

APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO DA REGIÃO AMAZÔNICA

Bruno Rodrigues do Prado ¹
Erick Sobreiro Gonçalves ²
Marta Eichemberger Ummus ¹
Tessio Novack ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{prado, marta, tessio}@dsr.inpe.br

² Fundação Getúlio Vargas - FGV
01332-000 - São Paulo - SP, Brasil
erick.sobreiro@gmail.com

A Floresta Amazônica concentra grande parte da biodiversidade e dos recursos hídricos do planeta, mas vindo sofrendo impactos antrópicos contínuos causados pela ocupação e exploração antrópica desordenada da região. Compreender e monitorar as alterações na cobertura da terra e os processos de desflorestamento na Amazônia são atividades fundamentais para a preservação da biodiversidade local e a contenção de impactos ambientais e sociais decorrentes desses processos. Por se tratar de uma extensa região, de difícil acesso, o sensoriamento remoto é a ferramenta mais eficiente para a aquisição sistemática de dados, de modo a avaliar e monitorar os processos que acontecem nesse ambiente. A integração de dados adquiridos por diferentes sistemas de sensoriamento remoto incrementa a capacidade de monitoramento desse ambiente, pois a utilização de imagens orbitais geradas por sensores ópticos é limitada em florestas tropicais. As imagens geradas na região do espectro eletromagnético das microondas são fundamentais, pois praticamente não sofrem interferências atmosféricas, permitindo a aquisição de dados independentemente das condições do tempo. Tal característica é particularmente importante em ambientes de floresta tropical, onde a cobertura de nuvens é intensa em grande parte do ano. Imagens produzidas por sensores radar ainda podem gerar estimativas de biomassa florestal, identificando diferentes estágios das formações vegetais. Com o objetivo de monitorar as alterações na cobertura do solo da Amazônia foram concebidos projetos como o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) e o Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER), ambos conduzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Diversos trabalhos também buscam entender a dinâmica de uso e ocupação do solo e monitoram os recursos naturais da região, acompanhando a evolução das florestas tropicais primárias, sucessões florestais secundárias, desmatamento seletivo, floresta degradada, cerrados e corpos de água naturais e artificiais.

Palavras-chave: Desmatamento, Amazônia, Sensoriamento Remoto.

The Amazonian Forest concentrates great part of the biodiversity and of the resources hídricos of the planet, but endure continuous impacts caused by the occupation and exploration disordered. To understand and to monitor the alterations in the covering of the earth and the deforestation processes in the Amazonian are fundamental activities for the preservation of the local biodiversity and the contention of environmental and social impacts. For treating of an extensive area, of difficult access, the remote sensing is the most efficient tool for the systematic acquisition of data, in way to evaluate and to monitor the processes that happen in that environment. The integration of acquired data for different systems of remote sensing increases the capacity of attendance, because the use of orbital images generated for sensor optical it is limited at tropical forests. The images generated in the area of the electromagnetic spectrum of

the microwaves are fundamental, because practically they don't suffer atmospheric interferences, allowing the acquisition of data independently of the conditions of the weather. It is particularly important in atmospheres of tropical forest, where the covering of clouds is intense in a large part of the year. Images produced by sensor radar can still generate estimates of forest biomass, and identifying different kinds of the vegetable formations. With the objective of monitoring the alterations in the covering of the soil of the Amazonian were conceived projects as the Program of Calculation of the Deforestation of the Amazonian (PRODES) and the Project of Detection of Areas Deforested in Real Time (DETER), both driven by the National Institute of Space (INPE) Researches. Several works also look for to understand the use dynamics and occupation of the soil and they monitor the natural resources of the area, accompanying the evolution of the primary tropical forests, secondary forest successions, selective deforestation, degraded forest, savannahs and natural and artificial bodies of water.

Keywords: Deforestation, Amazon region, Remote Sensing.

1. INTRODUÇÃO

A compreensão e o monitoramento na mudança da cobertura da terra e dos processos de desflorestamento, principalmente em regiões tropicais, são fundamentais devido as evidências que remetem essas modificações aos acréscimos na emissão de gases do efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂), e a consequente mudança climática relacionada (CARREIRAS et al., 2006). Essas modificações na superfície ainda provocam redução da biodiversidade e impactos profundos sobre os ecossistemas locais, degradam os solos, criam tensões sociais e profundas alterações nos ciclos hidrológicos desses ambientes (FEARNSIDE, 2005; VIEIRA et al., 2005).

As florestas da Amazônia brasileira foram submetidas a mudanças importantes através das últimas décadas devido à ocupação humana (Alves et al., 1999). O rápido avanço do desmatamento iniciou-se na década de 70 e se seguiu entre 1970 e 1980, motivado por políticas governamentais que incluíam a construção de extensas redes de estradas, e a apropriação de faixas de 100 km ao longo das principais vias. Tal iniciativa tinha como objetivo empreender e suportar a migração e ocupação em direção às áreas florestadas inabitadas (Fearnside, 2005; Becker, 1998). Com a suspensão dos incentivos a partir da década de noventa as causas do desmatamento na Amazônia Legal (AML) mudaram, estando atualmente associadas à oscilação da economia e uso da terra. Tais fatos são importantes, pois relatam uma mudança das causas de desmatamento atuais em relação ao que era observado nos anos setenta e oitenta.

O sensoriamento remoto desempenha importante papel para o monitoramento da floresta amazônica, pois com sua utilização pode-se mapear a cobertura do solo e analisar em múltiplas escalas a ocupação da superfície. Com o emprego desse tipo de procedimento criam-se condições para o acompanhamento sistemático das alterações

impostas pelo uso e ocupação da terra, auxiliando a compreensão da dinâmica envolvida pela pressão antrópica nessa região.

A Amazônia Legal (Figura 1) abrange todos os estados da macroregião norte do país (Roraima, Amazonas, Pará, Acre, Amapá, Rondônia e Tocantins), Mato Grosso e parte do estado do Maranhão (área localizada a oeste do meridiano de 44° W). Com cerca de 5,2 milhões de Km², dos quais aproximadamente 83% ainda preservados, a região está sujeita a um preocupante processo de ocupação e exploração (MESQUITA JÚNIOR et al., 2007).

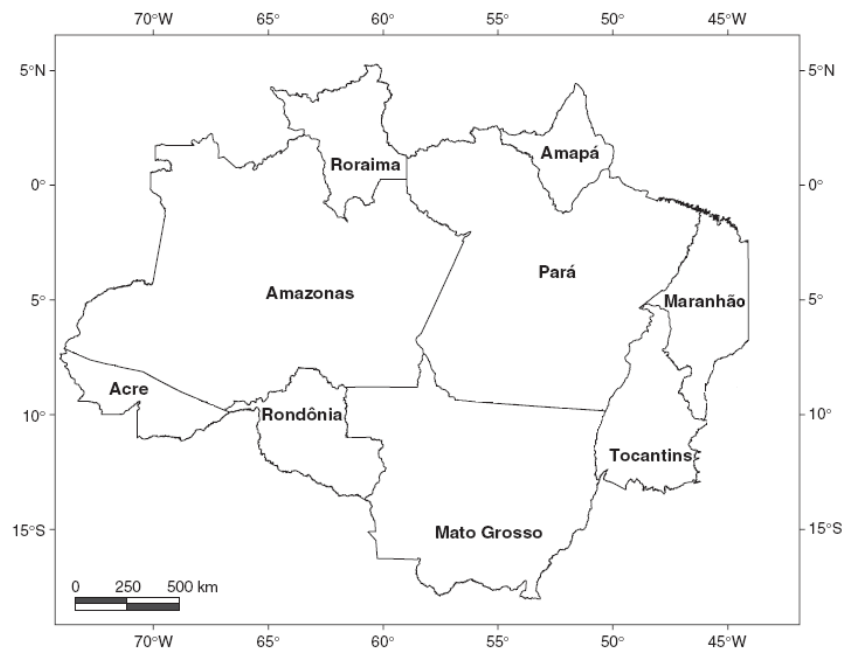


Figura 1 - Região abrangida pela Amazônia Legal.

Fonte: Adaptado de Carreiras et al. (2006).

Os maiores domínios biogeográficos encontrados na Amazônia são a floresta tropical primária (floresta ombrófila e sazonal), que abrange aproximadamente 65% da região, e o cerrado, que compreende cerca de 15% da área. O restante, cerca de 20%, referem-se a transição entre florestas, e em menor escala as pastagens e a agricultura (CARREIRAS et al., 2006). De um modo geral, a floresta tropical se concentra na porção central, norte e oeste da Amazônia, enquanto o cerrado se estende ao sul e ao leste, principalmente nos estados de Mato Grosso e Tocantins.

2. DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

O termo desflorestamento, de acordo com Alves (2001), pode ser definido como a atividade de derrubada de áreas de florestas pelo homem. Por sua vez, o conceito de desmatamento é mais genérico, podendo ser empregado a derrubada de florestas e

outros tipos de vegetação. Atualmente, cerca de 17% da cobertura vegetal original da Amazônia foi desmatada, com taxa projetada de área desflorestada para o ano de 2007 em 11224 Km². Os valores de desflorestamento da Amazônia Legal, para os anos de 2005 e 2006, foram estimados em 18759 Km² e 14039 Km² respectivamente (INPE, 2008).

Em geral o processo de desmatamento é iniciado com a abertura de estradas oficiais ou clandestinas, permitindo a ocupação irregular das terras e a expansão humana. Em seguida, as áreas próximas dessas vias são convertidas em pastagens para o gado, cultivos de grãos ou, em menor escala, para agricultura familiar (Figura 2). Recentemente, há uma tendência de conversão das áreas de pastagens para a implantação de agricultura mecanizada (FERREIRA et al., 2005).



Figura 2 - Principais formas de desmatamento na Amazônia.

- (A) Estradas e vias de circulação;
- (B) Extração madeireira;
- (C) Pastagens e pecuária;
- (D) Práticas agrícolas

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2005).

De acordo com Morton et al. (2006) e Alencar et al. (2004), a recente expansão da agricultura mecanizada nas fronteiras de floresta tropical e de cerrado tem introduzido uma aceleração nos processos de desflorestamento, evidenciando a contribuição do crescimento da produção agrícola nessa região para a degradação ambiental. Além da intensificação da agricultura, Anderson et al. (2003) apresenta uma série de fatores que também atuam como agentes potenciais para a mudança da cobertura da terra na

Amazônia, como por exemplo, as queimadas, o desmatamento madeireiro seletivo e a pavimentação de estradas. Empreendimentos de infra-estrutura que incentivam as atividades agrícolas na região, promovendo uma redução no custo do transporte de produtos agrícolas também promovem aceleração nos processos de desmatamento.

Como o desmatamento é um processo complexo outros fatores também são relevantes para promover ou inibir esse processo. A pressão populacional, a existência e proximidade de áreas de proteção ambiental, o modelo de colonização e fatores biofísicos, como fertilidade dos solos e precipitação pluviométrica, também contribuem para determinar os padrões de desflorestamento na AML (AGUIAR, 2006; KIRBY et al., 2006).

A maioria das áreas desmatadas na Amazônia se concentra na região conhecida como Arco do Desflorestamento (Figura 3). Essa região apresenta uma forte relação entre o padrão de ocupação do solo com os projetos de infra-estrutura, centros urbanos, atividades econômicas e com os pólos de colonização e desenvolvimento (AGUIAR, 2006; BECKER, 2005). Os estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Maranhão possuem parte de seus territórios dentro do Arco do Desflorestamento.

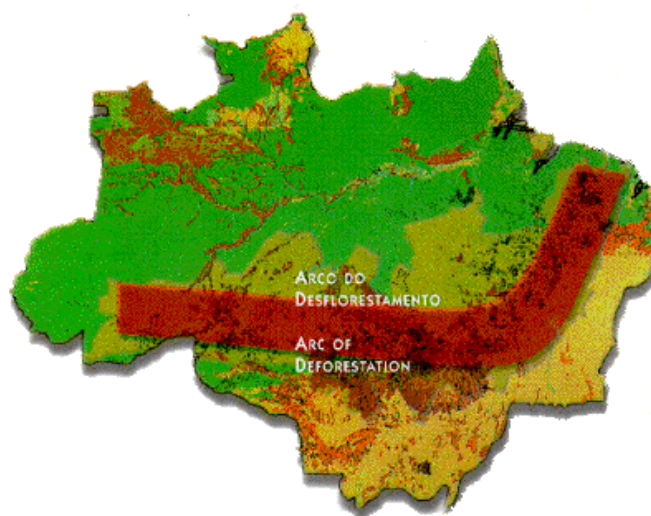


Figura 3 - Região do Arco do Desflorestamento.

Fonte: Adaptado de IBAMA (2008).

Com o objetivo de monitorar as alterações na cobertura do solo da Amazônia foram concebidos projetos como o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) e o Projeto de Detecção de Áreas Desflorestadas em Tempo Real (DETER), ambos conduzidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (SHIMABUKURO et al., 2005, 2007a; CÂMARA et al., 2006; INPE, 2002). Vale

mencionar também o Programa de Experimento em Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), iniciativa internacional de pesquisa conduzida pelo Brasil com o objetivo de estudar a função da região amazônica como parte integrante do sistema Terra, analisando as mudanças na cobertura do solo, e os conseqüentes impactos gerados.

Vários estudos também buscam entender a dinâmica de uso e ocupação do solo e monitoram os recursos naturais da região, acompanhando a evolução das florestas tropicais primárias, sucessões florestais secundárias, desmatamento seletivo, floresta degradada, cerrados e corpos de água naturais e artificiais (LU et al., 2003, 2007; ROBERTS et al., 2003; VIEIRA et al., 2003).

3. SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA VEGETAÇÃO

As técnicas de sensoriamento remoto obtêm informações provenientes da cobertura vegetal através da análise da interação entre a radiação eletromagnética e a própria vegetação. Entretanto, por apresentar grande heterogeneidade, o comportamento espectral da vegetação acaba sendo condicionado por uma série de fatores intrínsecos as formações vegetais (JENSEN, 2007; PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Os sistemas baseados em sensoriamento remoto óptico utilizam a radiação eletromagnética (REM) que foi emitida ou refletida pelos diferentes alvos da superfície para a geração de dados. De acordo com Ponzoni (2001), no processo de interação entre a REM e a vegetação, os principais fatores de influência são a composição química das folhas, a fisiologia vegetal, a umidade, e os tipos fisionômicos dos dosséis. Cada um desses parâmetros tem comportamento diferenciado e predominante nas diferentes regiões abrangidas pelo espectro óptico (visível, infravermelho próximo, médio e distante). Desse modo, aspectos da cobertura vegetal em imagens de sensoriamento remoto óptico são resultados de processos complexos que abrangem vários parâmetros e fatores ambientais.

Em uma folha fotossinteticamente ativa é possível observar baixos valores de reflectância na região visível do espectro, resultado da absorção de radiação pela ação de pigmentos fotossintetizantes que utilizam essa parcela de energia para a realização de fotossíntese. Na região do infravermelho próximo (IVP) são encontrados os maiores valores de reflectância, com um decréscimo gradual desses valores na região do infravermelho médio (IVM), localizados em comprimentos de onda superiores a 1,3 μm , gerando picos de absorção próximos a 1,4 μm e 1,9 μm (MOREIRA, 2003).

O sensoriamento remoto óptico pode ser amplamente empregado no estudo, monitoramento e mapeamento da cobertura da terra e do uso do solo na Amazônia. Através da geração e uso de imagens orbitais pode-se avaliar a extensão e a dinâmica do desmatamento, da agropecuária, das pastagens, queimadas e dos processos de sucessão florestal existentes, obtendo dados de maneira sistemática em diferentes resoluções e regiões do espectro eletromagnético (ROSENQVIST et al., 2003).

Informações sobre a vegetação também podem ser adquiridas através da utilização de sensores SAR (Synthetic Aperture Radar). Os instrumentos SAR são sensores ativos e baseiam-se na utilização da energia transmitida na região do espectro eletromagnético das microondas. Esses sensores têm a capacidade de operar em diferentes bandas (Tabela 1), sendo o registro do sinal de retorno determinado pelas características dos alvos, superfície imageada e pelo modo como ocorre a interação da REM (JENSEN, 2007; MATHER, 1999).

Tabela 1 - Principais bandas dos sensores de microondas

Banda	λ (cm)	f (GHz)
P	77 – 136	0,22 – 0,39
L	15 – 30	1,0 – 2,0
S	7,50 – 15	2,0 – 4,0
C	3,75 – 7,50	4,0 – 8,0
X	2,40 – 3,75	8,0 – 12,5
Ku	1,67 – 2,40	12,5 – 18,0
K	1,18 – 1,67	18,0 – 26,50

Fonte: Adaptado de Leckie e Ranson (1998).

Os sensores ativos não dependem da energia eletromagnética proveniente do Sol ou da energia termal emitida pelos objetos. A radiação emitida pelos sensores SAR praticamente não sofre interferência de fatores atmosféricos como nuvens ou poeira, permitindo assim o imageamento em condições meteorológicas adversas (LECKIE; RANSON, 1998). Desse modo, dados gerados por sensores SAR são de grande utilidade em ambientes tropicais em decorrência da intensa cobertura de nuvens presentes nessas regiões em grande parte do ano (SANO et al., 2007; ASNER, 2001).

Dentre os parâmetros importantes para o imageamento SAR podemos destacar o ângulo de depressão (γ) e o ângulo de incidência (θ) (Figura 4), a polarização e a banda de imageamento.

O ângulo de depressão é o ângulo formado entre a linha horizontal plana a partir do sensor e a linha descrita pelo pulso eletromagnético. O ângulo de incidência é o ângulo

formado entre a direção de observação e uma linha perpendicular com a superfície (normal). A polarização se refere à orientação do vetor elétrico de uma onda eletromagnética, sendo definida pela antena e podendo ser ajustada para ser diferenciada na transmissão e recepção. A banda de imageamento se refere ao comprimento de onda do pulso eletromagnético utilizado pelo radar (JENSEN, 2007; ANDRADE et al., 2007; MATHER, 1999).

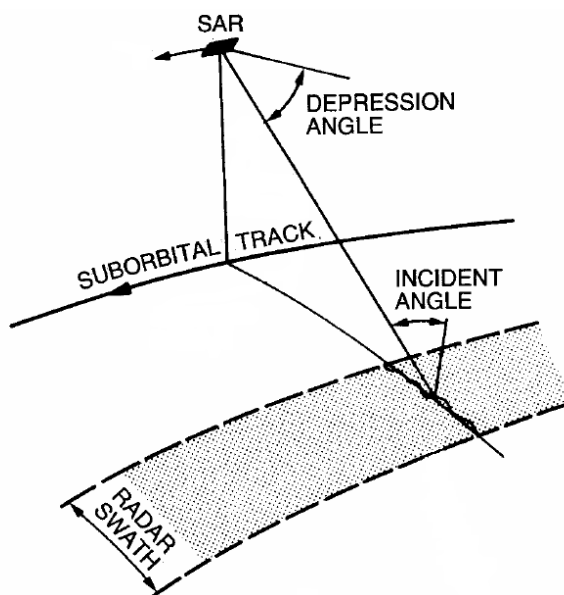


Figura 4 - Ângulo de depressão e ângulo de incidência no imageamento SAR.
Fonte: Adaptado de Kuplich (2001).

Diversos fatores condicionam a interação entre as formações vegetais e o imageamento por radar. A estrutura geométrica e outros parâmetros intrínsecos da vegetação produzem sinais diferenciados de retorno, gerando assim distinções nas imagens. Desse modo, a magnitude do retroespalhamento é determinada em função das características dos parâmetros do radar e da superfície imageada. O retroespalhamento pode ser definido como a parcela de energia eletromagnética que é refletida pelos elementos de uma cena e retorna para o radar. É assim definido para diferenciar a energia espalhada aleatoriamente e a energia que retorna ao radar e que pode ser registrada pelo sensor. Quando se quer estimar o retroespalhamento em função da área imageada é utilizado o coeficiente de retroespalhamento (σ^0) (CCRS, 2008; KUPLICH, 2003).

De acordo com Dobson et al. (1995), os principais fatores relacionados a interação entre o imageamento SAR e as florestas são a textura do dossel e do solo, a macrotopografia, a umidade do solo e da vegetação e a estrutura das formações vegetais. Os principais parâmetros SAR que condicionam essa interação são o ângulo de incidência, a polarização e a banda utilizada.

Uma floresta será representada em uma imagem SAR através da combinação das respostas geradas por diferentes mecanismos de espalhamento, incluindo fatores como a contribuição direta do solo, dos troncos e galhos, da copa das árvores, da interação entre a copa e o solo e também pela reflexão dupla entre o tronco e o solo (LECKIE; RANSON, 1998).

3.1. MONITORAMENTO DA AMAZÔNIA LEGAL

Diversos sensores, composições multitemporais e técnicas de classificação estão sendo utilizados para caracterizar e monitorar a cobertura e o uso do solo na região da AML.

Dados provenientes do sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR) foram utilizados Lucas et al. (2000) e por Achard et al. (2001) para mapear os estágios de sucessão secundária na Amazônia Legal, apoiados em algoritmos de classificação supervisionada. Esse mesmo sensor também foi empregado por Rodríguez-Yi et al. (2000) para a realização de classificações supervisionadas de classes de vegetação no estado do Mato Grosso.

No estado de Rondônia, Kimes et al. (1999) utilizou dados do sensor High Resolution Visible (SPOT/HRV) para o mapeamento de áreas de desflorestamento, florestas primárias e diversas classes de regeneração florestal, utilizando funções de discriminação linear e redes neurais. Dados multiespectrais do satélite SPOT-4, com 20 m de resolução espacial, também foram empregados para o mapeamento da vegetação na Amazônia Legal. Tais informações foram utilizadas para o mapeamento de áreas vegetais ainda intactas, áreas degradadas de florestas e sucessão florestal secundária no estado do Pará (SOUZA et al., 2003). Classes de cobertura do solo no estado do Mato Grosso, incluídos nos domínios fitofisionômicos da Amazônia, foram mapeadas por Carreiras et al. (2006), utilizando dados do sensor Vegetation (SPOT/VGT).

Mudanças na vegetação e na cobertura do solo da Amazônia também foram registradas a partir de dados do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat. Com informações desse sensor foram mapeados, a partir de classificações supervisionadas, diferentes estágios de regeneração florestal no estado do Amazonas (ADAMS et al., 1995; FOODY et al., 1996). Dados do sensor Landsat/TM também foram empregados por Lu et al. (2003) para o mapeamento da vegetação amazônica primária e de estágios de sucessão secundária desse mesmo domínio fitogeográfico existente no estado de Rondônia. Para tanto, foi utilizada uma combinação de classificadores de máxima probabilidade e Modelo Linear de Mistura Espectral. Vale

ressaltar que o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais também utiliza dados provenientes do sensor Landsat/TM para fornecer, anualmente, um mapeamento do desflorestamento na AML.

Do mesmo modo, Vieira et al. (2003) realizou o mapeamento de diferentes estágios de regeneração florestal em áreas de sucessão (áreas desflorestadas abandonadas) no estado do Pará, utilizando-se de dados obtidos pelo sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), a bordo do satélite Landsat 7.

O sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), instrumento integrante do satélite Terra, também foi empregado por Morton et al. (2006) para o mapeamento das classes de cobertura do solo no estado do Mato Grosso. Foram empregados dados com 250 m de resolução espacial, juntamente com um classificador desenvolvido.

As imagens obtidas pelos sensores Wide Field Imager (CBERS/WFI) e Couple Charged Device (CBERS/CCD) também são utilizados para o monitoramento da vegetação na região amazônica. Esses instrumentos, a bordo do China Brazil Earth Resources Satellite (CBERS), dispõem de um amplo catálogo de imagens disponibilizadas com diferentes resoluções espectrais e espaciais.

Apesar dos inúmeros sensores ópticos utilizados para os trabalhos de monitoramento da cobertura da terra na AML não se pode apontar um instrumento como sendo ideal. A escolha deve ser parametrizada por uma série de variáveis, como por exemplo, a definição da escala de trabalho, a resolução temporal e espectral, a política de aquisição das imagens etc.

Dados gerados por sensores SAR também estão sendo empregados para o mapeamento do uso e ocupação da terra e para identificação de desmatamento, inclusive na Amazônia (ALMEIDA-FILHO et al., 2007, 2005a, 2005b; SHIMABUKURO et al., 2007b; THIEL et al., 2006). Resultados comprovam que as informações produzidas pelas imagens SAR auxiliam na identificação das modificações produzidas na cobertura do solo. Entretanto, dados gerados em polarização paralela (HH e VV) podem ser limitados para detecção de algumas feições. Nesse sentido, a utilização de polarização cruzada (HV e VH) pode oferecer uma maior potencialidade para a discriminação de modificações na superfície, inclusive padrões de alterações proporcionados pelos eventos de desflorestamento (ALMEIDA-FILHO et al., 2007, 2005a; HOEKMAN; QUIÑONES, 2002).

A possibilidade de incremento de informações com a utilização de polarização cruzada em áreas de desflorestamento existe em função da sensibilidade dessa

polarização para identificar o retroespalhamento volumétrico que ocorre nos interior das copas e o baixo retroespalhamento gerado pelo solo exposto ou coberto por vegetação baixa (SAATCHI et al., 1997).

Nesse sentido, a integração de dados SAR e ópticos pode ser empregada de modo complementar, fornecendo uma possibilidade mais abrangente para a identificação dos elementos necessários ao mapeamento do uso e ocupação da terra, inclusive eventos de desflorestamento. Vale destacar também que os dados obtidos pelos sensores de radar são diferentes dos detectados pelos sensores ópticos, disponibilizando informações diferenciadas e complementares. Além disso, essa interação de dados proporciona um aumento da acurácia no processamento de classificação do uso e cobertura da terra em regiões florestais (LU et al., 2007; LIMPITLAW; GENS, 2006).

4. CONCLUSÕES

O monitoramento sistemático e contínuo das alterações da cobertura vegetal na região amazônica, através de dados de sensoriamento remoto, tem papel fundamental na compreensão das dinâmicas envolvidas no estabelecimento da pressão antrópica nesta região. O trabalho apresentou algumas experiências e metodologias empregadas no processamento digital de imagens de sensores remotos para essa finalidade, bem como os sensores mais utilizados.

Os resultados indicam que uma solução integrada, combinando dados provenientes de diferentes sensores, figura como a solução mais adequada para o monitoramento das alterações da cobertura do solo nessa região.

Nesse sentido, o sensoriamento remoto permite o mapeamento das diferentes classes de cobertura da superfície, auxiliando na avaliação dos impactos do uso da terra e na mudança da cobertura do solo. Geram-se também informações necessárias para a identificação de áreas prioritárias a conservação e a própria projeção de impactos futuros.

5. BIBLIOGRAFIA

ACHARD, F.; EVA, H. D.; MAYAUX, P. Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data: Production and accuracy assessment issues. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 14, p. 2741-2762, 2001.

ADAMS, J. B.; SABOL, D. E.; KAPOV, V.; ALMEIDA FILHO, R.; ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O.; et al. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, n. 52, v. 2, p. 137-154, 1995.

- AGUIAR, A. P. D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intra-regional**. 2006. 204 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.
- ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; MOUTINHO, P.; PACHECO, P.; DIAZ, M.D.C.V.; SOARES-FILHO, B. **Desmatamento na Amazônia: indo além da "emergência crônica"**. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), 2004. 85 p.
- ALMEIDA-FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; DOS SANTOS, J. R. Evaluation and perspectives of using multitemporal L-band SAR data to monitor deforestation in the Brazilian Amazônia. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 4, p. 409-412, 2005a.
- ALMEIDA-FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y.E.; SANTOS, J.R. Evaluation of multi-temporal JERS-1 SAR images as an operational mean to monitor deforestation in the Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005b, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4371-4378.
- ALMEIDA-FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA-GOMEZ, R. Detecting deforestation with multitemporal L-band SAR imagery: a case study in western Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 1383-1390, 2007.
- ALVES, D. S.; PEREIRA, J. L. G.; SOUSA, C.L.D.; SOARES, J. V.; YAMAGUCHI, F. Characterizing landscape changes in central Rondônia using Landsat TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n. 14, p. 2877-2882, 1999.
- ALVES, D.S. O processo de desmatamento na Amazônia. **Parcerias estratégicas**, v. 12, p. 259-275, 2001.
- ANDRADE, N.S.O.; ROSA, A.N.C.; FARIA, P.C.C. Fundamentos de polarimetria SAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4775-4782.
- ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 19-25.
- ASNER, G.P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3855-3862, 2001.
- BECKER, B. K. **Amazônia**. São Paulo: 3.ed. Ática, 1998. 112p.
- _____. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.
- CÂMARA, G.; VALERIANO, D. D. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006, 22 p.
- CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; CAMPAGNOLO, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E. Assessing the extent of agriculture/pasture and secondary succession forest in the Brazilian Legal Amazon using SPOT VEGETATION data. **Remote Sensing of Environment**, n. 101, p. 283-298, 2006.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS). Natural Resources Canada. **Tutorial: Radar Remote Sensing**. Disponível em:

<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/index_e.php>. Acesso em 07 de jan. 2008.

DOBSON, C. M.; ULABY, F. T.; PIERCE, L. E. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n.1, p. 199-214, 1995.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e conseqüências. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 113-123, 2005.

FERREIRA, L.V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FOODY, G. M.; PALUBINSKAS, G.; LUCAS, R. M.; CURRAN, P. J.; HONZÁK, M. Identifying terrestrial carbon sinks: Classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, n. 55, p. 205-216, 1996.

HOEKMAN, D.H.; QUIÑONES, M.J. Biophysical forest type characterization in the Colombian Amazon by airborne polarimetric SAR. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 40, n. 6, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Programa de prevenção e controle de queimadas e incêndios florestais na Amazônia Legal**. Disponível em:

<<http://www.ibama.gov.br/proarco/apresentacao.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da floresta amazônica por satélite**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: 2000 - 2001, 2002. (INPE-293064-FOLH/3159).

_____. **Projeto PRODES - Monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite**. 2008. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes>>. Acesso em: 21 jan. 2008.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: An earth resource perspective**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2007. 592p.

KIMES, D. S.; NELSON, R. F.; SALAS, W. A.; SKOLE, D. L. Mapping secondary tropical forest and forest age from SPOT HRV data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 18, p. 3625-3640, 1999.

KIRBY, K. R.; LAURANCE, W. F.; ALBERNAZ, A. K.; SCHROTH, G.; FEARNSIDE, P. M.; BERGEN, S.; VENTICINQUE, E. M.; COSTA, C. D. The future of deforestation in the Brazilian Amazon. **Futures**, v. 38, n. 4, p.432-453, 2006.

KUPLICH, T.M. **Temporal, spatial, spectral and polarisation characteristics of the SAR backscatter from regenerating tropical forests**. 2001. 216p. Doctor of Philosophy - University of Southampton, Southampton. 2001.

_____. Estudos florestais com imagens de radar. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 71-96, 2003.

LECKIE, D. G.; RANSON, K. J. Forestry Applications of Imaging Radar. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Ed.) **Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar**. New York: American Society for Photogrametry and Remote Sensing, 1998, cap. 9, p. 435-511.

LIMPITLAW, D.; GENS, R. Dambo mapping for environmental monitoring using Landsat TM and SAR imagery: Case study in the Zambian Copperbelt. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 21, p. 4839–4845, 2006.

LU, D.; MORAN, E.; BATISTELLA, M. Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 456-469, 2003.

LU, D.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Land-cover classification in the Brazilian Amazon with the integration of Landsat ETM+ and Radarsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p. 5447–5459, 2007.

LUCAS, R. M.; HONZÁK, M.; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M.; MILNE, R.; BROWN, T.; et al. Mapping the regional extent of tropical forest regeneration stages in the Brazilian legal Amazon using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 15, p. 2855-2881, 2000.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed images: an introduction**. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292p. ISBN (0-471-98550-3).

MESQUITA JÚNIOR, H. N.; SILVA, M. C.; WATANABE, N. Y.; ESTEVES, R. L. Aplicações de sensoriamento remoto para o monitoramento do desmatamento da Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6835-6842.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2003. 307p.

MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O.; ARAI, E.; ESPIRITO-SANTO, F. B.; FREITAS, R.; MORISETTE, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 39, p. 14637-14641, 2006.

PONZONI, F.J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. cap. 5, p. 157-222.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 1. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 135 p.

ROBERTS, D. A.; KELLER, M.; SOARES, J. V. Studies of land-cover, land-use, and biophysical properties of vegetation in the Large Scale Biosphere Atmosphere experiment in Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 377-388, 2003.

RODRÍGUEZ-YI, J. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; RUDORFF, B. F. T. Image segmentation for classification of vegetation using NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 167-172, 2000.

ROSENQVIST, A.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, v. 6, n. 5, p. 441-455, 2003.

SAATCHI, S. S.; SOARES, J. V.; ALVES, D. S. Mapping deforestation and land use in Amazon rain forest by using SIR-C imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 191-202, 1997.

- SANO, E.E.; FERREIRA, L.G.; ASNER, G.P.; STEINKE, E.T. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Brazilian tropical savanna. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 12, p. 2739-2752, 2007.
- SHIMABUKURO, Y.E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M.A.; ARAI, E.; RUDORFF, B.F.T.; ANDERSON, L.O.; SANTO, F.D.B.; FREITAS, R.M. DE; AULICINO, L.C.M.; MAURANO, L.E.P.; ARAGÃO, J.R.L. DE. **Deteção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do projeto DETER**. São José dos Campos: INPE, 2005. 63 p. (INPE-12288-RPE/796).
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T.; ANDERSON, L. O.; FREITAS, R. M.; LIMA, A.; ARAGÃO, J. R. L. **Deteção de áreas desflorestadas em tempo real (PROJETO DETER) para os anos de 2005 e 2006**. São José dos Campos: INPE, 2007a. 57 p. (INPE-14784-RPQ/810).
- SHIMABUKURO, Y.E.; ALMEIDA-FILHO, R.; KUPLICH, T.M.; FREITAS, R.M. Quantifying optical and SAR image relationships for tropical landscape features in the Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 17, p.3831-3840, 2007b.
- SOUZA, JR., C.; FIRESTONE, L.; MOREIRA SILVA, L.; ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the eastern Amazon from SPOT 4 through spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 494-506, 2003.
- THIEL, C.; DREZET, P.; WEISE, C.; QUEGAN, S.; SCHUMULLIUS, C. Radar remote sensing for the delineation of forest cover maps and the detection of deforestation. **Forestry**, v. 79, n. 5, p. 589-597, 2006.
- VIEIRA, I. C. G.; ALMEIDA, A. S.; DAVIDSON, E. A.; STONE, T. A.; CARVALHO, C. J. R.; GUERRERO, J. B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 470-481, 2003.
- VIEIRA, I.C.G.; SILVA, J.M.C.; TOLEDO, P.M. Estratégias para evitar a perda de biodiversidade na Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 153-164, 2005.