

Utilização de Dados SAR R99-B na análise e caracterização de Florestas de Várzea e de Terra Firme em Ecossistemas Amazônicos

Gustavo Manzon Nunes¹
Carlos Roberto de Souza Filho²
Laerte Guimarães Ferreira³
Luiz Eduardo Vicente²

¹Universidade Federal do Mato Grosso – FENF - Faculdade de Engenharia Florestal
Av. Fernando Correa da Costa, s/n - CEP : 78060-900 - Cuiabá – MT, Brasil
gustavonunes@ufmt.br

²Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Instituto de Geociências
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{beto, vicente}@ige.unicamp.br

³Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (IESA) - Universidade Federal de Goiás
Campus Samambaia, Caixa Postal 131 – 74001-970 – Goiânia – GO, Brasil
laerte@iesa.ufg.br

Abstract. The development of Remote Sensing technologies and methodologies is becoming increasingly essential in the analysis and monitoring of vast areas dominated by the Amazon rainforest. This study seeks to evaluate the capability of data generated by *Synthetic Aperture Radar* (SAR)/R99-B sensor, in mapping phytophysiognomies found in the Amanã and Mamirauá Sustainable Development Reserves (RDSA and RDSM). By means of L band (1.28 GHz), full polarimetric (HH, VV, VH, HV), SAR-amplitude data acquired with the SAR R99-B sensor, distinctions among flooded forest phytophysiognomies in the RDSA and RDSM was pursued. The Iterated Conditional Modes (ICM) algorithm was employed to perform the local/contextual polarimetric classification of the data. Results showed that the use of multivariate distributions in amplitude with a band of texture produced classifications of superior quality in relation to those obtained with the uni / bivariate polarimetric data.

Palavras-chave: synthetic aperture radar, remote sensing, tropical forest mapping, radar de abertura sintética, sensoriamento remoto, mapeamento de florestas tropicais.

1. Introdução

Nas últimas duas décadas, houve um grande desenvolvimento da tecnologia SAR, com conseqüências importantes para estudos da vegetação localizada, principalmente, em ambientes tropicais e boreais.

O sensor SAR (*Synthetic Aperture Radar*) aerotransportado que encontra-se acoplado nas Aeronaves Embraer 145/R-99 B do SIPAM, opera na banda L (1,28 Ghz - $\lambda=23\text{cm}$), com multipolarimetria, enviando e recebendo radiação eletromagnética nas polarizações vertical e horizontal (hh, vv, hv, vh); e na banda X, com polarização hh (9,23 Ghz - $\lambda=3\text{ cm}$). A aeronave pode adquirir dados em altitudes que variam de 30.000 a 37.000 pés. A largura da faixa imageada depende do modo de operação. O ângulo de incidência é modificável em função do modo de imageamento e da altitude de vôo, podendo variar de 36,34° a 84,23° (Andrade e Santa Rosa, 2005).

As uso dos dados SAR R99-B em aplicações na área florestal e ambiental podem ser verificadas em recentes estudos, como os realizados por Gonçalves (2007), na estimativa volumétrica para áreas de floresta tropical, Miranda et al. (2007), na classificação textural de tipologias da floresta alagada, Fernandez (2007), no mapeamento de corte seletivo, Gualberto e Souza Filho (2007), no reconhecimento de ambientes costeiros a partir de análise textural; SIPAM (2007), no monitoramento da ação antrópica em áreas especiais.

Neste estudo, objetivou-se demonstrar a potencialidade dos dados do Sensor Aerotransportado SAR R99-B em banda L, para a análise e caracterização da cobertura vegetal abrangendo fitofisionomias de floresta de várzea e de terra firme existentes nas Reservas de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (RDSM) e Amanã (RDSA).

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Os dados do Sensor SAR R-99B

Para a realização das pesquisas, a programação e o modo de imageamento do sensor SAR R99-B, foram delimitados em função da característica da área e o objetivo em estudo, abrangendo os ecossistemas de floresta alagada e de terra firme existentes na RDSM e na RDSA (Tabela 1 e Figura 1).

Tabela 1. Parâmetros do Sensor SAR R99-B e Características do Imageamento

Data da coleta	02/06/2005
Modo de Imageamento	Quad L + X
Polarizações	HH, HV, VV, VH
Tipo de dado	Unsigned 8 bits
Número de Looks	8 Looks
Resolução espacial	6 metros
Número de segmentos	10 segmentos
Sistema de Coordenadas: Geográfica	Lat/Long
Datum (Sistema Geodésico)	WGS-84
Largura da Faixa Imageada	20km
Ângulo de Incidência	36° - 83°
Altitude de vôo	37.000 pés = 11.000 m
Sentido de vôo	N - S, S - N

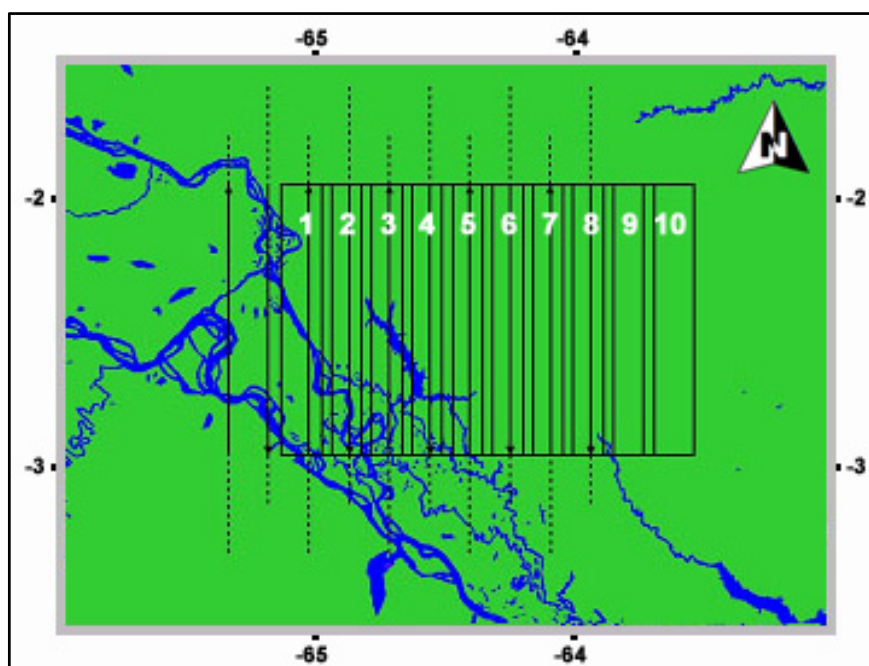


Figura 1. Planejamento de vôo para toda a área imageada, totalizando 10 segmentos.

3. Resultados e Discussão

3.1. Interação das Microondas X Vegetação

Em estudos realizados em zonas tropicais com elevada cobertura vegetal, o sensoriamento remoto na faixa das microondas permite a obtenção de informações não somente das camadas superiores da vegetação (comprimentos de onda menores), mas também das camadas inferiores e do solo (comprimentos de onda maiores). Estudos sobre a penetração das microondas em florestas tropicais foram realizados, por exemplo, por Imhoff et al. (1986), Aiba et al. (1988), Ulaby e Elachi (1990) e Wang et al. (1994).

Com o aumento da rugosidade na superfície, a quantidade de sinal especular é reduzida, ocorrendo um aumento na magnitude do sinal registrado pela antena, conhecido como componente retroespalhada. Quanto maior a quantidade de energia retroespalhada por um alvo, mais claros são os níveis de cinza que o representam na imagem. A imagem de radar é, portanto, uma medida da componente de retroespalhamento do sinal. Visto que está relacionada à rugosidade do alvo, pode ser entendida como uma representação da rugosidade da superfície. Na Figura 2, pode-se observar os mecanismos de espalhamentos nas distintas fitofisionomias da RDSA.

O dossel florestal da Floresta Ombrófila Densa, caracterizada pela Floresta de Terra Firme da RDSA é um exemplo clássico de espalhamento do volume. Parte da energia enviada pelo radar é retroespalhada pela superfície da vegetação, e outra parte da energia, dependendo das características do radar usado e da estrutura do alvo, penetra no dossel e é retroespalhada pelos elementos espalhadores (folhas, galhos, etc.) dentro da vegetação e pelo solo.

A profundidade de penetração da onda de radar na vegetação depende da umidade e densidade da vegetação, assim como do comprimento de onda. Quanto maior o comprimento de onda maior, a penetração no dossel

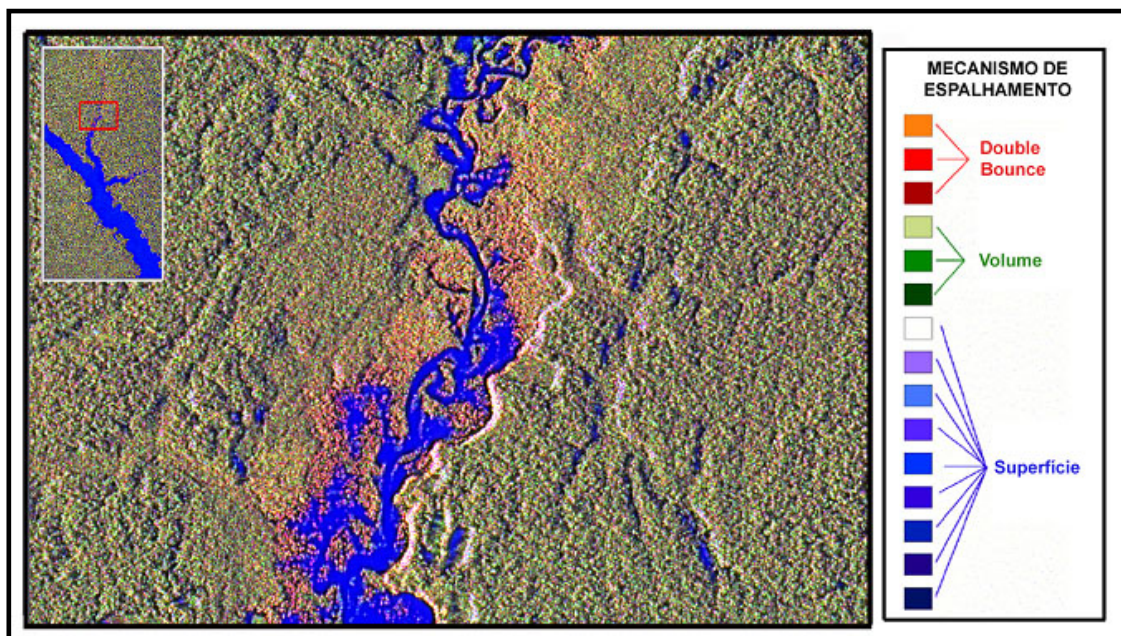


Figura 2. Composição RhhGvvBhv – Área da RDS Amanã - Observa-se a reflexão especular na superfície d'água (superfícies lisas e com alta constante dielétrica). Ocorre predominância de espalhamento volumétrico em áreas com a presença da tipologia de Floresta de Terras Baixas e Terra Firme, situada em topografias mais elevadas. A componente de reflexão de canto ocorre nas áreas com predominância de Floresta de Várzea e Igarapés, sempre associada a proximidade dos igarapés.

Recentemente, a extração de parâmetros biofísicos para estudos de ecossistemas tem sido o principal tema de investigação relacionado às aplicações florestais. O potencial do radar nestas aplicações se deve principalmente à capacidade de penetração das microondas no dossel e à sensibilidade do retroespalhamento ao conteúdo de água da vegetação (Sun e Ranson, 2002).

O retroespalhamento total de alvos florestais pode incluir os mais variados mecanismos de espalhamento. De acordo com Henderson e Lewis (1998), estes mecanismos compreendem: (1) o retroespalhamento direto da copa, incluindo o espalhamento múltiplo dentro da copa (espalhamento volumétrico); (2) o retroespalhamento direto do tronco (geralmente pequeno); (3) o retroespalhamento direto do solo; (4) o retroespalhamento da interação copa-solo; e (5) o retroespalhamento da interação tronco-solo (*double bounce*). Na Figura 3, é possível analisar as características relacionadas como o mecanismo de espalhamento em área se Floresta de Várzea da RDSM.



Figura 3. Composição RhhGvvBhv - Área da RDS Mamirauá: A área da RDS Mamirauá é dominada pela floresta alagada – Floresta de Várzea. Verifica-se pouca ocorrência da reflexão de canto na área devido a existência de macrófitas e gramíneas aquáticas, possuindo estas uma estrutura de porte baixo. Verifica-se a existência de várias planícies aluviais vegetadas com espécies de porte médio contribuindo para o espalhamento volumétrico. A reflexão especular é dominada pela superfície dos lagos e “paraná” encontrados no local.

3.2. Classificação de imagens SAR - Classificador ICM

A classificação digital de imagens consiste em um processo de decisão, que pode ser solucionado por diferentes métodos e algoritmos (Mather, 1999; Schowengerdt, 1997).

Devido à maior complexidade das imagens SAR, em função do retroespalhamento ser influenciado por fatores relacionados ao sensor, ao alvo e ao tipo de processamento dos dados (número de *looks*, tipo de representação, etc.), estudos vem sendo realizados para desenvolver classificadores mais apropriados a tais tipos de imagens (Correia, 1999; Frery, 1994; Frery e Mascarenhas, 1993; Vieira, 1996). O classificador polarimétrico desenvolvido por Correia (1999) permite a classificação de imagens SAR *multilook* de polarizações individuais ou combinação de polarizações, bem como a entrada de dados em representações diferentes,

inclusive imagens complexas. Este classificador faz uso dos algoritmos de Máxima Verossimilhança (MaxVer) e Modos Condicionais Iterativos (*Iterated Conditional Modes – ICM*).

Visando a distinção de fitofisionomias de Floresta de Várzea, realizou-se a classificação digital com dados univariados e multivariados em banda L e nas polarizações HH, HV e VV, utilizando-se o algoritmo MaxVer/ICM a partir de um fragmento do Segmento 3 da missão realizada.

A várzea da RDSM e da RDSA, bem como a maior parte da vegetação das várzeas do baixo Rio Japurá, é composta, principalmente, por três fisionomias de grande importância que foram selecionadas para análise. Duas destas fisionomias encontram-se em áreas caracterizadas por floresta (restinga baixa e restinga alta) enquanto que o terceiro habitat é o chavascal. Maiores detalhes podem ser obtidos em Nunes (2008).

Avaliou-se os resultados obtidos com os classificadores MaxVer/ICM, para os dados polarimétricos, utilizando-se como uma das bases de comparação os resultados das classificações para os dados univariados (mono-espectrais) em amplitude, através do uso das distribuições mais ajustadas e dos dados polarimétricos multivariados em amplitude, sendo avaliadas classificações com utilizando-se duas polarizações, três polarizações e com três polarizações adicionadas à uma banda de textura.

Na área de estudo, nos locais onde a estrutura física do dossel florestal contém maior nível de biomassa vegetal (Floresta de Várzea – Restinga Alta), aparecem padrões mais rugosos e bem definidos na superfície, possivelmente devido a interação de maior intensidade do dossel com as ondas de 23,5 cm da banda L.

As áreas mapeadas com a fitofisionomia de Chavascal, predominantes em ecoossistemas de Floresta de Várzea, caracterizam-se pela baixa biomassa e pelo contato direto entre solo e água, apresentando uma textura com pouca rugosidade, que é bem observada nos dados SAR em banda L.

A reflexão especular da água evidenciou os cursos d'água e lagos na imagem investigada, justificando a interação das microondas que são refletidas specularmente na direção oposta da antena, e nenhum sinal é registrado, formando assim superfícies escuras.

Por outro lado, devido ao efeito de reflexão de canto (*double-bounce*), as áreas com vegetação inundada foram realçadas, como por exemplo a fitofisionomia de Restinga Baixa, ocorrendo um aumento na magnitude do sinal registrado pela antena, caracterizado pela existência de níveis de cinza mais claros na imagem.

A variação dos parâmetros que envolvem a aquisição de uma imagem de radar pode atuar de maneiras diferentes em um mesmo alvo, provocando comportamentos diferenciados do retroespalhamento. Por outro lado, as variações nas características morfológicas e estruturais do dossel também provocam comportamentos diferentes no retorno do sinal.

O melhor resultado utilizando o algoritmo ICM foi obtido a partir do processamento com os dados multivariados em amplitude com a combinação das três polarizações adicionadas da banda de textura, sendo possível evidenciar a penetrabilidade das ondas de banda L no dossel florestal, principalmente para a Floresta de Várzea – Restinga Alta, gerando um realce da informação textural devido a presença de espécies arbóreas de maior porte. Na Figura 4 pode-se observar o resultado da classificação com o algoritmo ICM.

Considerando-se os intervalos de índice Kappa estabelecidos por Landis e Koch (1977), alcançou-se o conceito Excelente ($Kappa=0,8963$) na classificação, permitindo a discriminação correta das três classes vegetacionais de interesse, além da classe correspondente a lâmina d'água.

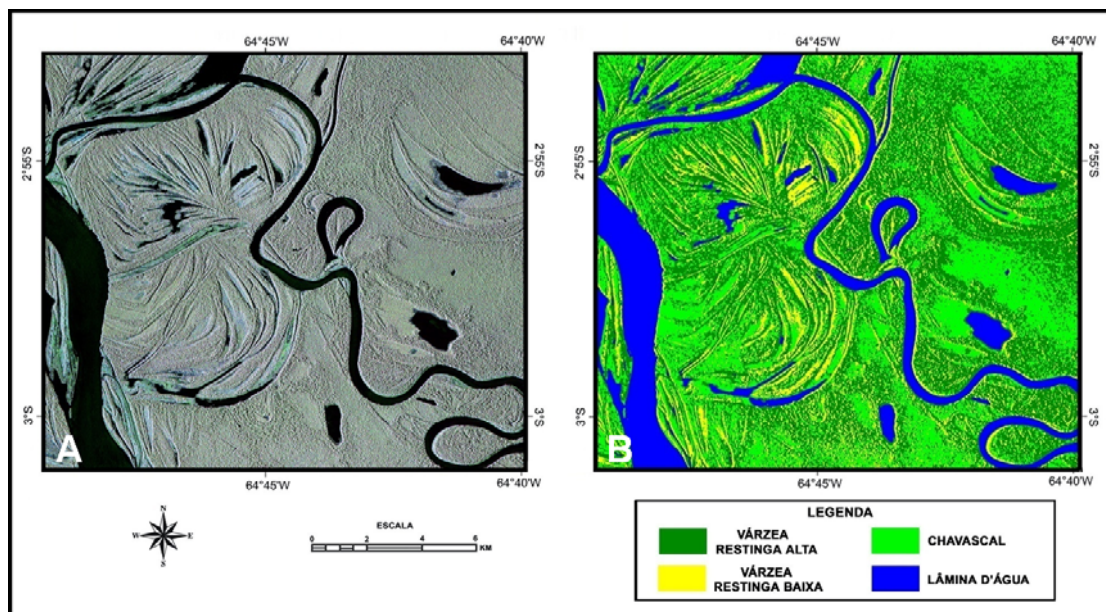


Figura 4. Em A, fragmento do segmento 3 da Missão SAR R99-B que foi utilizado no processo de classificação. Em B, resultado da classificação com o algoritmo ICM utilizando os dados multivariados adicionados a uma banda de textura.

4. Conclusões

De acordo com os processamentos realizados, os dados SAR R99-B, mostraram ser compatíveis com mapeamentos em escalas de 1:10.000 ou menores, tendo como principal vantagem a possibilidade de aquisição dos dados em qualquer condição atmosférica considerando-se principalmente áreas da Amazônia.,

A banda L, devido ao seu comprimento de onda, apresenta boa interação com os elementos espalhadores do dossel vegetal, bem como maior capacidade de penetração em relação as bandas C e X. Isso justifica o seu maior uso em estudos de florestas, possibilitando a geração de informações do perfil vertical da vegetação, incluindo a influência dos troncos, galhos e folhas.

Os resultados obtidos utilizando-se o classificador polarimétrico ICM, mostrou o grande potencial dos dados SAR/SIPAM em amplitude para distinção de classes de vegetação em ambientes alagados. Salienta-se a necessidade de análise de dados complexos, os quais excepcionalmente encontram-se disponíveis para uso.

Dados obtidos por radares de abertura sintética devem ser amplamente utilizados considerando a realização de análises em áreas intocadas e com cobertura vegetal densa como as existentes nos ecossistemas das Reservas de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá e Amanã.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado, vinculada ao processo 04/06071-8. Os autores também prestam reconhecimento ao CENSIPAM pelo projeto aprovado e fornecimento dos dados SAR, que possibilitou a realização do estudo. Os autores também agradecem o apoio do Programa FEPIM 2004, financiado pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá - Projeto N° 063-2004.

Referências Bibliográficas

- Aiba, H.; Murata, K.; Iwashita, H. Experimental results of L-band microwave penetration properties of tropical and subtropical trees. In: **Proceedings of the 8th Japan Conference on Remote Sensing**. 1988, p. 51-54.
- Andrade, N. S de O.; Santa Rosa, A. N. **O novo sistema SAR multipolarimétrico aerotransportado brasileiro**. In: 1ª Reunião de Coordenação das Atividades de Planejamento, Execução e Produção de Imagens de Missões de Sensoriamento Remoto realizadas pelas aeronaves R-99B e R-95. Censipam: Brasília, DF, 2005.
- Correia, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas**. 1999, 271 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1999.
- Fernandez, G. A. V. Taxa de correlação entre diferentes polarizações das bandas L e X de imagens SAR adquiridas pelo R99-B do SIPAM visando mapeamento de corte seletivo. In: **Simp. Bras. de Sens. Rem.**, Florianópolis, INPE. 2007, 13: 7057-7062.
- Frery, A. C.; Mascarenhas, N. D. **Segmentação binária de imagens SAR pelo algoritmo ICM**. São José dos Campos, INPE. 1993.
- Frery, A. C.. **Algumas ferramentas estatísticas na síntese, processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética**. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- Gonçalves, F. G. **Avaliação de Dados SAR Polarimétricos para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais**. 2007. 109 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos: INPE, 2007.
- Gualberto, L. P. S.; Souza Filho, P. W. M. Reconhecimento de Ambientes Costeiros a partir de Análise Textural de Imagens SAR R99B (Banda L, Polarização VV). In: **Simp. Bras. de Sens. Rem.**, Florianópolis, INPE, 2007, 13: 4889-4896.
- Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998, 866 p.
- Imhoff, M. L.; Story, M.; Vermillion, C.; Kahn, F.; Polcyn, F. Forest canopy characterization and vegetation penetration assessment with space-borne radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 24, n. 4, 1986. p. 535-542.
- Landis, J. R.; Koch, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, 1977, p. 159-174.
- Mather, P.M. Land cover classification revisited. In **Advances in Remote Sensing and GIS**, Atkinson, P.M., Tate, N.J., Eds.; John Wiley & Sons: New York, 1999. p. 7-16.
- Miranda, F. P.; Beisl, C. H.; Camargo, E. C. G. (2007). Textural classification of R99SAR data as an aid to flood mapping in Coari City, Western Amazon Region, Brazil. In: **Simp. Bras. de Sens. Rem.**, Florianópolis, INPE. 13: 4935-4942.
- Nunes, G.M. **Sensoriamento Remoto Aplicado na Análise da Cobertura Vegetal das Reservas de Desenvolvimento Sustentável Amanã e Mamirauá**. 2008. Instituto de Geociências/UNICAMP, Campinas. Tese de Doutorado, 2008, 176 p.
- Schowengerdt, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.
- SIPAM. **ProAE - Programa de Monitoramento de Áreas Especiais Identificação do desmatamento nas Terras Indígenas e Unidades de Conservação dos estados do Acre, Mato Grosso e Rondônia – Relatório Técnico**, Centro Técnico Operacional de Porto Velho, Divisão de Monitoramento do Território, Porto Velho-RO, SIPAM/CTO-PV - ProAE CD-ROM. 2007.
- Sun, G.; Ranson, K. J. Modeling lidar and radar returns of forest canopies for data fusion. 2002. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toronto, Canada. Proceedings... Toronto: IEEE, 2002. p. 1387-1389
- Vieira, P. R. **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. 1996. Dissertação (Mestrado), Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1996.
- Ulaby, F. T.; Elachi, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech House, 1990. 364p.
- Wang, Y.; Hess, L. L.; Filoso, S.; Melack, J. M. Canopy penetration studies: modeled radar backscatter from Amazon floodplain forests at C-, L-, and Pband. In: 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, August, 8-12, 1994. Surface and atmospheric remote sensing: technologies, data analysis and interpretation. **Proceedings. IGARSS'94**. Pasadena, 1994. p. 1060-1062.