contato com áreas alagadas e úmidas, além da influência espectral de outros componentes de cena (mistura espectral), como solo e campo.

3.3 Mapeamento *MTMF*

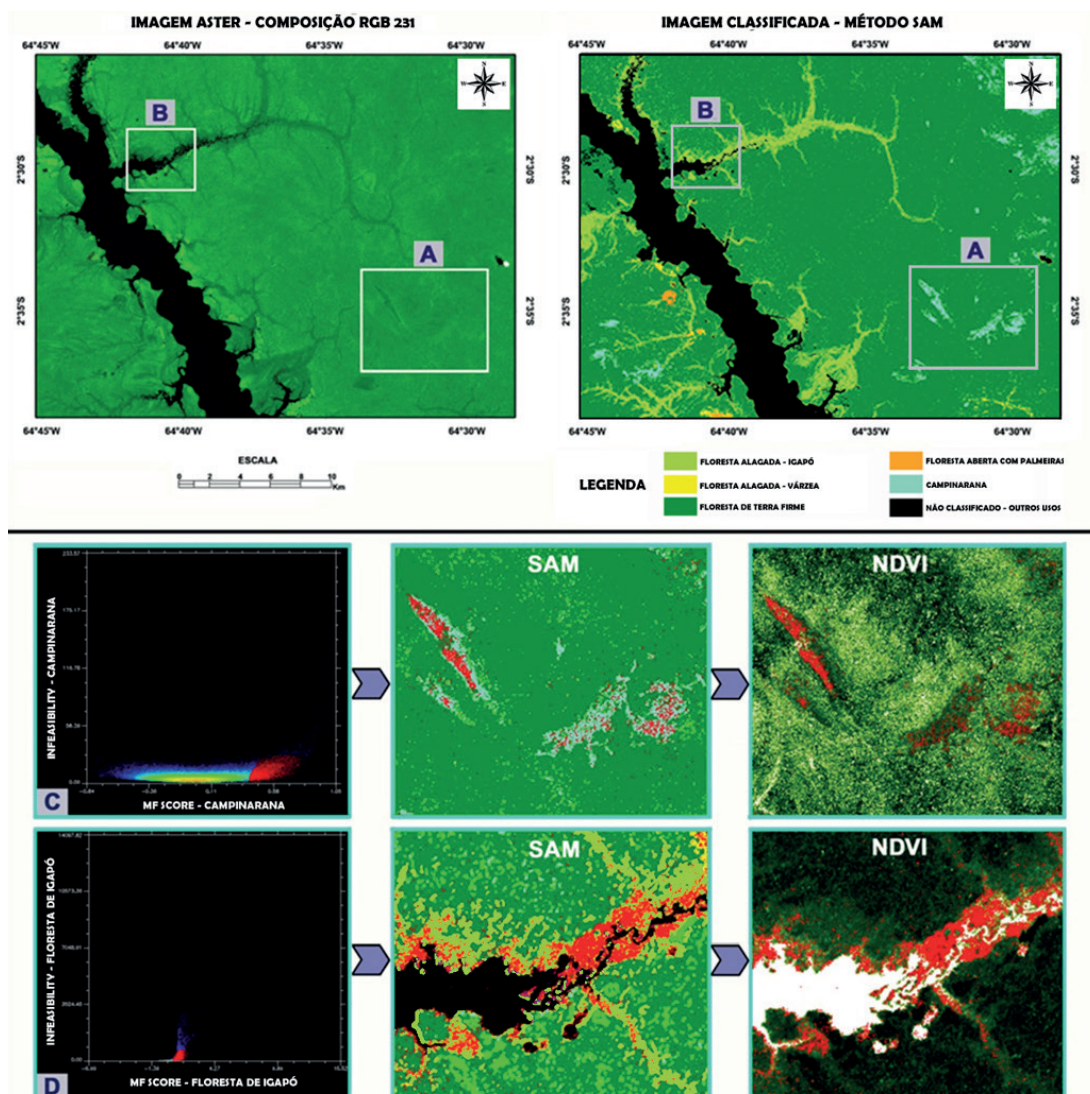
A técnica *MTMF* representa um refino no mapeamento de um determinado alvo estudado, salientando-se que a correta seleção de *endmembers* representativos da classe amostrada é crucial para o sucesso do mapeamento (SONG, 2005). Com esta técnica, rigorosamente, somente foram classificados componentes puros para a classe amostrada, que, no caso deste estudo, são as fitofisionomias. Áreas onde existe uma

mistura espectral com outros materiais não foram mapeadas.

Tendo em vista a operação do algoritmo *MTMF* na escala de *sub-pixel*, a identificação dos tipos de cobertura vegetal torna-se mais precisa. Para a análise e comparação desta técnica foram amostradas áreas para as fitofisionomias de Floresta de Igapó e de Campinarana.

A identificação das assinaturas genuínas para as fitofisionomias Floresta de Igapó e Campinarana, bem como a separação destas dos falsos positivos presentes nos *endmembers* utilizados na classificação *SAM*, teve por base a análise dos dados *MF Score* e *Infeasibility* (improbabilidades). Ou seja, foram selecionados os pixels com os valores mais baixos, simultaneamente, para estas duas variáveis. Os respectivos diagramas de dispersão, bem como os resultados obtidos para as duas fitofisionomias (sobrepostos às imagens geradas pela técnica *SAM* e pelo *NDVI*) podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 - É possível analisar duas áreas (A e B) selecionadas diretamente na imagem *ASTER* (RGB 231) e imagem obtida pela classificação *SAM*. Para estas áreas, por meio da aplicação da técnica *MTMF* os pixels identificados corretamente foram mapeados (em vermelho), para as fitofisionomias de Campinarana (C), e Floresta de Igapó (D). Assim, através do escatergrama gerado pelo *MTMF*, os membros extremos individuais foram relacionados com a classificação obtida pelo método *SAM* e com os dados obtidos pelo índice *NDVI*



Fonte: Dados da pesquisa.

Os componentes puros classificados pela técnica MTMF para as duas classes amostradas foram sobrepostos, em cor vermelha, nas imagens derivadas do mapeamento SAM e também sobre o índice de vegetação NDVI.

O mapeamento, a partir da técnica MTMF, gerou resultados diferentes da técnica SAM nas duas áreas selecionadas, mostrando uma concentração mais homogênea. Porém, de forma genérica, as áreas de ocorrência de cada fitofisionomia mapeada pelo MTMF são semelhantes àquelas mapeadas pelo SAM. A maior diferença no mapeamento compreende a quantidade de pontos mapeados, mais restritos no caso do resultado obtido pelo MTMF, o que sugere uma “aparente” maior precisão deste método, em função da possibilidade de descarte de falsos-positivos.

Comparando-se a totalidade dos pixels mapeados pelo MTMF com o índice NDVI, as fitofisionomias de Campinarana e Floresta de Igapó apresentaram, respectivamente, NDVIs médios, de 0,79 e 0,72.

Os maiores valores de NDVI observados na fitofisionomia de Campinarana são explicados pelo fato desta cobertura vegetal encontrar-se em uma área de transição, onde existe uma diversidade maior de espécies de médio porte contribuindo fotossinteticamente para a elevação dos valores de NDVI.

Comparando-se o valor médio do NDVI da fitofisionomia de Campinarana com os da Floresta de Igapó, verificou-se uma diferença de 0,1, podendo-se assim considerar que a contribuição da lâmina d'água associada a cobertura vegetal tem grande influência.

4 Conclusão

A partir do método de classificação com o algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM), foi possível a discriminação das cinco fitofisionomias predominantes na Reserva de Desenvolvimento Sustentável de Amanã: Floresta de Terra Firme, Floresta Aberta com Palmeiras, Campinarana, Floresta de Igapó e Floresta de Várzea.

A utilização de dados ASTER, associados à classificação SAM e a extração do índice de vegetação (NDVI), corroboraram os resultados obtidos. Especificamente para as fitofisionomias, Floresta de Igapó e Campinarana, estes resultados também foram confrontados com uma seleção mais rigorosa de pixels puros, obtidos através da técnica *Mixture Tuned Matched Filtering*. A coincidência quanto à localização das classes mapeadas pela técnica SAM e estes pixels, relacionados a assinaturas mais genuínas, também confirmam os resultados da classificação, ao mesmo tempo que servem para um refinamento e possível up scaling. Foi ainda possível a associação e detecção dos padrões espectrais da cobertura vegetal, mostrando a sua estreita relação com o índice NDVI.

Os resultados aqui obtidos comprovam o potencial de imagens na fronteira multiespectral/hiperspectral, como é o caso das imagens ASTER, bem como de técnicas de classificação espectral, para o mapeamento sistemático, em múltiplas escalas, de tipologias florestais em ambientes

tropicais.

Destaca-se neste estudo, o difícil acesso a área, além da restrição de informações em regiões amazônicas enfatizando a potencialidade do mapeamento remoto para esse fim.

O estabelecimento de áreas adequadas e prioritárias para o manejo e preservação, utilizando técnicas avançadas e tecnologias inovadoras de Sensoriamento Remoto, representam ganhos significativos tanto na escala de mapeamento quanto na precisão na diferenciação da cobertura vegetal associada a estes ecossistemas.

Referências

- ABRAMS, M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Data products for the high spectral resolution imager on NASA's EOS-AMI platform. *Int. J. Remote Sensing*, v.21, n.5, p.847-861, 2000. doi: 10.1080/014311600210326
- ABRAMS, M.; HOOK, S. *Aster user handbook: advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*. USA: NASA/Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2002.
- ACORN, 2002, *ACORN 4.0 tutorial*. EUA, AGI-Colorado.
- CAMPBELL, J.B. *Introduction to remote sensing*. New York: The Guilford Press, 1996.
- CARVALHO, A.P.F. et al. *Classificação de padrões de vegetação na região de transição entre o Cerrado e a Floresta Amazônica*. SBSR 9. Belo Horizonte, *Anais...* Belo Horizonte: INPE, p.2679-2687, 2003.
- DUCART, D.F.; CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R. Mapeamento de alteração hidrotermal no distrito de Los Menucos, Argentina, por meio de imagens multiespectrais ASTER. In: *Simp. Bras. Sens. Rem.*, v. 12, p. 4057-4064, 2005.
- ERSDAC - Earth Remote Sensing Data Analysis Center. 2003. *Crosstalk correction program user's guide*. Tokyo: ERSDAC, 2003.
- FOODY, G.M. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.*, v. 80, p. 185-201, 2002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- GALVÃO, L.S.; ALMEIDA-FILHO, R.; ÍCARO, V. Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, v.7, p.107-114, 2005. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.12.003>
- IWASAKI, A.; TONOOKA, H. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SIWR. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.43, n.12, p.2747-2751, 2005. doi: 10.1109/TGRS.2005.855066
- KNIPLING, E.B. Physical and physiological basis for the reflectance visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sens. Environ.*, v.1, n.3. p.155- 159, 1970. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
- KRUSE, F.A. Combined SWIR and LWIR Mineral Mapping Using MASTER/ASTER. In: *Proceedings, IGARSS 2002, Toronto, Canada, Also in Hardcopy, IEEE Operations Center, Piscataway, NJ. IV: 2267-2269 (CD-ROM)*, 2002. doi: 10.1109/IGARSS.2002.1026514
- LACRUZ, M.S.P.; SANTOS, J. R. Uso de la percepción remota como subsidio para inventários forestales en la amazonia brasilera. *Revista Selper*, v.13, p.24-28, 1997.

- MUSTARD, J.F.; SUNSHINE, J.M. Spectral analysis for Earth Science. *Remote Sensing for the Earth Sciences*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, p.251-306, 1999.
- NUNES, G.M.; SOUZA FILHO, C.R.; FERREIRA, L.G. Caracterização de fisionomias vegetais em área de floresta tropical através de análises espectrais em dados e produtos do sensor ASTER, In: *Simp. Bras. de Sens. Rem.*, Florianópolis, INPE. 13: 6497-6504, 2007.
- POWELL, R.L. *et al.* Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sens. Environ.*, v. 90, p. 221-234, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.007>
- RUBIN, T. D. Spectral alteration mapping with Imaging Spectrometers. In: *Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Denver, Colorado, p. 13-25, 1991.
- SMITH, J.H. *et al.* Effects of landscape characteristics on land-cover class accuracy. *Remote Sens. Environ.*, v. 84, p. 342-349, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00126-8)
- SONG, C. Spectral Mixture Analysis for subpixel vegetation fractions in the urban environment: How to incorporate endmember variability? *Remote Sens. Environ.*, 95, 248-263, 2005. doi:10.1016/j.rse.2005.01.002
- SOUZA FILHO, C.R. *et al.* Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. In: *Proceedings of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference*, 1-12, 2003.
- SOUZA FILHO, C. R. *Aster à vista. Mundogeo*, v.29, p.62-64, 2003.
- SOUZA FILHO, C. R. Sensoriamento remoto hiperespectral. *Mundogeo*, 2004.
- TUCKER, C.J.; GARRATT, M.W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Applied Optics*, v.16, n.3, p.635-642, 1977. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.16.000635>
- VICENTE, L.E.; SOUZA FILHO, C.R.; PEREZ FILHO, A. O uso do infravermelho de ondas curtas (SWIR) no mapeamento de fitofisionomias em ambiente tropical por meio de classificação hiperespectral de dados do sensor ASTER. Florianópolis, INPE, 2007.