

ESTUDOS FLORESTAIS COM IMAGENS DE RADAR

Tatiana Mora Kuplich

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil.

tmk@dsr.inpe.br

Recebido 23 de outubro de 2002; revisado 28 de janeiro de 2003; aceito 28 de fevereiro de 2003

RESUMO – Informações sobre o estado e extensão da cobertura vegetal do planeta podem ser fornecidas através de produtos de sensoriamento remoto. Imagens SAR (Synthetic Aperture Radar - radar de abertura sintética), por não serem suscetíveis a condições atmosféricas, resolvem o problema da cobertura de nuvens em imagens adquiridas remotamente e têm sido utilizados de maneira crescente no estudo de florestas. Este artigo apresenta uma introdução aos fundamentos do sensoriamento remoto por radar, seguidos por uma revisão de artigos que tratam das aplicações de imagens SAR no mapeamento de tipos florestais, assim como nos inventários e estimativas de biomassa florestal. Os sistemas SAR orbitais passados, atuais e planejados são apresentados, juntamente com uma tentativa de estabelecer as possibilidades futuras no estudo de florestas por radar.

Palavras-Chave – floresta, mapeamento, inventário, imagens de radar, SAR.

ABSTRACT - Remote sensing products provide information about the status and coverage of Earth's land surface vegetation. SAR (Synthetic Aperture Radar) systems are active sensors that provide cloud-free images suited for forest studies. This article presents an introduction to radar fundamentals, followed by a non exhaustive review of articles covering forest mapping, inventory and biomass estimation with SAR images. To conclude, past, recent and planned orbital SAR systems are presented as a guide to the future directions of forest studies with radar data.

Keywords: forest, mapping, inventory, radar images, SAR.

INTRODUÇÃO

As recentes preocupações mundiais com o estado e conservação dos ecossistemas terrestres, assim como o acompanhamento das funções vitais destes sistemas, têm gerado estudos em escala global. A observação da Terra por sensores a bordo de satélites possibilitou importantes avanços nos métodos e eficiência do mapeamento e monitoramento dos ecossistemas terrestres, notadamente através de suas coberturas vegetais. A possibilidade de obtenção de dados em diferentes faixas do espectro eletromagnético e a integração, através de modelos, com dados obtidos no campo, abriu uma nova fase do conhecimento sobre o estado da biosfera (Aber e Mellilo 2001).

Dados de sensores que atuam na faixa ótica do espectro eletromagnético têm sido utilizados no mapeamento e monitoramento de diferentes formações vegetais. O projeto PRODES (Projeto Desmatamento) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), por exemplo, promove anualmente, desde 1988, o mapeamento e quantificação das áreas desmatadas na Amazônia brasileira baseado em imagens do sensor TM (Thematic Mapper) a bordo dos satélites Landsat. Imagens de sensores óticos e termiais também têm sido usadas para detecção e monitoramento de incêndios florestais (Pereira Jr e Setzer 1996), áreas queimadas (França e Setzer 2001), identificação de espécies em áreas reflorestadas (Shimabukuro *et al.* 1980) e estimativa de idades de capoeiras na Amazônia (Sant'Anna *et al.* 1995), só para citar algumas aplicações.

A cobertura de nuvens, entretanto, limita o estudo da vegetação através de dados de sensores remotos óticos ou termiais, principalmente em regiões tropicais.

Além disto, a interação da radiação e vegetação registrada nas imagens limita a análise às camadas superiores do dossel florestal, dificultando a estimativa de variáveis biofísicas relacionadas à estrutura vertical da floresta.

Desde a década de 1960 os dados de radar têm sido reconhecidos como úteis para aplicações militares em regiões tropicais. A liberação dos dados de radar para uso civil, nos anos 70, possibilitou a realização de projetos como o RADAMBRASIL e o PRORADAM, na Colômbia, onde imagens de radar aerotransportado foram utilizadas para mapeamentos geológicos e de vegetação, entre outros.

Como sistemas ativos, os radares operam com a transmissão e recepção de microondas, capazes de atravessar nuvens e chuva, e, em determinadas condições, dosséis vegetais e solos. Dados de radar contêm informações relacionadas com as propriedades biofísicas da vegetação, principalmente sobre sua estrutura e conteúdo hídrico. Estes dados, entretanto, não se tornaram ferramentas de uso tão disseminado como dados de sensores óticos. Entre os obstáculos para a difusão de dados de radar Kasischke *et al.* (1997) apontaram a dificuldade de interpretação destes dados, que registram a superfície terrestre de uma maneira diferente do que a vemos e a apresentam em diferentes tipos de produtos (p. ex., imagens que registram a amplitude e/ou fase das microondas, em uma ou mais polarizações, etc). Da mesma forma, são necessários dados de radar calibrados e programas para o processamento destes dados, não disponíveis comercialmente até o início dos anos 90 (Kasischke *et al.* 1997).

Depois de bem sucedidas aquisições de dados de radar a bordo de satélites e de ônibus espaciais (satélite Seasat de 1978, Shuttle Imaging Radar A e B de

1981 e 1984, respectivamente), o lançamento de radares orbitais regularmente desde 1991, iniciando-se com o Earth Resources Satellite 1 (ERS-1), abriu inúmeras oportunidades de estudos destes dados.

Este artigo propõe-se a apresentar uma revisão de artigos que tratam do estudo de florestas através de dados de radar. Alguns conceitos básicos de radar são também introduzidos. Novas técnicas de tratamento e interpretação de dados de radar, como polarimetria e interferometria, entretanto, não serão discutidas aqui.

FUNDAMENTOS DE RADAR

Os radares são sistemas ativos que geram sua própria radiação na faixa das microondas, cujos comprimentos de onda variam de 1 cm a 1,5 m.

Os radares podem operar em diferentes bandas, que se referem aos comprimentos de onda e frequências das microondas transmitidas e recebidas como eco da superfície terrestre. O tamanho da antena utilizada pelo radar determina a largura do pulso de microondas transmitido e, conseqüentemente, a resolução na direção do vôo (resolução azimutal). Os primeiros radares imageadores eram do tipo *radar de abertura real* que, por trabalhar com as dimensões efetivas da antena, apresentavam limitações na resolução espacial das imagens geradas. Já no *radar de abertura sintética* (SAR - Synthetic Aperture Radar) o problema da baixa resolução azimutal foi resolvido pela simulação de uma antena centenas de vezes maior que seu tamanho real, com o registro do eco de cada objeto ao longo da linha de vôo. Os dados SAR podem ser obtidos mesmo a partir de satélites.

Uma imagem digital de radar consiste numa matriz onde cada célula (ou pixel) apresenta um valor numérico proporcional à intensidade do eco que retorna à antena do radar. Este eco é conhecido como retroespalhamento, pois se refere à radiação que foi espalhada na direção do radar. Quando se quer o retroespalhamento em função da área imageada, trabalha-se com o coeficiente de retroespalhamento (σ^0), que de tão variável é expresso como logaritmo em unidades de decibel (dB) (Waring *et al.* 1995). Quanto maior o eco ou retroespalhamento, mais claro o objeto na imagem de radar.

O retroespalhamento varia em função do comprimento de onda ou frequência (λ ou f), polarização e ângulo de incidência (θ) das microondas incidentes, conhecidos como os parâmetros do radar. Igualmente, as características dos objetos na superfície terrestre, como constante dielétrica (relacionada ao conteúdo hídrico), rugosidade e geometria, influenciam os valores do retroespalhamento.

COMPRIMENTO DE ONDA/FREQÜÊNCIA

A **Tabela 1** mostra as bandas mais utilizadas em radares para sensoriamento remoto, seus comprimentos de onda, frequências e a equação que exprime a relação entre comprimento de onda e frequência.

O tamanho e a densidade dos elementos vegetais têm relação direta no tipo de interação com as microondas incidentes. Pequenos comprimentos de onda, como o das bandas X e C, por exemplo, trazem informações sobre as camadas superficiais do dossel vegetal, através do retroespalhamento produzido nas folhas e pequenos galhos. Já comprimentos de onda maiores, como os da banda L e P,

têm uma penetração maior no dossel vegetal e o retroespalhamento é causado pelos galhos e tronco (Dobson 2000). Dependendo do tipo e condições do dossel, as bandas L e P podem trazer até informações do solo sob a floresta.

Tabela 1 - Bandas de radar mais utilizadas, comprimentos de onda e frequências correspondentes, c é a velocidade da luz (Adaptado de Trevett, 1986).

Banda	Comprimento de onda - λ (cm)	Frequência - f (MHz)
P	136-77	220-390
UHF	100-30	300-1000
L	30-15	1000-2000
S	15-7.5	2000-4000
C	7.5-3.75	4000-8000
X	3.75-2.40	8000-12500
K	2.40-0.75	18000-26500

$l(\text{cm}) = \frac{c}{f} = \frac{30000}{f(\text{MHz})} = \frac{30}{f(\text{GHz})}$	<ul style="list-style-type: none"> 1 Hertz = 1 ciclo s^{-1} 1 MegaHertz = 10^6 Hertz 1 GigaHertz = 10^9 Hertz
---	---

POLARIZAÇÃO

As microondas, sendo ondas eletromagnéticas transversais, possuem campos elétricos e magnéticos vibrando em direções perpendiculares entre si. A direção de vibração do campo elétrico em relação à superfície define a polarização das microondas: se as microondas são transmitidas ou recebidas em direção paralela à superfície, são ditas horizontalmente polarizadas; se transmitidas ou recebidas em direção perpendicular à superfície, são ditas verticalmente polarizadas (Lewis e Henderson 1998). Uma antena de radar é construída para transmitir e receber

ondas em polarizações específicas, sendo indicada como HH (transmitida e recebida horizontalmente), VV (transmitida e recebida verticalmente), HV (transmitida horizontalmente e recebida verticalmente) ou VH (transmitida verticalmente e recebida horizontalmente).

A interação dos objetos na superfície terrestre com as microondas tem relação direta com a polarização incidente. Se os objetos na superfície terrestre possuem uma orientação vertical, como por exemplo mudas de trigo numa plantação, a interação com microondas verticalmente polarizadas será maior, assim como o eco gerado. Os objetos ou superfícies espalhadoras podem ter a capacidade de despolarizar a onda incidente e gerar um eco numa polarização distinta à enviada, isto graças aos mecanismos de espalhamento descritos a seguir. Com raras exceções, retroespalhamento em polarizações paralelas (HH ou VV) é mais forte que em polarizações cruzadas (HV ou VH) (Lewis e Henderson 1998).

ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

O ângulo de incidência (?) do radar é aquele formado entre o pulso de microondas incidentes e uma reta vertical estabelecida em relação à Terra (**Figura 1**).

O uso de ângulos de incidência específicos pode auxiliar na identificação de determinadas feições na superfície terrestre. Geralmente, ? menores resultam em maior retroespalhamento, apesar do retroespalhamento ser independente de ? para superfícies muito rugosas. Ângulos de incidência elevados determinam uma *maior quantidade do objeto* imageado e conseqüentemente, resultam em maiores perdas e um menor retroespalhamento. A rugosidade das superfícies, que será discutida adiante, varia em função do ângulo de incidência local (Lewis e Henderson 1998).

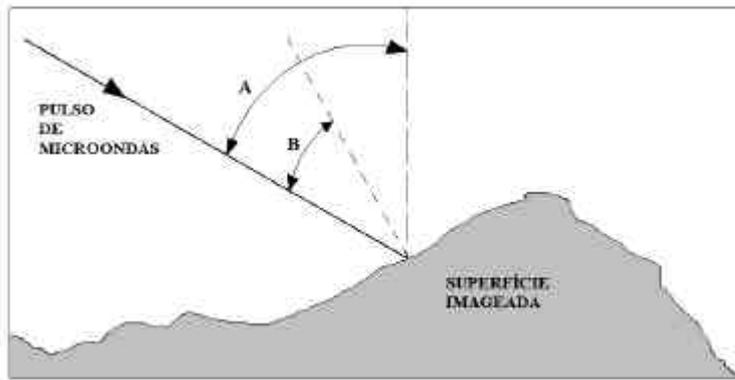


Figura 1 – (A) Ângulo de incidência e (B) ângulo de incidência local.

MECANISMOS DE RETROESPALHAMENTO

Os mecanismos responsáveis pelo espalhamento das microondas podem ser (i) *superficiais* quando ocorrem na superfície dos objetos e (ii) *volumétricos* quando ocorrem no interior e incluem o espalhamento entre os componentes do objeto, como galhos e folhas dentro do dossel vegetal. A despolarização da onda incidente (e geração de eco em polarização distinta da recebida) é um dos resultados do espalhamento volumétrico.

A rugosidade das superfícies, relativa ao comprimento de onda e ao ângulo de incidência, influencia diretamente os mecanismos e magnitude do retroespalhamento. Uma superfície rugosa em relação ao comprimento de onda incidente gera um espalhamento difuso, que ocorre em várias direções. Quando a superfície é lisa em relação ao comprimento de onda o espalhamento se dá na direção oposta ao radar, gerando o espalhamento do tipo especular. Um tipo especial de espalhamento chama-se reflexão de canto e se dá quando duas ou três superfícies lisas são adjacentes, gerando ecos muito fortes e registros muito

claros nas imagens de radar. A **Figura 2** ilustra os principais tipos de espalhamento, gerados a partir de diferentes tipos de superfícies.

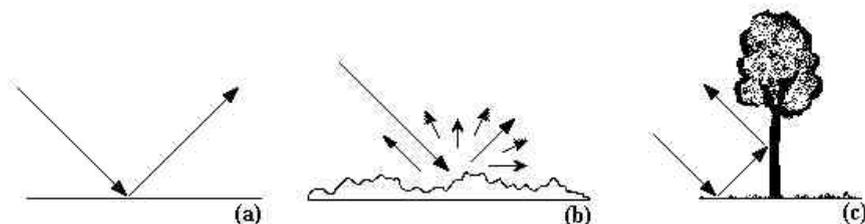


Figura 2 – Tipos de superfície – espalhamento associado: (a) lisa - especular, (b) rugosa – difuso, (c) lisas – reflexão de canto.

Outra característica dos objetos que influencia no retroespalhamento é a constante dielétrica. Quanto maior o conteúdo hídrico da vegetação, maior sua constante dielétrica, refletividade e espalhamento (Waring *et al.* 1995). A constante dielétrica desempenha um papel fundamental na intensidade e fase das microondas espalhadas por florestas (Kasischke *et al.* 1997).

AS FLORESTAS NAS IMAGENS SAR

A representação de uma floresta numa imagem SAR será a combinação das respostas geradas através dos diferentes mecanismos de espalhamento e inclui a contribuição direta do solo, do tronco, da copa das árvores, da interação copa-solo e da reflexão dupla tronco-solo (Leckie e Ranson 1998). Outros autores incluem ainda retroespalhamento tronco-solo atenuado pelo dossel vegetal e espalhamentos múltiplos provenientes dos galhos (Le Toan *et al.* 1992). A **Figura 3** apresenta os mecanismos responsáveis pelo retroespalhamento proveniente de florestas.

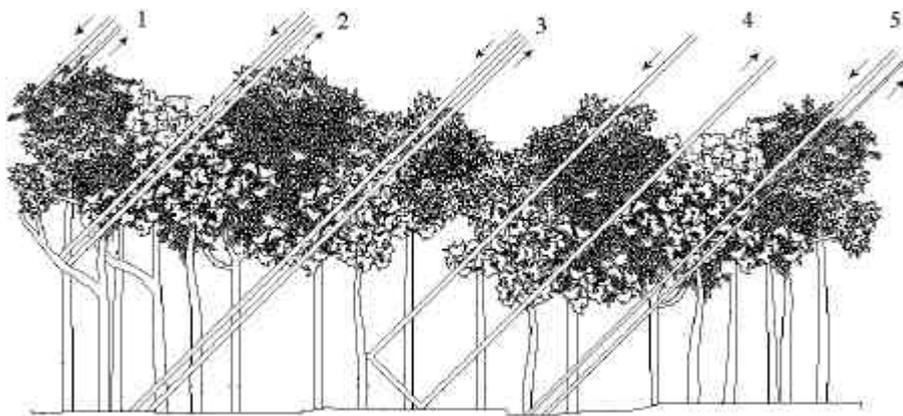


Figura 3 – Mecanismos e componentes do retroespalhamento proveniente de florestas: (1) retroespalhamento da superfície e interior do dossel, (2) retroespalhamento direto do tronco, (3) retroespalhamento direto do solo, (4) dupla reflexão tronco-solo e (5) retroespalhamento integrado copa-solo (adaptado de Leckie e Ranson 1998).

A magnitude dos mecanismos de espalhamento e a importância dos diferentes componentes são dependentes dos fatores geométricos (atributos estruturais das árvores, dossel e rugosidade do solo) e propriedades dielétricas da vegetação e solo (Dobson *et al.* 1995). Comprimento de onda, polarização e ângulo de incidência das microondas controlam os mecanismos de espalhamento e o retroespalhamento final será resultado de espalhamentos superficiais e/ou volumétricos. Le Toan *et al.* (2002) afirmam que os componentes vegetais que agem como principais fontes de espalhamento são da mesma ordem de magnitude dos comprimentos de onda com os quais interagem, como apresentado na **Tabela 2**. Componentes vegetais menores que os comprimentos de onda incidentes funcionam como atenuadores do retroespalhamento (Dobson 2000).

Tabela 2 - Componentes vegetais atuantes como principais fontes de espalhamento segundo diferentes bandas (Le Toan *et al.* 2002):

Banda	X	C	L	P
Principal fonte de retroespalhamento	Folhas e acículas	Folhas, galhos	Galhos	Galhos e troncos

Florestas inundadas, como nas várzeas da Amazônia, são facilmente identificadas nas imagens SAR através dos altos ecos gerados pelas reflexões duplas entre o espelho de água e superfície dos troncos (Hess *et al.* 1990).

A **Figura 4** apresenta um exemplo de imagem SAR na banda L, polarização HH (do satélite Japanese Earth Resources Satellite - JERS-1), onde as diferentes texturas e tonalidades decorrentes dos diferentes mecanismos de espalhamento estão presentes. A imagem foi obtida sobre a Floresta Nacional de Tapajós, no Pará e mostra como cobertura predominante floresta tropical densa (D na legenda), com sua textura típica. As áreas alteradas por desmatamento e posterior cultivo ou rebrota apresentam-se em tonalidades mais escuras e são indicadas na figura (F na legenda).

Finalmente, a representação de florestas numa imagem SAR também inclui o retroespalhamento devido aos efeitos da topografia da área imageada, principalmente nas vertentes voltadas para o pulso de microondas incidentes. Também deve ser considerada a presença inerente do *speckle*, uma espécie de ruído formado na aquisição das imagens SAR e geralmente minimizado através da filtragem digital dos dados.

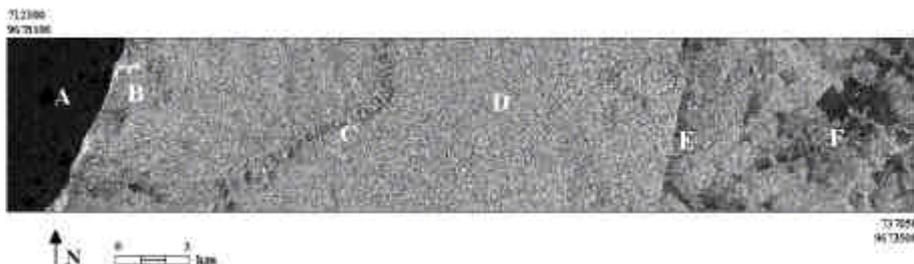


Figura 4 – Extrato de imagem SAR JERS-1 onde (A) rio (área escura com virtual ausência de eco), (B) florestas inundadas (áreas claras nas margens do rio), (C) feição geomorfológica de reborda – variação altitudinal do terreno, (D) floresta ombrófila densa, (E) rodovia BR 163, (F) capoeiras, pastagens, cultivos agrícolas diversos e solos descobertos (áreas com diferentes texturas e tonalidades).

MODELANDO O RETROESPALHAMENTO DE FLORESTAS

A compreensão dos mecanismos e magnitude do espalhamento das microondas provenientes de florestas veio através da construção e aplicação de modelos matemáticos. A maior parte dos modelos usados baseiam-se na teoria de transferência radiativa e representam a interação energia-matéria (microondas-vegetação) através da simulação de diversos mecanismos e níveis de espalhamento (Richards 1990). A comparação com dados obtidos em campo possibilita a associação dos mecanismos e magnitudes de retroespalhamento com os componentes vegetais envolvidos. O dossel florestal para efeito de modelagem numérica apresenta duas características principais: a estrutura global do meio espalhador – dossel - e a geometria e propriedades eletromagnéticas dos componentes vegetais individuais. Desta forma, os modelos concebidos

precisam contemplar a energia proveniente de várias unidades espalhadoras (Richards 1990).

Um dos primeiros modelos desenvolvido foi o de Attema e Ulaby (1978), onde as unidades espalhadoras foram concebidas como gotas de água, considerando predominantemente a influência do conteúdo hídrico no retroespalhamento. Outros modelos já incorporam a vegetação disposta em diferentes estratos e a influência do solo, como o modelo MIMICS (Michigan microwave canopy scattering model) de Ulaby *et al.* (1990). Cabe salientar que a maior parte destes modelos matemáticos foram concebidos para florestas boreais e áreas de florestas manejadas, onde a diversidade específica é pequena e a estrutura da vegetação menos variada, se comparadas com a vegetação de florestas tropicais.

Melhorias na modelagem do retroespalhamento de florestas, a começar pela própria caracterização numérica das florestas, são requisitos para a correta interpretação de dados de radar em diferentes comprimentos de onda, polarizações e ângulos de incidência (Werle 1989, Le Toan *et al.* 2002). A evolução da modelagem do retroespalhamento de florestas em direção a uma visão mais realista das árvores e do arranjo destas num dossel e diferentes estratos é condição para a compreensão dos mecanismos que regem o retroespalhamento proveniente de florestas tropicais. As primeiras tentativas de modelar o retroespalhamento de florestas tropicais já foram anunciadas (Saatchi 2003).

MAPEAMENTO DA COBERTURA E TIPOS FLORESTAIS

Desde a década de 1970 dados SAR têm sido utilizados para o mapeamento da cobertura e tipos florestais. No projeto RADAMBRASIL, os tipos florestais

foram diferenciados por interpretação visual, através de sua relação com a topografia/geomorfologia das áreas, em produtos fotográficos da banda X. Ainda hoje, a interpretação visual de imagens SAR desempenha um papel importante na discriminação de tipos florestais (Leckie e Ranson 1998, Kuntz e Siegert 1999). A análise numérica para o mapeamento da cobertura florestal começou com dados SAR do SEASAT (Werle 1989). Mesmo recentemente, porém, a falta de classificadores digitais específicos para dados SAR impediu seus usos para fins de mapeamento de uso da terra (Shimabukuro e Almeida-Filho 2002).

Em geral, a diferenciação entre tipos florestais, espécies arbóreas e entre áreas florestadas e não-florestadas é difícil com o uso de dados SAR numa só banda, polarização e ângulo de incidência (Leckie e Ranson 1998, Kurvonen e Hallikainen 1999, Hyypä *et al.* 2000, Ranson *et al.* 2001).

Para florestas boreais e temperadas do Hemisfério Norte, existem relatos da discriminação entre os tipos florestais usando combinação de dados em diferentes bandas (Saatchi e Rignot 1997, Ranson *et al.* 2001), polarizações (Wu 1984, Sader 1987, Saatchi e Rignot 1997) e ângulos de incidência (Hoffer *et al.* 1986, Werle 1989). O uso da textura das imagens SAR (Kurvonen e Hallikainen 1999, Podest e Saatchi 2002), assim como a integração de imagens SAR com imagens óticas, também são referidas como importantes para o sucesso da classificação dos tipos florestais (Hyypä *et al.* 2000, Rosot e Loch 2003, este últimos em povoamentos de *Eucalyptus spp* e mata nativa no Paraná).

Exemplos do uso complementar das bandas SAR é a discriminação privilegiada entre espécies de coníferas através de imagens nas bandas X e C, ao passo que a diferenciação entre áreas florestadas e não-florestadas é

favorecida em imagens nas bandas L e P (Werle 1989, Leckie e Ranson 1998). Os ecos associados a florestas de latifoliadas são mais intensos que os ecos provenientes de florestas de coníferas (Werle 1989). A penetração diferenciada, segundo os comprimentos de onda, nos dosséis vegetais, proporciona interações que favorecem o retroespalhamento de determinados componentes florestais, como o topo das copas para as bandas X e C (facilitando assim a diferenciação entre espécies vegetais), e a presença ou não de vegetação para as bandas L e P, graças ao elevado retroespalhamento proveniente de florestas nestas bandas.

Imagens em polarização cruzada (HV ou VH) proporcionam uma melhor discriminação dos tipos florestais para todas as frequências (Saatchi e Rignot 1997), pois a interação das microondas no dossel, troncos e galhos é um dos mecanismos que ocasiona a despolarização das microondas incidentes. Diferentes estruturas de dossel geram um grande intervalo de valores de retroespalhamento, o que facilita a classificação dos tipos florestais.

Para florestas tropicais, existem relatos da diferenciação entre estágios de sucessão florestal (Rignot *et al.* 1997, Yanasse *et al.* 1997) e entre floresta, áreas desmatadas (com ou sem biomassa remanescentes) e de corte seletivo (Saatchi *et al.* 1997, van der Sanden e Hoekman 1999) com dados SAR. A identificação e discriminação entre tipos florestais de terra firme e de várzea na Amazônia (Miranda *et al.* 1998, Podest e Saatchi 2002) e entre floresta estacional e as diferentes fisionomias do cerrado (Mesquita Jr. e Bitencourt 2003) também foram observadas através de imagens SAR. Shimabukuro e Almeida-Filho (2002), com imagens na banda L, obtiveram informações sobre o incremento em áreas desmatadas detectadas inicialmente em imagens TM em Roraima. Porém, estes autores também relataram dificuldade na detecção de áreas desmatadas e usadas para garimpo e cultivos agrícolas com o uso de imagens SAR da época chuvosa.

Algumas das considerações sobre o retroespalhamento de florestas temperadas podem ser aplicadas às florestas tropicais. A superioridade da banda L para a diferenciação de tipos florestais e de diferentes coberturas da terra que incluem classes de vegetação é uma delas (Rignot *et al.* 1997, Saatchi *et al.* 1997, Santos 2002). As polarizações cruzadas (HV ou VH) são também indicadas para a diferenciação entre floresta madura e em regeneração (Luckman *et al.* 1997, Saatchi *et al.* 1997), assim como entre estágios de sucessão secundária (Yanasse *et al.* 1997). Dados em polarização horizontal favorecem a discriminação entre áreas desmatadas com troncos remanescentes e a floresta subjacente, já que as microondas interagem fortemente com os troncos no chão (Rignot *et al.* 1997). O mecanismo de reflexão dupla entre o solo e os troncos eventualmente não abatidos gera ecos intensos também em polarização HH (Saatchi *et al.* 1997).

Dados de radar aerotransportado na banda P ($\lambda = 72$ cm) em todas as polarizações foram adquiridos sobre a Amazônia, fazendo parte de um grande estudo deste tipo de dado no Brasil. A diferenciação de coberturas vegetais (Freitas *et al.* 2001), assim como inventários de biomassa (Santos *et al.* 2003) indicaram a contribuição destes dados também para estudos em floresta tropical.

INVENTÁRIO E ESTIMATIVA DE BIOMASSA FLORESTAL

Os resultados de estudos com dados SAR para inventários florestais são variados. A baixa correlação entre altura de árvores e volume de madeira medidos em campo e dados SAR na banda L e C foi observada por Hyypä *et al.* (2000) e atribuída à grande variação dos dados de campo. Dados na banda L (Castel *et al.* 2002) e na banda P-HV (Rauste *et al.* 1994), entretanto, foram indicados como adequados para estimativa de volume de madeira. Castel *et al.* (2002) destacaram a importância da separação dos povoamentos florestais por idades (considerando assim a estrutura da vegetação) para incrementar a relação entre

retroespalhamento e volume. Além de volume, densidade de indivíduos também pôde ser estimada com base em dados SAR, sendo esta a variável que controla a relação com retroespalhamento.

A estimativa de variáveis biofísicas de florestas não-tropicais com precisão comparável às obtidas através de métodos tradicionais de campo requer dados SAR em diferentes bandas e/ou polarizações (Dobson 2000). Muitas vezes a estimativa não é direta e exige a utilização de diferentes métodos, como a divisão da floresta em classes estruturais, modelagem dos dados SAR e posterior estimativa das variáveis florestais (Dobson *et al.* 1995).

Dados de biomassa florestal, apesar de parte da maioria dos inventários florestais, são tratados separadamente por serem peças chave nas estimativas das emissões e seqüestro de carbono atmosférico. A quantidade e distribuição exata da biomassa florestal na superfície da Terra são fatores ainda incertos, que dificultam a apreensão do ciclo global do carbono.

As condições necessárias para dados de radar fornecerem informações sobre biomassa é a penetração das microondas no dossel vegetal e a interação com, principalmente, as estruturas lenhosas dos troncos e galhos, onde a maior parte da biomassa está concentrada. A dependência do retroespalhamento à biomassa, entretanto, é indireta e ocorre graças à relação existente entre biomassa fresca e o conteúdo hídrico da vegetação (Le Toan *et al.* 2002).

A relação entre retroespalhamento e biomassa é limitada a partir de certos valores de biomassa, no fenômeno conhecido como saturação do retroespalhamento, uma função do comprimento de onda utilizado (Imhoff 1995, Luckman *et al.* 1997, Kasischke *et al.* 1997). A **Tabela 3** apresenta os níveis de saturação na relação retroespalhamento/biomassa de acordo com as diferentes bandas SAR. Devido à maior complexidade estrutural, nas formações

tropicais esta saturação ocorre a valores mais baixos de biomassa (Dobson 2000). Quanto maior o comprimento de onda utilizado, maior o limite máximo de biomassa estimado a partir de dados SAR.

Tabela 3 - Níveis de saturação na relação retroespalhamento/ biomassa.

Autor	Tipo de floresta	Banda	Biomassa (T ha ⁻¹)
Sader (1987)	Latifoliadas e coníferas	L	100
Dobson <i>et al.</i> (1992)	Duas espécies de <i>Pinus</i>	P e L	100-200
Rauste <i>et al.</i> (1994)	Coníferas	L	100
Imhoff (1995)	Dados combinados de coníferas e	C	20
	latifoliadas	L	40
	perenes	P	100
Rignot <i>et al.</i> (1997)	Tropical	L	Próxima a 100
Luckman <i>et al.</i> (1997)	Tropical	L	60
Araújo <i>et al.</i> (1999)	Tropical	L	100
Santos <i>et al.</i> (2002)	Tropical	L	60

Para contornar o problema da saturação e aumentar os valores máximos de biomassa estimados com dados SAR, algumas alternativas foram propostas. O uso de razão de bandas e polarizações (neste caso a razão entre banda P e banda C, ambas HV), com a intenção de isolar a contribuição da biomassa e reduzir o efeito da estrutura da vegetação nos valores de retroespalhamento, permitiu a estimativa de biomassa até 250 T ha⁻¹ em floresta boreal (Ranson e Sun 1994). Kuplich *et al.* (2003) observaram alta correlação entre biomassa de floresta tropical e textura de imagens SAR, sugerindo assim o uso da textura SAR, juntamente com retroespalhamento, para estimativas de biomassa florestal.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maior parte dos estudos apresentados aqui apontam para o uso de dados SAR como complemento aos dados de campo e/ou de dados obtidos em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Idealmente, a discriminação entre tipos florestais, assim como estimativas mais precisas de variáveis florestais, são feitas a partir de dados SAR em diferentes datas, bandas e/ou polarizações, além da fusão com dados óticos. Quando apenas uma banda é disponível, imagens da época seca ou de dias sem chuva são recomendadas, pois nelas uma das fontes importantes de variação do retroespalhamento – água nos solos e na superfície da vegetação - está parcialmente controlada. É imprescindível considerar (e corrigir) os efeitos do relevo em imagens SAR de florestas em áreas montanhosas ou em importantes gradientes topográficos.

Dados de radar obtidos a partir de múltiplos parâmetros estiveram presentes no SIR-C/XSAR e, pelo menos com relação à polarização, já estão disponíveis para alguns radares orbitais atuais e planejados (**Tabela 4**).

Tabela 4. Características de sistemas SAR orbitais.

Satélite/sensor	Lançamento	Banda(s)	Polarização	Resolução espacial (m)
SEASAT/SAR	1978	L	HH	25
Shuttle/SIR-A	1981	L	HH	40
Shuttle/SIR-B	1984	L	HH	17-58
ALMAZ-1/SAR	1991	S	HH	out/30
ERS1/2/SAR	1991/95	C	VV	30
JERS-1/SAR	1992	L	HH	18
Shuttle/SIR-C/XSAR	1994	C-L-X	pol	15-45
RADARSAT/SAR	1995	C	HH	8-100
ENVISAT/ASAR	2002	C	pol	30-1000
RADARSAT-2/SAR	2004	C	pol	3-100
ALOS/PALSAR	2004	L	pol	10-100

Obs: 1) Os sensores operam em diferentes modos onde nem sempre o intervalo total de parâmetros é disponível. 2) pol = polarimétrico (HH, HV, VV, VH). 3) Shuttle refere-se aos ônibus espaciais.

No Brasil existem SAR aerotransportados como o OrbiSAR, que opera nas bandas X e P (construído pela empresa Orbisat) e o do projeto SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), atuante nas bandas X e L, ambos polarimétricos. Estes sistemas abrem perspectivas de estudos florestais no Brasil em dados SAR de alta resolução espacial.

Mesmo se os mecanismos de interação entre as microondas e os componentes vegetais ainda não estão totalmente conhecidos, o tipo de informação oferecida pelos dados SAR assegura sua permanência como dado único e complementar para o estudo de florestas. A nova geração de produtos SAR, com um maior número de bandas e polarizações disponíveis, promete aumentar a utilidade destes dados para estudos florestais e contribuir para a operacionalização de algumas de suas aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aber, J. D., Melillo, J. M. (2001). *Terrestrial ecosystems*. San Diego: Academic Press.
- Araújo, L. S., Santos, J. R., Freitas, C. C., Xaud, H. A. M. (1999). The use of microwave and optical data for estimating aerial biomass of the savanna and forest formations at Roraima State, Brazil. In IGARSS'99. Hamburg: IEEE Piscataway.
- Attema, E. P. W., Ulaby, F. T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*. n.13, p.357-364, .
- Castel, T., Guerra, F., Caraglio, Y., Houlliera, F. (2002). Retrieval biomass of a large Venezuelan pine plantation using JERS-1 SAR data. Analysis of forest structure impact on radar signature. *Remote Sensing Environment*. n.79, p.30-41.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Le Toan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E. S. Christensen, N. (1992). Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.30, p.412-415.

- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Pierce, L. E., Sharik, T. L., Bergen, K. M., Kellndorfer, J., Kendra, J. R., Li, E., Lin, Y. C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., Siqueira, P. (1995). Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.33, p.877-894.
- Dobson, M. C. (2000). Forest information from Synthetic Aperture Radar. *Journal of Forestry*. n.98, p.41-43.
- França, H., Setzer, A. W. (2001). AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*. n.22, p.2449-2461.
- Freitas, C.C., Sant'Anna, S.J.S., Soler, L.S., Santos, J.R., Dutra, L.V., Araújo, L.S., Mura, J.C., Hernadez Filho, P. (2001). The use of airborne P-band radar data for land use and land cover mapping in Brazilian Amazonia., In: IGARSS. Sydney. Piscataway: IEEE (CD-ROM).
- Hess, L. L., Melack, J. M., Simonett, D. S. (1990). Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*. n.11, p.1313-1325.
- Hoffer, R. M., Lozano-Garcia, D. F., Gillespie, D. D., Mueller, P. W., Ruzek, M. J. (1986). Analysis of multiple incidence angle SIR-B data for determining forest stand characteristics. In *Second Spaceborne Imaging Radar Symposium*. p. 159-164. Pasadena, USA: JPL/NASA.
- Hyyppa, J., Hyyppa, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., Zhu, Y. (2000). Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*. n.128, p.109-120.
- Imhoff, M. L. (1995). Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for the global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.33, p.511-518.

- Kasischke, E. S., Melack, J. M., Dobson, M. C. (1997). The use of imaging radars for ecological applications - a review. *Remote Sensing of Environment*. n.59, p.141:156.
- Kuntz, S., Siegert, F. (1999). Monitoring of deforestation and land use in Indonesia with multitemporal ERS data. *International Journal of Remote Sensing*. n.20, p.2835-2853.
- Kuplich, T. M., Curran, P. J., Atkinson, P. M. (2003). Relating SAR image texture and backscatter to tropical forest biomass. In: *IGARSS. Toulouse. Piscataway: IEEE*. v.IV. p.2872 – 2874.
- Kurvonen, L., Hallikainen, M. T. (1999). Textural information of multitemporal ERS-1 and JERS-1 SAR images with applications to land and forest type classification in boreal zone. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.37, p.680-689.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riou, J., Guyon, D. (1992). Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.30, p.403-411.
- Le Toan, T., Picard, G., Martinez, J. M., Melon, P., Davidson, M. (2002). On the relationships between radar measurements and forest structure and biomass. In: *III International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications*. Sheffield, UK: ESA (ESA SP-475), p. 3-12.
- Leckie, D. G., Ranson, K. J. (1998). Forestry applications using imaging radar. In: *Principles and Applications of Imaging Radar*. (F. M. Henderson, and A. J. Lewis, Eds.). New York: John Wiley, p. 435-509.
- Lewis, A. J., Henderson, F. M. (1998). Radar fundamentals: the geoscience perspective. In *Principles and Applications of Imaging Radar*. (F. M. a. Henderson, and A. J. Lewis, Eds.), New York: John Wiley. p. 131-181.

- Luckman, A., Baker, J., Kuplich, T. M., Yanasse, C. C. F., Frery, A. (1997). A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. *Remote Sensing of Environment*. n. 60, p.1-13.
- Mesquita Jr, H. N., Bittencourt, M. D. (2003). Identificação de florestas estacionais semidecíduais contíguas a fragmentos de cerrado no Estado de São Paulo com imagens JERS-1/SAR. In XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte: INPE, p. 2233-2239.
- Miranda, F. P., Fonseca, L. E. N., Carr, J. R. (1998). Semivariogram textural classification of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data obtained over a flooded area of Amazon rainforest. *International Journal of Remote Sensing*. n.19, p.549-556.
- Pereira Jr, A. C., Setzer, A. W. (1996). Comparison of fire detection in savannas using AVHRR channel 3 and TM images. *International Journal of Remote Sensing*. n.17, p.1925-1937.
- Podest, E., Saatchi, S. S. (2002). Application of multiscale texture in classifying JERS-1 radar data over tropical vegetation. *International Journal of Remote Sensing*. n.23, p.1487-1506.
- Ranson, K. J., Sun, G. (1994). Mapping biomass of a northern forest using multifrequency SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.32, p.388-395.
- Ranson, K. J., Sun, G., Kharuk, V. I., Kovacs, K. (2001). Characterization of forests in Western Sayani Mountains, Siberia from SIR-C SAR data. *Remote Sensing of Environment*. n.75, p.188-200.
- Rauste, Y., Hame, T., Pulliainen, J., Heiska, K., Hallikainen, M. (1994). Radar-based forest biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*. n.15, p.2797-2808.
- Richards, J. A. (1990). Radar backscatter modelling of forests: a review of current trends. *International Journal of Remote Sensing*. n.11, p.1299-1312.

- Rignot, E., Salas, W. A., Skole, D. L. (1997). Mapping deforestation and secondary growth in Rondonia, Brazil, using imaging radar and Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*. n.59, p.167-179.
- Rosot, N. C., Loch, C. (2003). Diferenciação de tipologias florestais usando imagens combinadas. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte: INPE, p. 2885-2893.
- Saatchi, S. S. (2003). Estimation of structural parameters and biomass of terra firme and floodplain forests in Amazon Basin using a semi-empirical backscatter model. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Comunicação oral. Belo Horizonte, INPE.
- Saatchi, S. S., Rignot, E. (1997). Classification of boreal forest cover types using SAR images. *Remote Sensing of Environment*. n.60, p.270-281.
- Saatchi, S. S., Soares, J. V., Alves, D. S. (1997). Mapping deforestation and land use in Amazon rainforest by using SIR-C imagery. *Remote Sensing of Environment*. n.59, p.191-202.
- Sader, S. A. (1987). Forest biomass, canopy structure and species composition relationships with mutlipolarization L-band Synthetic Aperture Radar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. n.53, p.193-202.
- Sant'Anna, S. J. S., Yanasse, C. C. F., Hernandez Filho, P., Kuplich, T. M., Dutra, L. V., Frery, A. C., Santos, P. P. (1995). Secondary forest age mapping in Amazonia using multitemporal Landsat TM imagery. In IGARSS'95. p. 323-325. *Quantitative Remote Sensing for Science and Applications*. Firenze, Italy.
- Santos, J. R. (2002). O desenvolvimento de pesquisas com dados LIDAR e de microondas (bandas X, L e P) em estudos florestais. In V Seminário de atualização de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas aplicados à Engenharia Florestal. (A. A. Disperati, and J. R. Santos, Eds.), Curitiba, p. 47-53.

- Santos, J. R., Lacruz, M. S. P., Araújo, L. S. (2002). Savanna and tropical rainforest biomass estimation using JERS-1 data. *International Journal of Remote Sensing*. n.23, p.1217-1229.
- Santos, J. R., Araújo, L. S., Dutra, L.V., Freitas, C.C., Soler, L.S. (2003). Parametrização da biomassa em área de floresta tropical a partir de dados SAR aerotransportados na banda P. In XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte: INPE, p. 2273-2279.
- Shimabukuro, Y. E., Hernandez Filho, P., Koffler, N. F., Chen, S. C. (1980). Automatic classification of reforested Pine and Eucalyptus using Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. n.46, p.209-216.
- Shimabukuro, Y. E., Almeida Filho, R. (2002). Processamento digital de imagens multitemporais Landsat-5 TM e JERS-1 SAR aplicado ao mapeamento e monitoramento de áreas de alteração antrópica na Amazônia. *Geografia*. n.27, p.81-96.
- Trevett, J. W. (1986). *Imaging Radar for Resources Surveys*. London: Chapman and Hall.
- Ulaby, F. T., Sarabandi, K., McDonald, K., Whitt, M., Dobson, M. C. (1990). Michigan microwave canopy scattering model. *International Journal of Remote Sensing*. n.11, p.1223-1253.
- van der Sanden, J. J., Hoekman, D. H. (1999). Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. *Remote Sensing of Environment*. n.68, p.26-40.
- Waring, R. H., Way, J., Hunt Jr., E. R., Morrissey, L., Ranson, K. J., Weishampel, J. F., Orem, R., Franklin, S. E. (1995). Imaging radar for ecosystems studies. *BioScience*. n.45, p.715-723.

- Werle, D. (1989). La télédétection par radar: applications en foresterie. Ontario: Centre Canadien de Télédétection, 46p.
- Wu, S. T. (1984) Analysis of Synthetic Aperture Radar data acquired over a variety of land cover. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.22, p.550-557.
- Yanasse, C. C. F., Sant'Anna, S. J. S., Frery, A., Rennó, C. D., Soares, J. V., Luckman, A. (1997). Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C L- and C-data. *Remote Sensing of Environment*. n.59, p.180-190.