

APLICAÇÃO DE SISTEMAS RADAR NO MONITORAMENTO DE INFESTAÇÕES DE PLANTAS AQUÁTICAS EM RESERVATÓRIOS: VANTAGENS E LIMITAÇÕES.

Radar System Application For The Management Of Aquatic Plant Infestation In
Reservoirs: Advantages And Disadvantages

Mauricio Almeida Noernberg
Evlyn M. L. de Moraes Novo
Thelma Krug

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas 1758, CEP: 12227-010, São José dos Campos-SP.

RESUMO

O monitoramento de processos dinâmicos em reservatórios artificiais é uma necessidade para a manutenção da estabilidade da cadeia trófica e da qualidade da água nos reservatórios. O uso de técnicas de sensoriamento remoto tem-se apresentado como uma ferramenta importante para tal, devido à sua capacidade de proporcionar visão sinóptica do estado do reservatório. Imagens de radar mostram-se particularmente interessantes para o monitoramento de processos dinâmicos em reservatórios, principalmente em regiões tropicais, visto que estas imagens não sofrem interferência das condições meteorológicas. Este trabalho apresenta uma discussão sobre o potencial e as limitações do uso de dados de radar no estudo de plantas aquáticas em reservatórios.

Palavra-Chave: Radar; Reservatórios; Plantas Aquáticas.

ABSTRACT

Reservoir monitoring is the key to food web and water quality protection. Remote sensing techniques can provide a synoptic view necessary for accurate assessment of the entire reservoir. Radar imaging systems are particularly important in tropical regions because of day and night acquisition, independent of weather conditions. This paper discusses the advantages and disadvantages of radar data for assessing aquatic plant infestation in tropical reservoirs.

Key-Word: Radar; Reservoirs; Aquatic Plants.

1. INTRODUÇÃO

As comunidades de plantas aquáticas, também chamadas de macrófitas aquáticas, são consideradas como uma das mais produtivas do mundo. São de fundamental importância, não só para a região litorânea, mas para todo o ecossistema lacustre. Estes vegetais participam da ciclagem de nutrientes, produzem biomassa e servem como habitat para a reprodução e crescimento de inúmeros organismos aquáticos (Junk, 1979; Junk e Howard-Williams, 1984).

Entretanto, apesar da reconhecida importância das comunidades de plantas aquáticas para o ecossistema de lagos artificiais, sabe-se que sua proliferação excessiva pode resultar em inúmeros problemas para os múltiplos usos de um reservatório. Entre estes, podem ser citados a obstrução do fluxo da água, o aumento da evaporação, o impedimento à navegação, a restrição a alguns tipos de pesca, a alteração da qualidade da água devido ao excesso de biomassa e conseqüente redução de oxigênio da água, a proliferação de vetores de doença, entre outros problemas.

Deste conjunto de problemas advém a necessidade do entendimento e estudo das comunidades de plantas aquáticas para subsidiar medidas de manejo adequadas, as quais poderão garantir a manutenção dos estoques necessários deste recurso para o suporte da cadeia trófica e evitar os prejuízos ambientais decorrentes de sua proliferação excessiva.

Outra preocupação recente que envolve os reservatórios e as plantas aquáticas é a contribuição desses ambientes para o balanço global no ciclo do Carbono. Kelly et al. (1994) salientam que, apesar dos 500.000 km² de área global de reservatórios, quase nada se sabe sobre seu papel como fixador ou fonte de gases responsáveis pelo efeito estufa, dióxido de Carbono (CO₂) e Metano (CH₄).

A composição qualitativa das comunidades de plantas aquáticas, nos ambientes aquáticos, está vinculada aos parâmetros bióticos e abióticos do meio, e aos mecanismos de interação entre os bancos das diferentes espécies de plantas aquáticas. Apesar de uma clara tendência para formação de extensos bancos monoespecíficos (Wetzel, 1975), estes parâmetros podem sofrer variações sazonais, os quais podem alterar sua distribuição e composição, bem como sua biomassa total. Esta variação na distribuição e composição dos bancos pode influenciar de distintas maneiras seu impacto no ecossistema lacustre, e também a resposta à emissão e fixação de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Como visto, é importante determinar a distribuição de bancos de plantas aquáticas, bem como quantificá-las e identificá-las. Desta forma, dados de sensoriamento remoto podem ser uma ferramenta poderosa para se obter tais informações. Eles vêm sendo utilizados para complementar informações obtidas *in situ* (Abdon e Meyer, 1990).

Até recentemente, os sistemas orbitais disponíveis operavam apenas com sensores sensíveis à região ótica do espectro e, desta forma, ficavam sujeitos a interferências das condições meteorológicas. Em regiões tropicais, como a região

amazônica, onde a cobertura de nuvens é intensa, dados orbitais adquiridos pelo sistema Landsat, por exemplo, limitam-se ao período seco. Com isto, o estudo de fenômenos dinâmicos, como é o caso da distribuição espacial das plantas aquáticas, a partir de sensores óticos, fica limitado.

A partir do início da década de 90, com o lançamento de sensores ativos de microondas a bordo de satélites de recursos naturais (Almaz-1, ERS-1 e 2, JERS-1 e Radarsat), ampliou-se a possibilidade de utilização desse tipo de dados no estudo de fenômenos dinâmicos em regiões tropicais, visto que esta faixa do espectro não é afetada pelas condições meteorológicas. Desta forma, os sistemas radar apresentam-se como uma ferramenta eficaz no estudo destes fenômenos.

Na Tabela 1 são apresentados os radares que apresentam dados disponíveis, com suas características de aquisição de imagens.

Tabela 1 - Características dos SARs a bordo de satélites ambientais atualmente em operação.

	Banda	Comp. Onda	Polarização	Ângulo Incidência	Faixa Imageada	Resolução Nominal
Almaz-1	S	10 cm	HH	30 - 60	20 - 45 km	15 - 30 m
ERS-1	C	5,6 cm	VV	23°	100 km	30 m
ERS-2	C	5,6 cm	VV	23°	100 km	30 m
JERS-1	L	23 cm	HH	35°	75 km	18 m
Radarsat	C	5,6 cm	HH	20° - 60°	50 - 500 km	10 - 100m

2. SISTEMAS RADAR

A equação de radar, que determina a potência recebida pela antena, é uma relação fundamental entre as características do radar, do alvo, e do sinal que é refletido pelo alvo e recebido pela antena do radar (Ulaby et al., 1982).

A intensidade da energia retroespalhada está relacionada ao parâmetro conhecido como seção transversal de retroespalhamento - σ (*backscatter cross section*), que representa a razão entre a energia recebida pelo sensor e a energia que o sensor receberia se a superfície espalhadora tivesse um comportamento isotrópico (Elachi, 1987).

Para alvos maiores que a largura do feixe incidente, é necessário conhecer o comportamento do retroespalhamento em função de uma unidade de área ($1m^2$), definindo um coeficiente de retroespalhamento. Usa-se então σ^0 , que é a seção transversal de retroespalhamento (σ) por unidade de área iluminada (a) - ($\sigma^0 = \sigma/a$). O coeficiente de retroespalhamento σ^0 pode ser expresso através dos níveis digitais nas imagens de radar.

De forma resumida pode-se dizer que, com exceção de σ , todos os parâmetros na equação de radar são relativos ao sistema radar, podendo ser reunidos num só, representando uma constante do sistema. Conclui-se então que a potência recebida

pela antena é diretamente proporcional à seção transversal de retroespalhamento (Ulaby e Dobson, 1989).

3. INTERAÇÃO MICROONDA X VEGETAÇÃO

Parte da radiação enviada pelo radar é absorvida, parte é refletida especularmente, outra parte é difundida dentro do alvo e outra, eventualmente, retorna para a antena para ser registrada e medida na forma de um sinal de retorno, servindo de base para a produção de uma imagem de radar.

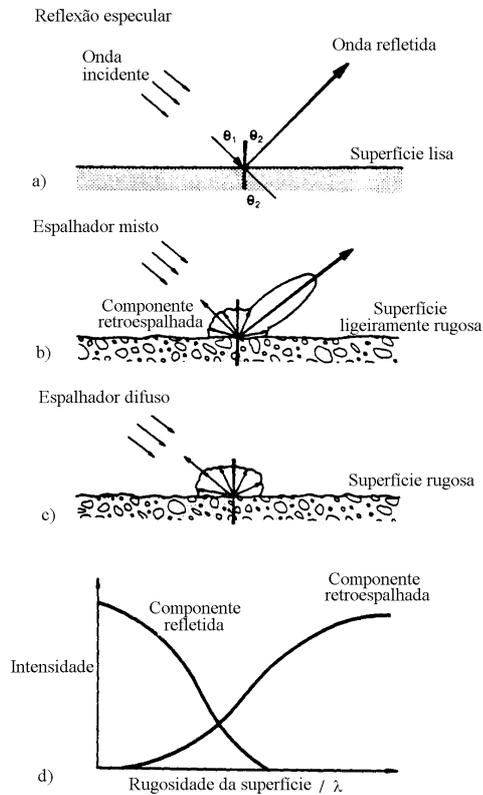


Figura 1 - Reflexão das microondas em diferentes superfícies.

FONTE: Trevett (1986), p. 45.

A capacidade de interpretação de uma imagem de radar está ligada ao grau pelo qual diferentes alvos geram diferentes sinais de retorno, de modo a produzirem características distintas na imagem final, e também à resolução do sistema radar ou

sua capacidade de discriminar estes diferentes alvos. A Figura 1 apresenta a descrição clássica da maneira como a superfície afeta o retorno do sinal para a antena. No caso da Figura 1a, que representa uma superfície lisa, a energia é refletida especularmente na direção oposta da antena, e nenhum sinal é registrado, formando-se, assim, uma imagem preta. Com o aumento da rugosidade na superfície, conforme ilustram as Figuras 1b e 1c, 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, os níveis de cinza tendem a parecer mais claros.

A imagem de radar é, portanto, uma medida da componente de retroespalhamento do sinal. Visto que ela está relacionada à rugosidade do alvo, pode ser entendida como uma representação da rugosidade da superfície.

Particularmente quando o alvo estudado é a vegetação, os parâmetros relacionados ao dossel, que influenciam no comportamento do retroespalhamento, são a distribuição tridimensional dos elementos espalhadores e a organização das moléculas de água do alvo. Ulaby et al. (1986) relaciona estes parâmetros como sendo:

- a) a constante dielétrica da vegetação, que é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade. Este pode variar significativamente entre os diferentes constituintes do dossel (folhas, troncos e frutos), dependendo do estágio de desenvolvimento do dossel, causando, portanto, uma variação da constante dielétrica;
- b) o tamanho, forma e orientação dos elementos difusores do dossel;
- c) a rugosidade e a constante dielétrica do substrato sob o dossel; e
- d) a geometria da cobertura do dossel (orientação e homogeneidade das estruturas da cobertura, porcentagem de cobertura, altura da planta, etc.).

Desta forma, um dossel 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.

O ângulo de incidência é um parâmetro que pode alterar a interpretação dos alvos em imagens de radar. Ângulos de incidência elevados, em relação à normal, envolvem um maior volume de vegetação exposto às microondas, havendo, portanto, maiores chances de espalhamentos intra-dossel. Em geral, há um aumento no retroespalhamento com o decréscimo no ângulo de incidência (Simonet e Davis, 1983).

A rugosidade aparente de uma superfície depende do ângulo de incidência do radar e de seu comprimento de onda. Assim, um pequeno comprimento de onda de radar pode identificar uma superfície como rugosa, enquanto que essa mesma superfície, vista com um comprimento de onda maior, pode parecer lisa.

A polarização influi diretamente na capacidade de penetração da onda em um dossel. Num dossel de gramíneas, por exemplo, que possui estrutura predominantemente vertical, a atenuação das microondas pode ser mais significativa na polarização VV que na HH, o que significa maior penetração de ondas horizontalmente polarizadas (Allen e Ulaby, 1984; Le Toan et al., 1984).

Como visto, 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. E, por outro lado, as variações nas características morfológicas e estruturais do dossel também provocam comportamentos diferentes no retorno do sinal. Por isto, é importante o conhecimento das variáveis do terreno a serem estudadas para a definição do modo de aquisição da imagem, uma vez que, algumas características do alvo podem não estar influenciando no retroespalhamento, em um determinado modo de aquisição, prejudicando assim, sua análise, como, por exemplo, a orientação das folhas de vegetação herbácea em uma imagem na banda L.

4. RELAÇÃO: CARACTERÍSTICA DO IMAGEAMENTO X CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E ESTRUTURAS

No estudo das plantas aquáticas a partir de dados de radar, parâmetros como a biomassa, a altura das plantas, quantidade de água nas plantas, orientação das hastes e folhas, e a homogeneidade e densidade do banco, possuem papel importante na caracterização de diferentes gêneros de plantas aquáticas presentes em um reservatório.

O estudo de plantas aquáticas com dados de radar é recente, e o verdadeiro potencial desta técnica para o referido estudo ainda é tema de investigações. Novo et al. (1994) iniciam trabalhos de avaliação do potencial de mapeamento de plantas aquáticas no reservatório de Tucuruí – PA utilizando dados SAR multipolarimétrico aerotransportado na banda C, dados estes gerados pela missão SAREX-92 (South American Radar Experiment). Estes dados resultaram em novos trabalhos abordando a mesma temática. Costa et al. (1996) testa o grau de separabilidade entre diferentes classes de plantas aquáticas. Noernberg (1996) avalia a possibilidade de discriminação de plantas aquáticas em função das diferenças em suas características estruturais e morfológicas, e também em relação a 3 índices biofísicos. As características das classes utilizadas nestes estudos seguem, com pequena variação, o padrão da Tabela 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS CLASSES TEMÁTICAS

Fonte: Noernberg (1996), p. 44.

Classe Temática	Características Físicas
Água	Superfície lisa da água sem presença de paliteiros e macrófitas.
Paliteiros	Superfície da água com grande número de troncos de árvores mortas aflorando acima da superfície da água, com altura variando entre 50cm e 20m, e diâmetro de troncos variando entre 15cm até 1m. Podem funcionar como refletores de canto.
Floresta	Áreas de floresta primária com pequenas porções de floresta secundária, áreas cultivadas e pastagens.
Scirpus	Bancos grandes da família <i>Cyperaceae</i> , geralmente densos, com folhas afiladas flutuantes, podendo chegar a 1,5m de altura. Podem encontrar-se em diferentes estágios fenológicos e associados a pequenos bancos de outros gêneros de plantas aquáticas. Geralmente associados à presença de paliteiros.
Eichhornia	Bancos densos do gênero <i>Eichhornia sp.</i> , estreitos, homogêneos, flutuantes, com plantas chegando até 30 cm de altura, com pecíolos orientados verticalmente e folhas ovaladas chegando a 15 cm de comprimento.
Typha	Bancos pequenos do gênero <i>Typha sp.</i> , com folhas emergentes e aspecto semelhante ao gênero <i>Scirpus sp.</i> , podendo chegar a 2m de altura.
Salvinia	Bancos homogêneos do gênero <i>Salvinia sp.</i> , flutuantes, localizados próximos aos bancos de <i>Scirpus</i> . Folhas pequenas (3 cm). Possibilidade de ocorrência de paliteiros.
Pistia	Bancos pequenos do gênero <i>Pistia sp.</i> , associados a ocorrência de <i>Scirpus</i> , folhas pequenas flutuantes (5 cm).
Heterogêneo	Bancos com vários gêneros de macrófitas, geralmente densos e com predominância de <i>Scirpus</i> .

A biomassa da vegetação é um parâmetro que vem recebendo grande atenção dos investigadores. Entretanto, estas pesquisas estão concentradas no estudo da biomassa de florestas, principalmente utilizando a banda L. No caso das plantas aquáticas, segundo Noernberg (1996), o retroespalhamento na banda C, parece não ter uma relação definida com a biomassa dos gêneros *Scirpus sp.*, *Eichhornia sp.*, *Typha sp.*, *Salvinia sp.* e *Pistia sp.*. O autor ainda compara o retroespalhamento dos gêneros *Scirpus sp.* e *Eichhornia sp.* com as suas respectivas biomassas úmidas, e encontra menores valores de retroespalhamento para *Eichhornia sp.* que possui maior biomassa úmida (5900 g/m²), quando comparada com o *Scirpus sp.* (2100 g/m²) (Tabela 3). Este fato, indica que não existe uma relação direta entre o retroespalhamento e a biomassa úmida. Provavelmente, isto está associado com o tipo de interação ocorrido nestes gêneros, causado pela diferença na orientação dos elementos espalhadores de cada gênero.

Tabela 3 - Dados de retroespalhamento médio de diferentes classes de plantas aquáticas, onde *n* é o número de amostras da classe.

Fonte: Noernberg (1996), p. 46.

Classe	<i>n</i>	HH	HV	VH	VV
		Média (dB)	Média (dB)	Média (dB)	Média (dB)
Água	13	-28,51	-32,19	-33,20	-26,78
Paliteiros	14	-16,43	-27,45	-27,70	-18,84
Floresta	18	-13,26	-19,01	-19,05	-12,84
<i>Scirpus</i>	39	-12,01	-19,37	-19,32	-13,59
<i>Eichhornia</i>	8	-15,14	-21,24	-21,24	-14,31
<i>Typha</i>	8	-13,73	-21,71	-21,65	-14,10
<i>Salvinia</i>	19	-14,87	-23,70	-23,90	-14,61
<i>Pistia</i>	5	-14,41	-21,48	-21,49	-15,33
Heterogêneo	9	-12,43	-20,26	-20,24	-12,87

A variação na altura do dossel parece ter maior influência no retroespalhamento que a biomassa. Rosenthal et al. (1985) afirmam que a banda C é mais sensível às variações na altura da vegetação herbácea que às variações na sua biomassa, e Noernberg (1996) também encontra evidências da maior influência da altura de plantas aquáticas na banda C.

Os fatores relativos ao imageamento também influem no comportamento e na interpretação do retroespalhamento. Entre eles está a variação do retroespalhamento devido ao posicionamento das amostras na cena. Este fato foi apresentado por Noernberg (1996), que ao estudar a correlação entre o retroespalhamento na polarização cruzada HV e o índice de biomassa BMI $((VV+HH) / 2)$ (desenvolvido por Pope et al., 1994), percebeu a formação de dois agrupamentos de amostras de floresta (GI e GII) (Figura 2). A correlação entre os parâmetros usando todo o conjunto de amostras de uma determinada cena foi baixa (0,4). Todavia, quando os agrupamentos foram analisados separadamente, a correlação ficou em torno 0,9. Ao analisar o posicionamento das amostras na cena, percebeu-se que as amostras do GII localizavam-se na margem esquerda de um canal. Observou-se também que a diferença entre o ângulo de incidência médio entre os dois agrupamentos foi de 4°. Este fato pode estar associado à influência do ângulo de incidência no sinal de resposta. Outra hipótese, levantada pelo autor para explicar o fato, refere-se à maior penetração da onda incidente no volume da floresta na margem esquerda, devido à sua fronteira com a água.

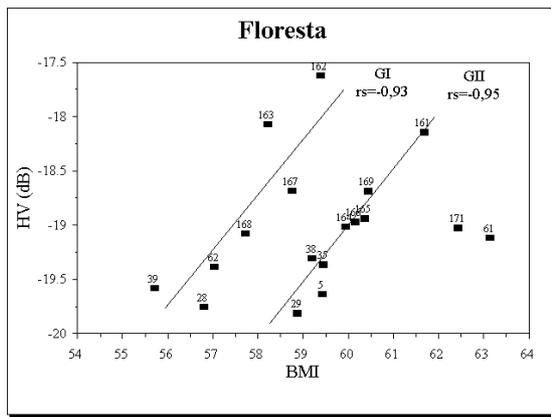


Figura 2 –Diagrama de dispersão do σ° da polarização HV com o índice BMI para a classe Floresta. O índice BMI é expresso em escala linear para permitir o uso direto de algoritmos de processamento de imagem.

Fonte: Noernberg (1996) p. 62.

A orientação dos elementos espalhadores, hastes, pecíolos e folhas, no caso das plantas aquáticas, pode alterar o retroespalhamento em diferentes polarizações. Isto é bem evidente no estudo realizado por Ulaby e Wilson (1985), no qual é relacionada a importância das hastes e das folhas, em dosséis de soja, na atenuação do σ° . Com a retirada das folhas do dossel, a polarização VV sofreu uma redução de 10% na atenuação do σ° na banda C. Já a atenuação do σ° na polarização HH sofreu uma redução de 50% com a retirada das folhas. Isto indica, segundo os autores, que para a polarização VV, as folhas possuem importância secundária na atenuação do σ° , em relação às hastes e galhos de um dossel de soja. No estudo das plantas aquáticas do reservatório de Tucuruí-PA, Costa et al. (1996) e Noernberg (1996) encontraram valores de retroespalhamento maiores na polarização VV que na HH para o gênero *Eichhornia sp.*, e maiores valores em HH para *Scirpus sp.*, *Typha sp.* e *Pistia sp.*, provavelmente devido à orientação vertical dos pecíolos do gênero *Eichhornia sp.* No mesmo estudo, Noernberg (1996) salienta que a polarização que apresenta melhor potencial de discriminação das classes de plantas aquáticas é a polarização HH.

O efeito da banda utilizada, ou comprimento de onda, está relacionado ao tamanho dos elementos espalhadores e à capacidade de penetração no dossel. Isto está refletido no maior uso das bandas P e L no estudo de florestas, uma vez que estas dão informações de todo o perfil vertical da floresta, incluindo a influência dos troncos e até do solo (Sader, 1987). No entanto, estudos de florestas com a banda C estão limitados à parte superior da floresta (galhos, ramos, folhas, etc.). No caso da vegetação herbácea, as diferenças entre o retroespalhamento das polarizações HH e VV encontradas por Ulaby et al. (1987) foram mais evidentes na banda C que na

Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 5, p.41-54, 1999.

Banda L. Durben et al. (1995), estudando a correlação entre o LAI (índice de área foliar) de campos de arroz inundados e as diferentes polarizações nas bandas C e L, somente encontrou correlação significativa com o LAI na polarização VV da banda C. Assim percebe-se que a banda C, quando utilizada em vegetação herbácea, fornece mais informações sobre as características do dossel, enquanto que a banda L parece dar mais informações sobre o substrato das vegetações herbáceas.

5. A CLASSIFICAÇÃO DIGITAL

Uma vez diferenciadas as classes de plantas aquáticas estudadas, a partir das suas diferenças morfológicas e estruturais em relação às características de imageamento, a classificação digital dessas classes é importante, tendo em vista que se deseja quantificar e determinar a distribuição das mesmas. Os classificadores geralmente utilizados para a classificação de imagens obtidas por sensores óticos assumem que os dados possuem distribuição normal. Apesar destes dados nem sempre possuírem distribuição normal, estes classificadores têm apresentado bons resultados. Contudo, para dados SAR, os processos de interação entre a radiação eletromagnética (REM) e o alvo, na faixa das microondas, são dominados pelas características macroscópicas das plantas aquáticas, entre outros fatores. Isto resulta numa maior aleatoriedade no retorno da REM. Conseqüentemente, estes classificadores não apresentam resultados satisfatórios. Noernberg (1996) encontrou possibilidade de discriminação de gêneros de plantas aquáticas ao analisar visualmente uma composição colorida com as polarizações HH, VV e HV. Porém, ao tentar uma classificação digital, os resultados foram pobres. Com isto, testou-se a aderência das classes de plantas aquáticas em 5 distribuições estatísticas diferentes. Este teste apresentou as distribuições estatísticas Amplitude G0 e Log-Normal como as distribuições mais frequentes dentre as classes de plantas aquáticas.

Tais aspectos de não normalidade da distribuição estatística dos dados SAR são ainda uma limitação ao uso operacional e à classificação automática deste tipo de dado. Yanasse et al. (1994 e 1995) testou o uso de testes de aderência e função de autocorrelação espacial para discriminação do uso do solo a partir de dados multipolarimétricos, e prova a possibilidade de discriminação entre floresta e não floresta usando certas características como: coeficiente de variação da amostra, *p*-valores e função de autocorrelação, e ressalta que a separação entre diferentes tipos de florestas é uma questão difícil. Vieira (1996) testou um classificador contextual markoviano conhecido por Modas Condicionais Iterativas (ICM), o qual apresentou melhores resultados que a classificação por Máxima Verossimilhança, porém ainda insatisfatórios. Costa et al. (1997) testou o uso de segmentadores em dados JERS e Radarsat na discriminação de pastagens e florestas, que apresentou desempenho fraco. Todavia, o desempenho da classificação melhora sensivelmente quando se utilizam imagens multitemporais e multifrequência. Mauricio et al. (1996a) comparou duas diferentes metodologias de pré-processamento de imagens multipolarimétrica, esta comparação indicou que a metodologia para suavização do

speckle, a correção geométrica e uma reamostragem dos pixels com interpolador de convolução cúbica e vizinho mais próximo não alteram, de forma significativa, os valores de retroespalhamento (σ^0 (dB)) de plantas aquáticas. Novo et al. (1998) usou medidas de textura para discriminar plantas aquáticas a partir de imagem Radarsat. Estas medidas de textura não aumentaram a discriminação entre as classes.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Cada vez mais o uso de radar vem ganhando espaço no estudo e monitoramento de parâmetros ambientais, principalmente pelo fato da garantia na obtenção da informação, devido à sua independência das condições de tempo. Inicialmente concebido para o estudo de florestas, com o aprimoramento no entendimento das variáveis que envolvem o uso de dados de radar, a sua utilização passou para outras aplicações. Entre elas, pode-se citar: estudo de culturas agrícolas, umidade do solo, monitoramento de derramamentos de óleo no mar, produção de base para mapas cartográficos, estruturas geológicas, mapeamento de áreas inundáveis, movimentação de camadas de gelo etc.

Os SARs atualmente em operação, como o ERS-2 e o Radarsat, isoladamente estão limitados às informações oriundas dos mecanismos de interação referentes à sua banda e polarização. Entretanto, as informações dos diferentes SARs podem ser utilizadas em conjunto, aumentando assim a gama de informações disponíveis, já que os SARs multipolarimétricos e multifrequência só estarão disponíveis a partir do ano 2000.

A grande questão ainda a ser solucionada está relacionada ao fato da possibilidade de visualização de diferentes alvos com composições de radar, e a incapacidade de fazer os sistemas de processamento digital perceberem essas diferenças dos alvos e, com isso, processarem automaticamente a classificação.

7. CONCLUSÃO

Devido a todos os aspectos que envolvem uma imagem de radar, vê-se claramente a possibilidade de usar esse tipo de dado para o monitoramento de fenômenos dinâmicos, como a distribuição espacial das plantas aquáticas, que responde às variações hidrológicas de um sistema aquático. Estas variações podem ser sazonais ou anuais, em função de mudanças no uso e ocupação do solo.

O uso de radar possui como vantagens a independência das condições meteorológicas para a obtenção dos dados, além da variedade de informações a respeito da arquitetura, composição e morfologia do dossel, devido aos diversos modos de aquisição de imagens dos sistemas radar. Contudo, este mesmo variado número de parâmetros presente no sistema radar aparece como desvantagem de uso, pois dificulta a interpretação dos mecanismos de interação, além de prejudicar à classificação digital deste tipo de dados, devido à não normalidade de sua distribuição estatística.

Os problemas relacionados à dificuldade de classificação e ao entendimento das variáveis do radar ainda são limitantes para um completo aproveitamento das informações presentes nas imagens de radar. No entanto, muitos estudos estão sendo conduzidos no sentido de suprir estas carências.

O uso de radar apresenta grande potencial para o monitoramento de fenômenos dinâmicos em regiões tropicais, como a distribuição espacial de plantas aquáticas. Embora isto seja evidente, ainda há um longo caminho de investigações para este tipo de aplicação se tornar operacional.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa RHAE-DTI (proc. indiv. 360719/96.1).

REFERÊNCIAS

- ABDON, M.M.; MEYER, M. “Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no reservatório de Tucuruí através de dados de satélite Landsat/TM”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (4.: 1990: Manaus), Manaus. **Anais**. p. 545-548.
- ALLEN, C.T.; ULABY, F.T. “Modeling the polarization dependence of the attenuation in vegetation canopies”. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS’84) (1984: Strasbourg). Strasbourg. 1984. Remote Sensing - From Research Towards Operational Use. Noordwijk, ESA/ESTEC. v.1, p. 119-124.
- COSTA, M.P.; AHERN, F.J.; NOVO, E.M.; PIETSCH, R.W.; NOERNBERG, M.A. “Efeito dos dados de multipolarização SAR-C aero-transportado na separabilidade do retroespalhamento de plantas aquáticas do reservatório de Tucuruí - Amazônia”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (8.: 1996: Salvador). **Anais**. Salvador, INPE, 1996. Em CD-ROOM.
- DURBEN, S.L.; MORRISSEY, L.A.; LIVINGSTON, G.P. “Microwave backscatter and attenuation dependence on leaf area index for flooded rice fields”. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 3, p. 807-810, 1995.
- ELACHI, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. New York, John Wiley, 1987.
- JUNK, W.J. **Macrófitas aquáticas nas várzeas da Amazônia e possibilidades do seu uso na agropecuária**. Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, 1979.
- JUNK, W.J.; HOWARD-WILLIAMS, C. Ecology of aquatic macrophytes in Amazonia. In: Sioli, H. **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**. Dordrecht: Dr. W. Junk Publishers, 1984. p. 269-293. (Monographiae Biologicae, 56).

- KELLY, C.A.; RUDD, J.W.M.; St. LOUIS, V.L.; MOORE, T. "Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies". **EOS, Transactions, American Geophysical Union**, v. 75 n. 29, p. 332-334, 1994.
- LE TOAN, T.; LOPES, A.; HUET, M. "On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics". In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'84) (1984: Strasbourg). Strasbourg, 1984. Remote Sensing - From Research Towards Operational Use. Noordwijk, ESA/ESTEC. v.1, p. 155-160.
- NOERNBERG, M.A. **Discriminação de plantas aquáticas utilizando dados SAR multipolarimétricos na banda C**. São José dos Campos, 1996. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (INPE-6619-TDI/580)
- NOERNBERG, M.A.; COSTA, M.P.; NOVO, E.M.; AHERN, F.J. "Análise comparativa entre duas diferentes metodologias de pré-processamento de imagens SAR-C aerotransportada para determinação dos valores de retroespalhamento de plantas aquáticas". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (8.: 1996: Salvador). **Anais**. Salvador, 1996a. Em CD-ROOM.
- NOVO, E.M.; COSTA, M.P.; NOERNBERG, M.A. "Airborne SAR data to map Tucuui reservoir (Amazon)". In: SOUTH AMERICAN RADAR EXPERIMENT - SAREX-92 (1994: Paris). Paris, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. p. 71-86.
- NOVO, E.M.L.M.; COSTA, M.P.F.; MANTOVANI, J.E. Avaliação do uso de medidas de textura na discriminação de ambientes aquáticos do reservatório da UHE Tucuui a partir de dados RADARSAT". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (8.: 1998: Santos). **Anais**. Santos, INPE. Em CD-ROOM.
- POPE, K.O.; REY-BENAYAS, J.M.; PARIS, J.F. "Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American Tropics". **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 205-219, 1994.
- ROSENTHAL, W.D.; BLANCHARD, B.J.; BLANCHARD, A.J. "Visible / infrared / microwave agriculture classification, biomass, and plant height algorithms". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-23, n. 2, p. 84-89, 1985.
- SADER, S.A. "Forest biomass, canopy structure, and species composition relationships with multipolarization L-band Synthetic Aperture Radar data". **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 2, p. 193-202, 1987.
- SIMONETT, D.S.; DAVIS, R.E. Image analysis - active microwave. In: Simonett, D.S. ed. **Manual of remote sensing**. 2. ed. Falls Church, ASP, 1983. cap. 25, p. 1125-1180, v.1.
- TREVETT, J.W. **Imaging radar for resources surveys**. New York, Chapman and Hall, 1986.

- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Washington, DC, Addison-Wesley. v. 2, 1982.
- ULABY, F.T.; WILSON, E.A. "Microwave attenuation properties of vegetation canopies". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-23, n. 5, p.746-753, 1985.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading, Addison-Wesley. v 3, 1986.
- ULABY, F.T.; TAVAKOLI, A.; SENIOR, T.B.A. "Microwave propagation constant for a vegetation canopy with vertical stalks". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-25, n. 6, p. 714-725, 1987.
- ULABY, F.T.; DOBSON, M.C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain**. Norwood, Artech House, 1989.
- VIEIRA, P.R. "**Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança para imagens SAR**". São José dos Campos, 1996. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (INPE-6124-TDI/585)
- WETZEL, R.G. **Limnology**. W.B. Philadelphia, Saunders Company, 1975.
- YANASSE, C.C.F.; FRERY, A.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; FILHO, P.H.; DUTRA, L.V. "Statistical analysis of SAREX data over the Tapajós - Brazil". In: SOUTH AMERICAN RADAR EXPERIMENT - SAREX-92 (1994: Paris). Paris. 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. p. 25-40.
- YANASSE, C.C.F.; FRERY, A.C.; SANT'ANNA. "**Stochastic distributions and the multiplicative model: relations, properties, estimators and applications to SAR image analysis**." São José dos Campos, INPE, 1995. (INPE-5630-NTC/318).

(Recebido em 02/06/99. Aceito para publicação em 15/07/99.)