

Delimitação e Caracterização do Ambiente de Vereda: II. O potencial das imagens óticas ASTER

Philippe Maillard

Thiago Alencar-Silva

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG,
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG 31270-901
philippe@cart.igc.ufmg.br, thiago-alencar@uol.com.br

Abstract. Palm swamps (veredas) are vegetation complexes composed of a succession of vegetation forms that range from gramineous to sclerophyllous associated with a river system and a mostly flat topography. In a previous article, SAR data was used in a segmentation scheme to delineate palm swamps from their surroundings. In this article, detailed field data were used to classify the different physiognomies associated with this peculiar environment. An ASTER image was used for this classification using the Fisher criterion algorithm. The classification was simplified by limiting the investigated area to a river-based buffer. Good results were obtained with a +80% confidence but the 15m resolution of the imagery revealed itself as a limitation to further improvements. Comparison with a segmented SAR image brought some light on the main factors affecting the radar backscattering.

Palavras-chaves: palm swamps, classification, buffer zone, ASTER, veredas, classificação, zona tampão.

1. Introdução

Veredas são formações vegetais ribeirinhas associadas ao cerrado que possuem uma importância desproporcional em relação à área que ocupam, o que explica sua denominação como “oásis do sertão”. Agindo como corredores ecológicos, as veredas são ambientes frágeis que sustentam boa parte da biodiversidade florística e faunica do cerrado (Castro, 1980) além de ser de primeira importância para as populações rurais que precisam dessa fonte de água durante os meses de estiagem. O quinquagésimo aniversário de publicação do livro “Grande Sertão: Veredas” (Guimarães Rosa, 1956) está trazendo uma maior sensibilização sobre o papel das veredas no cerrado enquanto o bioma mais ameaçado do Brasil (Ratter *et al.*, 1997).

Em artigo anterior, os autores propuseram uma metodologia, baseada na segmentação de imagens RADARSAT-1, para a delimitação semi-automática das veredas em zonas tampão em volta da rede hidrográfica. Apesar de não conseguir detectar as veredas em toda sua extensão (50% a 62% dependendo da inclusão ou não das áreas de nascente), a metodologia mostrou-se válida considerando que não necessita de áreas de treinamento ou de trabalho de campo.

As veredas são geralmente associadas às características da topografia de um talvegue plano e condições particulares de permeabilidade do substrato rochoso (camada permeável sobrepondo a uma camada impermeável) onde o lençol freático exsuda e solos hidromórficos, ricos em matéria orgânica, se desenvolvem (Boaventura, 1988). Porém elas não são formações uniformes mas compostas de diferentes estratos, os quais seguem geralmente um padrão transversal ao longo de toda sua extensão, devido principalmente à disponibilidade hídrica do solo. De acordo com Eiten (1994), a partir do contato com o cerrado em direção ao fundo do seu vale, pouco profundo, encontra-se um campo graminoso, seguido por uma região de arbustos e, no meio,

uma área de extratos arbóreos onde se destaca a palmeira Buriti (*Mauritia vinifera*) (**Figura 1**). A partir do centro, o outro lado espelha a mesma sequência. Essas características foram observadas na maioria das veredas da área de estudo (Parque Estadual Veredas do Peruaçu).



Figura 1. Fotografia ilustrando as diferenças fisionômicas das veredas (a) vista aérea (b) vista do chão: A - Cerrado, B - Gramíneas, C - Estrato arbustivo e arbóreo, D - Buriti.

Poucas pesquisas de sensoriamento remoto concentraram-se no estudo das veredas. Produtos óticos são largamente utilizados na identificação de classes de vegetação através de métodos de classificação mas somente nos últimos anos as resoluções espaciais das imagens orbitais permitiram a cartografia de formações muito estreitas como as veredas. Contudo a distinção entre as veredas e outras formações ribeirinhas continua uma tarefa difícil.

2. Objetivos

Apoiando-se na capacidade (ainda grosseira) de dados do tipo SAR (radar de abertura sintética) poder delimitar a área das veredas, o objetivo desta segunda parte da pesquisa reside na avaliação de dados óticos (ASTER na ocorrência) a fim de permitir a separação e a classificação das principais fitofisionomias associadas às veredas. Deve-se considerar que a resolução das imagens ASTER (15m em VNIR) representa um fator limitador posto que as veredas podem ter uma largura inferior a 100m e que as fitofisionomias individuais (*i.e.* gramíneo, arbustivo ou arbóreo) apresentam, as vezes larguras da ordem de 30m ou menos. Dois fatores favorecem esta separação: 1) as fitofisionomias são muito diferentes e devem ter um comportamento espectral distinto e 2) limitando a classificação à uma zona tampão definida pela rede hidrográfica ou ainda pelos resultados obtidos com a segmentação das imagens SAR em estudos anteriores (Alencar-Silva e Maillard, 2006) permite reduzir a quantidade de classes a serem consideradas, diminuindo assim os problemas de confusão inter-classes.

3. Sensores Óticos Aplicados à Cartografia de Formações Ribeirinhas

A maior parte dos trabalhos de sensoriamento remoto, mesmo recentes, que estudam formações ribeirinhas utilizam fotografias aéreas (p.ex. Edwards *et al.* (2003); Pala *et al.* (2003)) ou dados de sensores digitais de alta resolução espacial (p.ex. Weber e Dunno (2001); Viers *et al.* (2003)). A principal justificativa para o uso de sensores de resolução mais fina é que esses ambientes

são freqüentemente de pouca extensão e de configuração linear, dificultando o uso de dados obtidos em escalas menores. Simões *et al.* (2001) efetuaram um estudo com imagens de satélite combinadas a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) a fim de identificar as prioridades de restauração das formações ribeirinhas. O estudo utilizou a rede hidrográfica digitalizada a partir de cartas topográficas para restringir a análise às áreas tampão perpendiculares a cada margem. Neste caso, assim como no nosso, o conhecimento prévio da rede hidrográfica permitiu concentrar os esforços sobre os ambientes ribeirinhos. É baseado neste raciocínio que Maillard e de Souza (2003) avaliaram as formações ribeirinhas do município de Brumadinho empregando imagens Landsat com resolução espacial de 30m . Contudo, esses estudos concentraram-se principalmente na detecção de ambientes ribeirinhos e não na sua caracterização.

Se imagens radar possibilitam a aquisição de informação sobre a estrutura interna do dossel (espalhamento volumétrica) e até sobre a umidade do solo (espalhamento direto), imagens óticas permitem uma melhor diferenciação das classes de vegetação que oferecem um comportamento espectral conhecido no visível e infravermelho que depende das relações entre energia absorvida (fotossíntese e conteúdo em água) e refletida (estrutura molecular). Sendo assim, espera-se que a junção destas informações junto ao conhecimento espacial (zona tampão em volta da rede hidrográfica) leve a resultados mais precisos sobre a caracterização do ambiente de veredas (vegetação e solo).

4. Materiais e Métodos

4.1. Área de estudo, dados e pré-processamento

A área de estudo está situada no Parque Estadual Veredas do Peruaçu e seu entorno ao longo do curso do rio Peruaçu, na região norte de Minas Gerais. A **Figura 2** ilustra a localização da área de estudo e a porção da imagem ASTER cobrindo-a. A área foi escolhida por ser uma das poucas bem preservadas no contexto do cerrado brasileiro, tendo as condições ideais para a pesquisa e possuindo uma das maiores áreas contínuas de veredas do país.

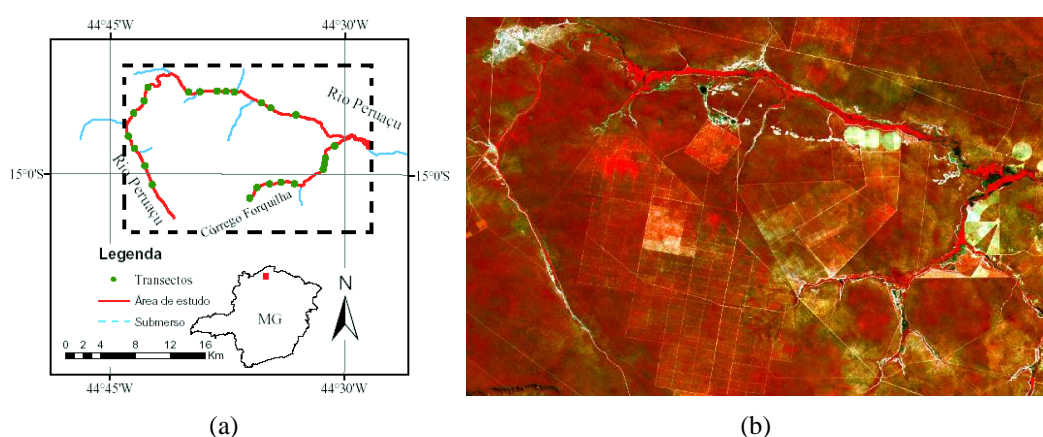


Figura 2. Localização da área de estudo (a) e apresentação da imagem ASTER (b). Os pontos verdes em (a) representam a localização dos transectos de onde foram tirados as áreas de treinamento e de teste.

Assim como o sensor MODIS o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) está acoplado ao satélite Terra/EOS AM-1, ele é o único sensor de alta

resolução desta plataforma. Em operação desde 1999, esta plataforma é administrada em conjunto pelo EUA e o Japão. O ASTER opera em 14 bandas de comprimentos de ondas variando do visível até o infravermelho térmico, e fornece dados estereocópicos.

O ASTER é composto por vários subsistemas distintos: o VNIR (*Visible and Near Infrared*) possui 3 bandas no visível e no infra-vermelho próximo com resolução espacial de 15 m e radiométrica de 8 bits; o SWIR (*Short Wavelength Infrared Imaging Radiometer*) com 6 bandas no infravermelho médio e 30m de resolução espacial; e o TIR (*Thermal Infrared*) com 5 bandas no infra-vermelho térmico, resolução espacial de 90 m e radiométrica de 12 bits.

A cena utilizada neste estudo foi adquirida em agosto 2006, com excelente condição atmosférica (cobertura de nuvens de 0%). Para a classificação apenas as 3 bandas do sensor VNIR foram analisadas, correspondendo a banda verde, vermelha e infra-vermelha (**Tabela 1**).

Tabela 1. Imagens ASTER utilizada e características.

Data de aquisição	Instrumento/banda	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Faixa espectral
21/08/2006	VNIR/1	15m	8 bits	0.52-0.60 μm
21/08/2006	VNIR/2	”	”	0.63-0.69 μm
21/08/2006	VNIR/3	”	”	0.76-0.86 μm

A imagem foi registrada a partir de uma imagem pancromática do Landsat ETM+ de 15m de resolução espacial que tinha sido corrigida no quadro de um estudo anterior (Gomes e Maillard, 2003). Foi realizada também uma correção radiométrica padrão das três bandas do VNIR (Arai e Tonooka, 2005).

Sabendo que a vereda é um ambiente úmido que segue a linha de drenagem na região tabular do cerrado, zonas tampão em volta do curso d'água foram criadas para limitar a classificação a essas áreas e reduzir os erros potenciais de classificação. Esta medida teve também o efeito de manter a quantidade de classes a um mínimo necessário. As zonas tampão de 1000m de cada margem da rede hidrográfica foram geradas, totalizando um polígono de 2000m de largura. Tal extensão foi escolhida para garantir a totalidade das fisionomias das veredas e incluir porções do cerrado vizinho. Os resultados de uma segmentação de uma imagem radar (RADARSAT-1) foram incorporados aos dados do presente estudo a fim de poder entender a relação entre as fitofisionomias das veredas e o retroespalhamento radar na banda C (HH).

4.2. Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo foram realizados em 2005 - 2006 utilizando-se um receptor GPS de navegação. Vinte e quatro (24) transectos foram medidos e caracterizados partindo-se do cerrado, atravessando as veredas do rio Peruaçu, ou alguns de seus tributários, e terminando novamente no cerrado na outra margem. Para cada transecto, todos os diferentes estratos de vegetação foram descritos e suas extensões ao longo dos transectos mensuradas.

A localização dos transectos foi arbitrária tentando respeitar um espaçamento em múltiplos de 500m, desde que fosse viável a travessia. Apesar das campanhas de campo terem sido realizadas no período seco, a maioria das veredas apresentavam-se parcialmente inundadas, o que dificultou muito o acesso terrestre. Arquivos vetoriais desses transectos foram criados onde para cada fisionomia de vereda foi atribuído um determinado nível e uma cor. Áreas de treinamento e de teste foram geradas a partir dessas informações com a finalidade de proceder

a classificações supervisionadas. Essas amostras foram baseadas apenas em áreas visitadas e contêm entre 2 e 10 pixels cada.

4.3. *Processamento das imagens ópticas*

A classificação consiste em atribuir uma observação a um grupo ou categoria pré-definido a partir de uma série de regras (James, 1985). Em sensoriamento remoto, essas regras são geralmente derivadas de amostras de medições espectrais efetuadas em uma ou várias bandas: a chamada classificação supervisionada. Em nosso caso, a classificação consiste em atribuir uma das classes de vegetação (“cerrado”, “gramíneas”, “arbustivo/arbórea” ou “predominância de solo exposto”) aos pixels contidos dentro da faixa abrangida pela área tampão descrita acima. Os estratos “arbustivo” e “arbóreo” foram mesclados devido à impossibilidade de diferenciá-los nas três bandas do VNIR.

Os vários classificadores são frequentemente agrupados em paramétricos ou não-paramétricos. Esses últimos têm a vantagem de não pressupor uma função de distribuição (*e.g.* de Gibbs ou de Gauss) e de ser menos restritivos em relação às amostras. O “critério de Fisher” foi escolhido pelo fato de ser não-paramétrico e por não exigir amostras distribuídas aleatoriamente (pois as condições do terreno não permitiam respeitar essa condição). O critério de Fisher projeta o espaço espectral em uma linha que melhor separa duas classes:

$$J(\omega) = \frac{\omega^t S_B \omega}{\omega^t S_W \omega} \quad (1)$$

onde S_B e S_W são as matrizes de espalhamento (“scatter”) inter- e intra-classe respectivamente e ω é a matriz de covariância $\omega = \Sigma_{1,2}^{-1}(\mu_1 - \mu_2)$ onde μ_1 e μ_2 são as médias das duas amostras consideradas. Um critério de Fisher é calculado para cada par de classes e o pixel é atribuído à classe com o menor J (Duda *et al.*, 2001).

Posteriormente, o sucesso da classificação é calculado construindo uma tabela de contingência a partir de amostras reservadas para este fim. Normalmente, essa matriz é quadrada e compara o resultado da classificação obtido (vertical) com os dados de referência (horizontal). Adicionalmente, o índice Kappa ($\hat{\kappa}$) é estimado a fim de levar em conta a participação da simples sorte na atribuição das classes (Jensen, 2005).

5. Resultados e Discussão

5.1. *Classificação da Imagem ASTER*

A imagem ASTER foi classificada utilizando o software Multispec (©2006 Purdue Research Foundation, West Lafayette, IN) por meio do algoritmo de classificação supervisionada do critério de Fisher. Quatro classes foram determinadas: “Gramíneas”, “Arbustivo/Arbóreo”, “Predominância de solo exposto” e “Cerrado”. A partir dos transectos, um total de 259 pixels repartidos em 38 grupos foram usados como áreas de treinamento. Um segundo conjunto de 453 pixels foi reservado como áreas de teste. O resultado da classificação é apresentado na **Figura 3**.

A análise da matriz de contingência das áreas de teste da classificação mostra um sucesso total de 90,5%, com um índice Kappa de $\hat{\kappa} = 79,9\%$ (**Tabela 2**). A análise visual do resultado revela que o estrato arbustivo/arbóreo é quase sempre contínuo e corresponde bem as observações de campo e às fotografias aéreas (**Figura 3b-c**). O estrato arbustivo de menor porte

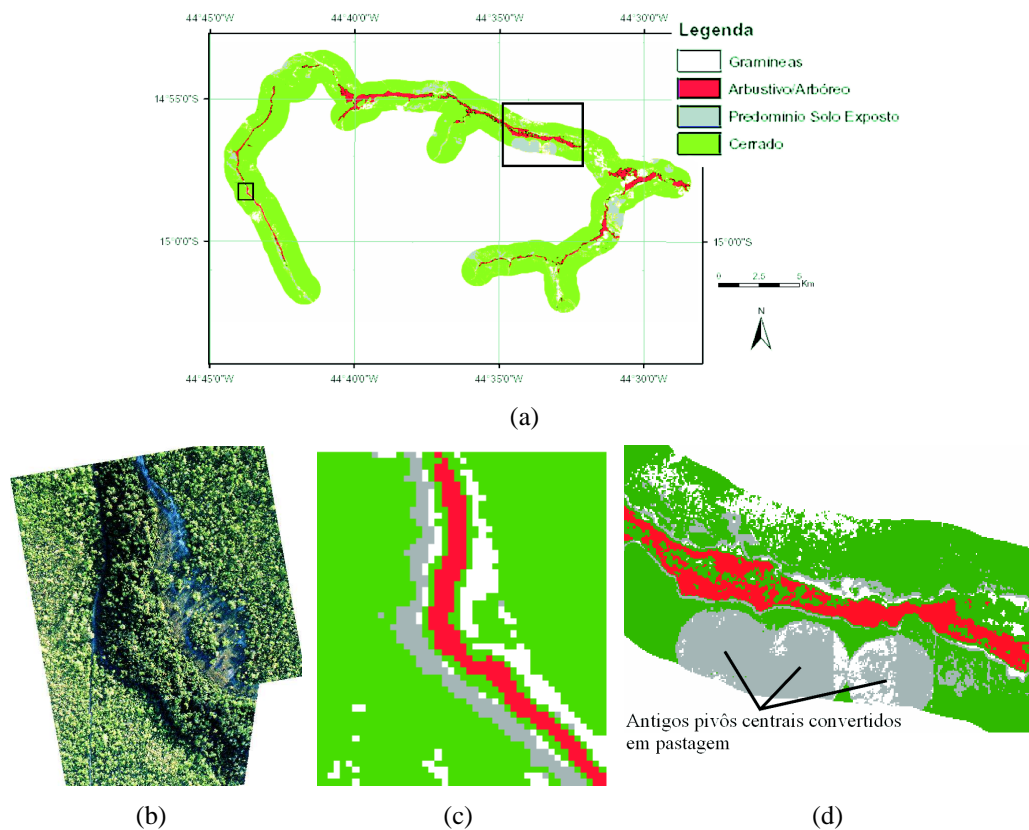


Figura 3. Resultado da classificação da cena ASTER através do Critério de Fisher: (a) mapa da classificação geral; (b) fotografia aérea da área do pequeno retângulo em (a); (c) classificação da mesma área; (D) outro detalhe da classificação (retângulo maior em (a)).

inserido entre as gramíneas e o estrato arbóreo foi confundido com o cerrado e nos leva a acreditar que esse estrato poderia ser diferenciado com bandas espectrais mais diversificadas¹ ou com dados de melhor resolução espacial (*i.e.* IKONOS multi-espectral com 4m). Na maior parte da sua extensão, as veredas são beiradas por estradas de areia bem demarcadas na classificação mesmo quando estavam sombreadas pelas árvores como na **Figura 3b**. O aumento dessas zonas de areia pode estar ligado às fontes de degradação como o pisoteio de gado e a utilização das margens das veredas como estrada. O monitoramento dessas áreas é tão importante quanto das formações vegetais.

A classificação pelo Critério de Fisher mostrou-se mais eficiente do que todos os outros algoritmos inclusive da Máxima Verossimilhança. Tudo leva a pensar que a simples classificação (até mesmo baseada em observações visuais a partir do conhecimento da posição da rede hidrográfica) fornece um instrumento eficiente para o mapeamento e (mais importante ainda) o monitoramento das veredas. Apesar da sua resolução espacial limitada, imagens ASTER constituem-se dados de baixo custo que permitem, *in extremis*, fazer esse monitoramento.

Na **Figura 4**, o resultado da classificação foi sobreposto ao resultado de uma segmentação de uma imagem RADARSAT-1 baseada na teoria dos Campos aleatórios de Markov (Alencar-Silva e Maillard, 2006) para determinar os estratos da vereda que correspondem às áreas detec-

¹As bandas do infravermelho médio do ASTER não foram utilizadas por causa da sua resolução espacial de apenas 30m que tendem a fazer perder a vantagem dos 15m de resolução do VNIR.

Tabela 2. Matriz de confusão para a classificação da imagem ASTER utilizando o classificador “critério de Fisher”

Classe	Produtor (%)	Amostras (n)	Gramíneas	Arbustivo/ Arbóreo	Solo Exposto	Cerrado
Gramíneas	74.6	67	50	0	7	10
Arbustivo Arbóreo	92.8	332	2	308	10	12
Solo Exposto	94.4	18	0	0	17	1
Cerrado	97.2	36	0	0	1	35
Total		453	52	308	35	58
Usuário (%)			96.2	100	48.6	60.3
Sucesso Total (410/453) = 90.5%			Estatística Kappa (x100) = 79.9%			

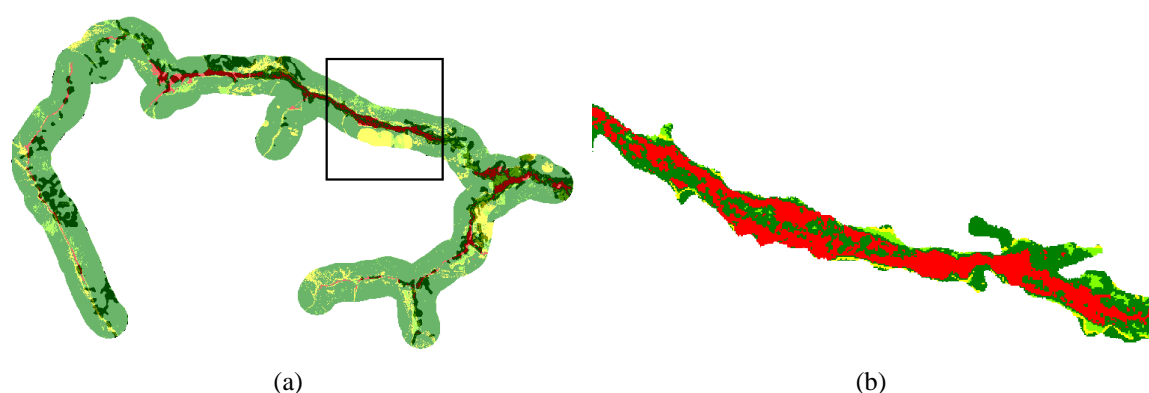


Figura 4. Relação entre o resultado da segmentação e da classificação: (a) sobreposição de resultados entre a segmentação (manchas escuras) e a classificação (b) detalhes da relação entre a segmentação e a classificação.

tadas pela segmentação e classificação da imagem radar. Uma análise preliminar revela que a segmentação delimita principalmente o estrato arbustivo/arbóreo, deixando de fora, os campos gramíneos e as áreas de predominância de areia exposta. Este comportamento está diretamente ligado à disponibilidade hídrica na superfície do solo. Uma análise mais sistemática será efetuada em um futuro próximo quando dados de umidade gravimétrica e porcentagem de matéria orgânica do solo poderão ser cruzados com a segmentação (RADARSAT-1) e a classificação (ASTER).

6. Conclusão

As veredas são ambientes frágeis de extrema importância para todo ecossistema e para a sustentabilidade das atividades agropecuárias no cerrado. É de suma importância fazer o inventário dessas formações e de seu estado de conservação. As imagens ASTER, quando usadas em conjunto com zonas tampão em volta da rede hidrográfica permitem uma classificação semi-detalhada e, com alto grau de confiança (mais de 80% no presente estudo), dessas formações separando as principais fitofisionomias (gramíneas, arbustivo/arbórea e possivelmente arbustivo) assim como as áreas onde as areias predominam. Essas últimas podem ser um indicador de degradações causadas pelo pisoteio de animais ou a passagem de veículos. As imagem ASTER,

mesmo com uma resolução espacial limitada, podem servir de instrumento de monitoramento das veredas com a vantagem de serem de baixo custo e rápido processamento.

A superposição do resultado da classificação em uma imagem RADARSAT-1 segmentada permitiu melhor identificar os estratos sujeitos a serem distinguidos a partir de imagens SAR.

Referências

- Alencar-Silva, T. e P. Maillard (2006, May 8-11). Delineation of palm swamps using segmentation of radarsat data and spatial knowledge. In *Proceedings of the ISPRS Annual Conference, Enschede, Netherland*, pp. 1–6.
- Arai, K. e H. Tonooka (2005). Radiometric performance evaluation of aster vnr, swir, and tir. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43(12), 2725–2732.
- Boaventura, R. S. (1988). *Anais do 2º encontro latino-americano: relação ser humano-ambiente*, Chapter Preservação da veredas - síntese, pp. 109–122. Belo Horizonte.
- Castro, J. P. C. (1980). As veredas e sua proteção jurídica. *Fundação João Pinheiro - Análise e Conjuntura*. 10(5-6), 321–333.
- Duda, R., P. Hart, e D. Stork (2001). *Pattern Classification* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc. 654 p.
- Edwards, B., S. Steinberg, e K. Reeves (2003, May 5-9). A view into the past: using historical aerial photographs for planning and prioritizing riparian restoration along the lower mokelumne river, san joaquin county, califórnia. In *Proceedings of the ASPRS 2003 Annual Conference*, Anchorage, Alaska.
- Eiten, G. (1994). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas* (2ed. ed.), Chapter Vegetação do Cerrado, pp. 17–73. Brasília (DF).
- Gomes, M. F. e P. Maillard (2003, October 14-17). Comportement spectral saisonnier des formations végétales semi-arides dans la vallée de la rivière Peruaçu - Minas Gerais, Brésil. In *Proceedings of the XXV Canadian Remote Sensing Symposium, Montréal, QC, Canada*, pp. 1–10.
- Guimarães Rosa, J. (1956). *Grande Sertão: Veredas*. Editora José Olympio. 594 p.
- James, M. (1985). *Classification Algorithms*. John Wiley and Sons, London, U.K. 211 p.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson Prentice Hall, New Jersey. 526 p.
- Maillard, P. e C. G. de Souza (2003, October 14-17). Cartographie des formations riveraines à l'aide de photographies aériennes petit format : problèmes opérationnels et perspectives pour l'utilisation d'images landsat. In *Proceedings of the XXV Canadian Remote Sensing Symposium, Montréal, QC, Canada*, pp. 1–10.
- Pala, O., S. Khorram, J. Iiams, R. Lunetta, e J. Knight (2003, May 5-9). Identification and mapping of riparian vegetation in eastern north carolina using remotely sensed data. In *Proceedings of the ASPRS 2003 Annual Conference*, Anchorage, Alaska.
- Ratter, J. A., J. F. Ribeiro, e S. Bridgewater (1997). The brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany* 80, 223–230.
- Simões, L. B., F. Ribeiro, R. Dainese, L. Cardoso, e S. Campos (2001, April). Riparian restoration priorities in southeastern brazil. In *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Foz do Iguaçu PR.
- Viers, J., C. Ramirez, J. Quinn, e M. Johnson (2003, May 5-9). Detection of land use disturbance patterns in riparian habitats using hyperspectral data: an example in the naverro river watershed, califórnia. In *Proceedings of the ASPRS 2003 Annual Conference*, Anchorage, Alaska.
- Weber, R. e G. Dunno (2001). Riparian vegetation mapping and image processing techniques, hopi indian reservation, arizona. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(2), 179–186.