

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
CURSO DE MESTRADO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

INPE-5629-PUD/066

**APLICAÇÃO DE DADOS DE RADAR PARA A DISCRIMINAÇÃO
DE ESPÉCIES DE PLANTAS AQUÁTICAS**

Mauricio Almeida Noernberg

Monografia referente ao Exame Integrado em Sensoriamento Remoto, aprovada em
04 de abril de 1995.

INPE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
1995

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho contou com a colaboração de pessoas e entidades, às quais o autor expressa seus sinceros agradecimentos.

À Dra. Evlyn M.L. de Moraes Novo por seu profissionalismo, serenidade e segurança na orientação deste trabalho.

A Camilo Daleles Rennó pelo auxílio na elaboração das figuras.

A todos os colegas e amigos do curso de Mestrado. Em particular a Alejandro C. Frery, Camilo Daleles Rennó, María Silvia Pardi Lacruz, Maycira P.F. Costa, Renata Mendes Luna, Ronald Buss de Souza e Tatiana Mora Kuplich, pela boa vontade e sinceridade nas sugestões, críticas e troca de idéias.

Aos funcionários do INPE, em especial aos funcionários da Biblioteca e da Divisão de Sensoriamento Remoto, que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo formar uma base teórica de conceitos que envolvem o uso de dados de radar, e avaliar o potencial do uso desses conceitos na identificação de gêneros de plantas aquáticas. As plantas aquáticas possuem um papel importante na produtividade e eutrofização de lagos artificiais ou naturais e também das regiões costeiras. Recentes estudos de ciclos biogeoquímicos e sua influência no balanço global dos gases constituintes da atmosfera, sugerem uma importante contribuição das plantas aquáticas neste balanço global. Os dados de radar, devido sua independência de uma fonte de iluminação e da possibilidade de obtenção de dados mesmo na presença de nuvens, levam uma grande vantagem, principalmente em regiões tropicais. Devido às características morfológicas e de tamanho das plantas aquáticas, o uso de dados polarimétricos na banda-C permite uma melhor identificação de seus mecanismos de espalhamento, possibilitando a diferenciação de alguns gêneros de plantas aquáticas. A partir da análise de dados polarimétricos podem-se obter índices biofísicos que darão informações a respeito da estrutura da cobertura vegetal, da interação das microondas no volume do dossel, da biomassa e da homogeneidade do dossel.

ABSTRACT

The objective of this work is to provide theoretical background on radar data application and to evaluate the potential of these concepts in the identification of genus of aquatic plants. The aquatic plants are important in the processes of artificial and natural lake productivity and eutrofization, and coastal zone as well. Recent studies of biogeochemical cycles and their influence in the atmosphere gas constituents suggest an important contribution of the aquatic plants in the global budget. Radar data have advantages, mainly in tropical regions, due to their independence of a illumination source and the possibility of obtaining data in the presence of clouds. The use of C-band polarimetric data permits a better identification of the scattering mechanisms of the aquatic plants related to their morphological characteristics and height, these makes it possible the differentiation of some genus of aquatic plants. It's possible to obtain biophysical index from the polarimetric data which will give information about the structure of the vegetal canopy, the interaction of microwave in the canopy volume, and the biomass and canopy homogeneity.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
2 - <u>PLANTAS AQUÁTICAS</u>	2
3 - <u>ESPECTRO DE MICROONDAS</u>	6
4 - <u>POLARIZAÇÃO</u>	7
5 - <u>SISTEMA RADAR</u>	8
5.1 - Geometria de imageamento	10
5.2 - Resolução	11
5.3 - Equação de radar	12
5.4 - <i>Speckle</i>	13
6 - <u>MECANISMOS DE INTERAÇÃO DAS MICROONDAS COM A SUPERFÍCIE</u>	14
6.1 - Vegetação	18
7 - <u>DADOS POLARIMÉTRICOS E PLANTAS AQUÁTICAS</u>	22
7.1 - Assinatura da polarização	25
7.2 - Coeficiente de variação	27
7.3 - Identificação dos mecanismos de espalhamento	28
7.4 - Aplicações de dados polarimétricos	29
7.4.1 - Índices biofísicos	32
8 - <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Fig. 1 - Fluxo de metano de comunidades de vegetação ao longo de um gradiente de elevação idealizado; valores médios \pm desvio padrão.....	4
Fig. 2 - Alguns gêneros de macrófitas aquáticas.....	5
Fig. 3 - Espectro eletromagnético e bandas da região de microondas.....	6
Fig. 4 - Transmissão atmosférica para a região de microondas.....	7
Fig. 5 - Geometria de imageamento de radar de abertura real.....	10
Fig. 6 - Composição de retorno do sinal de uma área - <i>fading</i>	14
Fig. 7 - Reflexão das microondas em diferentes superfícies.....	15
Fig. 8 - Refletores de canto: a) diédricos; b) triédricos.....	16
Fig. 9 - Projeção da amplitude do sinal retroespalhado em 2 planos perpendiculares.....	17
Fig. 10 - Retroespalhamento nas bandas X, C e L.....	19
Fig. 11 - Profundidade de penetração das microondas num dossel de milho.....	21
Fig. 12 - a) Sistema de coordenadas de radar polarimétrico; b) elipse de polarização; c) esfera de Poincaré.....	24
Fig. 13 - Assinatura da potência total de algumas áreas de treinamento, onde a amplitude da assinatura é χ , e ψ é proporcional à potência total recebida quando a onda tem aquela polarização particular.....	26
Fig. 14 - Geometria para a) <i>single bounce</i> ; b) <i>double bounce</i> ; c) reflexão difusa.....	29

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 macrófitas aquáticas para o ecossistema lacustre, sabe-se que a proliferação excessiva destes vegetais 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, 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, além de muitos outros problemas.

Deste conjunto de problemas advém a necessidade do entendimento e estudo das comunidades de macrófitas aquáticas para subsidiar medidas de manejo adequadas, que 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 macrófitas aquáticas é a contribuição desses ambientes para o balanço global no ciclo do Carbono. Kelly et al. (1994) mostram 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).

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.

Produtos de sensoriamento remoto são importantes fontes de dados em áreas extensas e de difícil acesso. O uso de imagens de RADAR (*Radio Detection and Ranging*) para estudos ambientais é altamente vantajoso, principalmente em regiões tropicais onde a presença de cobertura de nuvens é freqüente. O fato de as microondas penetrarem nas nuvens, garante uma constância na obtenção de dados da área estudada. A independência do Sol como fonte de iluminação coloca como vantagem adicional a possibilidade de uso de imagens de radar obtidas durante a noite.

O principal objetivo deste trabalho é formar uma base teórica de conceitos que envolvem o uso de dados de radar, e avaliar o potencial do uso desses conceitos na identificação de espécies de plantas aquáticas.

2 - PLANTAS AQUÁTICAS

Os tipos de vegetação podem ser classificados quanto à fisionomia da planta - forma e estatura. São classificados em três tipos:

- a) floresta - vegetação dominada por plantas com madeira (tronco e galhos), com 6 metros de altura, ou mais;
- b) cerrado - vegetação dominada por plantas com madeira (tronco e galhos), com 6 metros de altura, ou menos;
- c) herbáceas - vegetação dominada por plantas sem madeira.

As plantas aquáticas ou macrófitas aquáticas são plantas herbáceas especializadas, que crescem na água, ou em solos com água, ou ainda, solos que estão, geralmente, saturados de água.

O ambiente propício ao desenvolvimento das plantas aquáticas é chamado de áreas alagadiças (*wetlands*), e é definido como o lugar onde a água é o substrato, ou possui influência dominante no crescimento da planta, ou ambos. A água pode estar acima ou logo abaixo da superfície do solo, continuamente ou freqüentemente. As plantas podem estar enraizadas no solo ou flutuando (Burrows, 1990).

Extensas áreas da bacia amazônica são formadas por áreas alagadiças. Entretanto não chegou-se ainda à uma quantificação consensual do total de áreas alagadiças na bacia amazônica. Segundo Junk e Howard-Williams (1984), o total destas áreas, na bacia amazônica, estaria em torno de 20%.

Para alguns lagos artificiais as macrófitas aquáticas podem ser consideradas como as principais responsáveis pela produtividade primária, tornando-se a base principal da cadeia trófica, e sobrepondo-se, nestes casos, ao papel da comunidade fitoplanctônica. Esta tendência, dá-se principalmente para o caso de reservatórios de regiões tropicais, onde a morfometria e as condições climáticas, além de condições nutricionais extremamente favoráveis devido à biomassa submersa durante o enchimento do reservatório, podem propiciar uma colonização intensa por estes vegetais (Junk e Howard-Williams, 1984; Barrow, 1987).

Atualmente há uma crescente preocupação no entendimento dos ciclos biogeoquímicos e suas influências no balanço global dos gases constituintes da atmosfera. As áreas alagadiças e as plantas aquáticas possuem um papel importante no ciclo do gás Metano. Morrissey e Livingston (1994) destacam a importância deste ambiente no fluxo do Metano. Essas áreas alagadiças possuem o maior fluxo de Metano em direção à atmosfera em relação às outras classes estudadas, com $12.68 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Figura 2).

Kelly e Rudd (1994) salientam que antes de inundadas, superfícies terrestres secas e áreas alagadiças (*wetlands*) fixam e respiram CO_2 , estocam carbono no solo e consomem CH_4 . Áreas alagadiças também fixam e respiram CO_2 , estocam Carbono na forma de turfa, e liberam CH_4 . Após a inundação, as taxas desses processos do ciclo do Carbono e sua gama de efeitos na atmosfera muda. O conhecido fenômeno do esgotamento do Oxigênio em reservatórios e superfícies de águas mostra que, mesmo que florações de algas sejam freqüentemente observadas, o balanço, entre a fixação de CO_2 pelas algas e a decomposição do Carbono orgânico, está inclinado em favor da decomposição. Isto deve resultar numa cadeia de liberação de gases do efeito estufa, CO_2 e CH_4 , para a atmosfera.

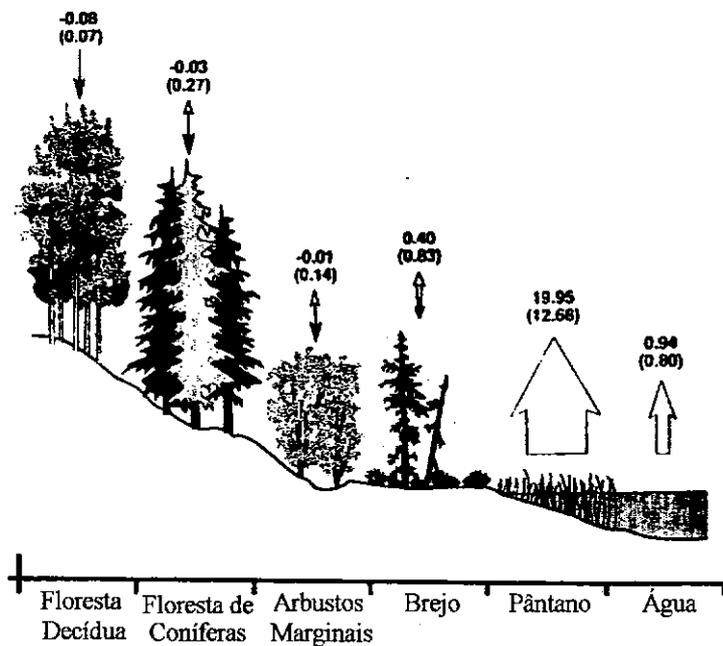


Fig. 1 - Fluxo de Metano ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) de comunidades de vegetação ao longo de um gradiente de elevação idealizado; valores médios de fluxo de Metano e \pm desvio padrão (valores entre parênteses). Classes, da direita para a esquerda, representadas por floresta decídua (11), floresta de coníferas (8), arbustos marginais (12), brejo (22), pântano (56), e água (14). Os valores ao lado do nome das classes representam o número de observações feitas em cada classe.

FONTE: Adaptada de Morrisey e Livingston (1994), p. 1341.

Neste contexto as macrófitas aquáticas possuem um papel importante, pois como as plantas terrestres, fixam e respiram CO_2 , e são fonte de Metano para a atmosfera (Wetzel e Grace, 1983).

Na identificação de espécies de macrófitas aquáticas, com dados de radar, o principal parâmetro que possibilitará a diferenciação das espécies é a sua forma. A Figura 2 mostra alguns dos principais gêneros que ocorrem nos reservatórios do Norte do Brasil.

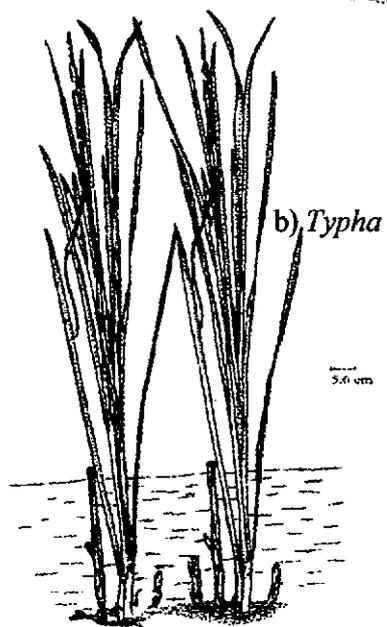
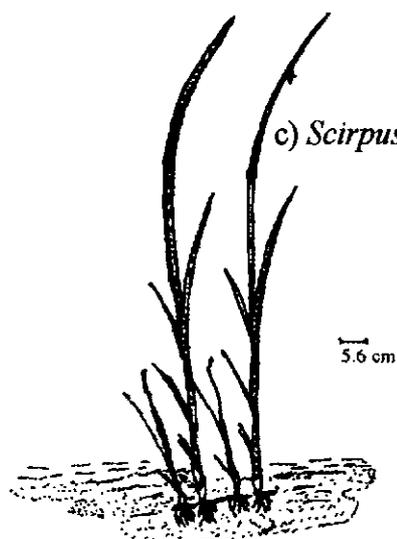
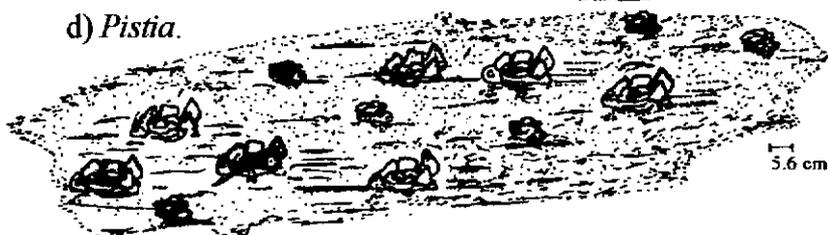
a) *Aninga*.c) *Scirpus*.d) *Pistia*.

Fig. 2 - Alguns gêneros de macrófitas aquáticas: a) *Aninga*; b) *Typha*; c) *Scirpus*; d) *Pistia*. A escala de referência usada corresponde ao comprimento de onda na banda C (5.6 cm).

FONTE: Hoehne, 1948.

São praticamente inexistentes trabalhos específicos relacionando dados de radar e macrófitas aquáticas. Entretanto para se iniciar tal estudo podem-se fazer analogias, utilizando conceitos acerca dos princípios básicos de interação das microondas com o dossel de plantas não aquáticas. Para tal, parte-se de trabalhos que relacionam coberturas vegetais herbáceas em solos secos com os mecanismos de interação das microondas, trabalhos estes mais abundantes na literatura (Ulaby et al., 1987; Paris e Ustin, 1990; Ott et al., 1990).

3 - ESPECTRO DE MICROONDAS

O espectro de microondas compreende a faixa de frequência entre 0.3 e 300 Ghz (de 1m à 1mm em comprimento de onda). A Figura 3 apresenta as várias regiões do espectro eletromagnético e a designação das bandas espectrais da região de microondas.

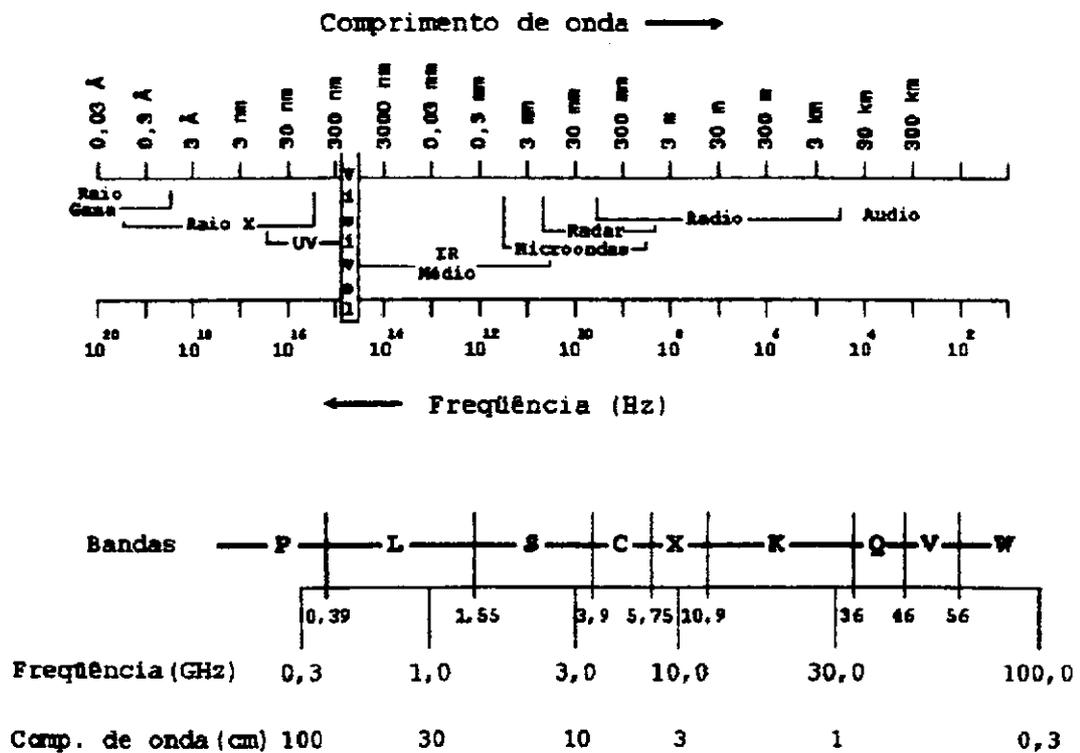


Fig. 3 - Espectro eletromagnético e bandas da região de microondas.

FONTE: Adaptada de Dallemand et al. (1993), p. 4.

Pode-se observar, também, quão ampla é a seção das microondas quando comparada com a faixa visível do espectro. Cada sistema radar opera com uma frequência ou comprimento de onda específico dentro de uma ou mais das bandas especificadas na Figura 3.

A radiação na faixa de microondas apresenta excelentes condições de transmissão na atmosfera, sendo praticamente transparente, mesmo na presença de nuvens e taxas moderadas de precipitação, na faixa entre 1-15 Ghz (Figura 4).

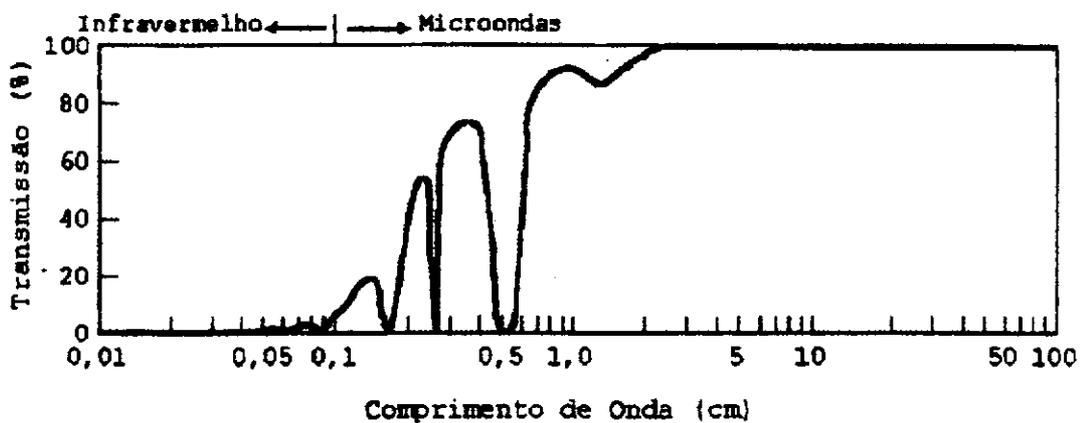


Fig. 4 - Transmissão atmosférica para a região de microondas.

FONTE: Adaptada de Curlander e Mcdonough (1991), p. 5.

4 - POLARIZAÇÃO

É a propriedade de uma onda eletromagnética descrever uma variação, na direção e na amplitude do vetor campo elétrico, em relação ao tempo. Variação esta, observada na direção de propagação da onda.

Uma onda eletromagnética é constituída por dois campos de força, o campo elétrico (E) e o campo magnético (H). No espaço, estes dois campos de força são perpendiculares entre si, e transversais à direção de propagação da onda. A direção e propagação de apenas um dos campos (freqüentemente o campo elétrico) é suficiente para especificar, completamente, a direção e magnitude do outro campo, através das equações de Maxwell (Elachi, 1987).

Uma onda eletromagnética que produz um campo elétrico em um plano fixo, ao longo da direção de propagação, é dita uma onda polarizada linearmente. A maioria dos sistemas radar imageadores emitem e recebem ondas polarizadas linearmente.

As polarizações lineares usadas pelos sistemas radar são a polarização horizontal (H) e a vertical (V). A polarização horizontal é geralmente definida quando o vetor campo elétrico é perpendicular ao plano de incidência da onda. A polarização vertical corresponde ao caso onde o vetor campo elétrico é paralelo ao plano de incidência.

Quando se discute polarização, a notação HH é usada quando o sistema radar emite onda na polarização horizontal e recebe a onda de retorno também na polarização horizontal. A notação HV é usada quando o radar emite na horizontal e recebe na vertical, isso é válido também quando a emissão se dá na polarização vertical (VV e VH). As notações VV e HH são denominadas polarizações paralelas, e VH e HV polarizações cruzadas.

Os sinais de retorno são geralmente mais fortes em polarizações paralelas (HH, VV), enquanto que, nas polarizações cruzadas (HV, VH), os sinais são geralmente mais fracos (NASA, s.d.).

5 - SISTEMAS RADAR

O radar é um sistema sensor ativo, ou seja, possui sua própria fonte de energia, emitindo e recebendo radiação eletromagnética na faixa das microondas. Os radares imageadores são de dois tipos: SLAR e SAR.

O sistema radar SLAR (*Side Looking Airborne Radar*) trabalha com as dimensões efetivas da antena, emitindo energia na direção lateral à linha de vôo da plataforma que o suporta.

No imageamento com radares de abertura real (SLAR), a resolução ao longo da linha de vôo (*along-track*) ou resolução azimutal, é linearmente proporcional à

distância entre o sensor e a superfície (Elachi, 1987). A largura do feixe transmitido (*beamwidth*) é determinada pelo tamanho real da antena. Com isto, há uma limitação na resolução azimutal devido às dimensões da antena, a qual não permite a emissão de grandes feixes de microondas. Esta técnica de imageamento não é utilizada em plataformas orbitais se o objetivo é obter imagens de alta resolução.

Os radares de abertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*) são usados no sentido de melhorar a resolução azimutal. A técnica de abertura sintética de antenas é baseada no fato de que o feixe permanece sobre o alvo por uma quantidade significativa de tempo, e é registrado pelo radar várias posições adiante, ao longo da sua trajetória. O SAR utiliza o próprio deslocamento da plataforma, através da gravação e combinação dos sinais refletidos, para simular uma antena cujo comprimento é muitas vezes maior que o da antena real, permitindo, deste modo, o uso de uma antena menor.

Uma diferença básica entre um SLAR e um SAR, é que, no primeiro, apenas um eco de uma célula de resolução é registrado, ou seja, um pulso é emitido, refletido e recebido. No caso de um SAR, são registrados vários ecos de uma mesma célula de resolução, gerando numerosos sinais, os quais são sintetizados (Ulaby et al., 1981).

Os radares podem funcionar com uma ou duas antenas. Quando duas antenas são usadas, sendo uma para transmissão e outra para recepção do sinal refletido pelo alvo, o sistema é chamado biestático. Neste sistema, cada antena pode possuir características distintas de polarização, dimensão, ângulo de incidência, etc. Quando o sistema funciona com uma única antena para transmitir e receber o sinal retroespalhado, é chamado de monoestático.

Atualmente existem dois satélites orbitais em operação que possuem o instrumento SAR a bordo, o do satélite europeu *European Remote-Sensing Satellite - ERS1*, lançado em 1991 operando na banda-C com polarização VV, e o do satélite japonês *Japanese Earth Resource Satellite - JERS-1*, lançado em 1992, operando na banda-L com polarização HH. Para 1995 está previsto o lançamento de dois satélites; o

Há duas distâncias básicas utilizadas quando se trata de imagem de visada lateral, *slant range* e a distância no solo (*ground range*). A distância *slant range* é obtida pela diferença de tempo que o pulso leva para ir até o alvo e retornar para a antena ($ct/2$), ou seja é considerada a distância radial da plataforma até o alvo. Por outro lado a distância *ground range* é a distância no terreno entre o ponto em nadir da antena e o alvo (Figura 5) (Trevett, 1986).

As imagens de radar são comumente obtidas no modo *slant range*. Para a comparação de imagens de radar com mapas e informações de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), é necessário a transformação dos dados da imagem para o modo *ground range*. Esta transformação requer correções, na altitude da antena, na inclinação local e na elevação do terreno, para cada ponto.

5.2 - RESOLUÇÃO

A capacidade de discriminação espacial é geralmente descrita em termos de resolução. A resolução de um sistema de radar está vinculada aos elementos do sistema, que são: a potência de transmissão, o formato da antena, o ângulo de visada e a velocidade da plataforma (Ulaby et al., 1982).

A resolução espacial em sistemas radar é representada pela resolução transversal (*range*) que é a resolução transversal à linha de vôo (*across track*), e a resolução azimutal que é a resolução paralela à linha de vôo (*along track*).

A resolução transversal pode ser determinada pela duração do pulso transmitido pela antena. Se dois pontos estão separados por uma distância X_r , seus respectivos ecos estarão separados por uma diferença de tempo igual a

$$\Delta t = \frac{2X_r}{c} \text{sen } \theta, \quad (5-2)$$

onde c é a velocidade da luz e θ é o ângulo de incidência.

Denominando a menor diferença de tempo discriminável τ , então a resolução transversal é dada por

$$X_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \quad (5-3)$$

A resolução azimutal X_a é proporcional à distância entre a antena e o alvo, e é dada por

$$X_a = \frac{h\beta'}{\cos \theta} = \frac{h\lambda}{L \cos \theta} \quad (5-4)$$

onde β' é a largura do feixe no azimute, e L é o comprimento real da antena.

Teoricamente, a resolução azimutal para um SAR independe da distância entre a antena e o alvo (Ulaby e Dobson, 1989), sendo definida como a metade do comprimento real da antena, ou seja,

$$X_a = \frac{L}{2} \quad (5-5)$$

A resolução transversal de um SAR é igual a de um SLAR.

5.3 - EQUAÇÃO DE RADAR

A equação de radar 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 densidade da potência incidente, por unidade de área, sobre a superfície iluminada é dada por

$$P_i = \frac{P_t G}{4\pi r^2} \cos \theta \quad (5-6)$$

onde P_t corresponde à potência transmitida, r é a distância oblíqua entre a antena e a superfície imageada, θ o ângulo de incidência, e G o ganho da antena, que é dado por

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (5-7)$$

onde A corresponde à área efetiva da antena.

A potência do retroespalhamento P_s é,

$$P_s = P_i S \sigma \quad (5-8)$$

onde S é a área iluminada em um certo instante de tempo (Ex: $S = X_a X_r$), e σ é a superfície da seção transversal de retroespalhamento (a definição de σ encontra-se na p.16). A densidade da potência refletida por unidade de área na vizinhança do sensor é

$$P_c = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad (5-9)$$

e a potência total coletada pela antena é

$$P_r = A P_c \quad , \text{ ou} \quad (5-10)$$

$$P_r = \left[\frac{P_t G}{4\pi r^2} \cos \theta \right] \left[X_a X_r \sigma \right] \left[\frac{A}{4\pi r^2} \right] \quad (5-11)$$

Assim, observa-se que, com exceção de σ , todos os parâmetros 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).

5.4 - SPECKLE

O *speckle* é um ruído devido à natureza coerente do SAR. A potência de retorno do sinal, em um sistema de imageamento por radar, está sujeita a flutuações que podem levar do desaparecimento gradual até um retorno extremamente forte do sinal. São estas flutuações aleatórias observadas (residuais em relação à média do sinal incidente sobre uma célula de resolução ou *pixel*) que produzem o ruído chamado *speckle* em uma imagem de radar. Este ruído pode prejudicar muito a interpretação espacial e radiométrica das imagens (Basic..., 1994).

A todo instante de tempo o pulso de radar ilumina uma certa célula de resolução. Cada célula de resolução é composta de muitos espalhadores. Desta forma o eco retornado será uma adição coerente de ecos de um grande número de pontos. O retorno do sinal destes pontos, adicionados vetorialmente, resultam em um único vetor o qual representa a amplitude V e fase ϕ do sinal total. A fase ϕ_i de cada vetor é relacionada à distância entre o sensor e o ponto do espalhador correspondente. Se o sensor se move em uma pequena quantidade, todas as fases ϕ_i mudarão proporcionando uma mudança na amplitude V . Deste modo observações sucessivas de uma mesma área da superfície, pela qual o sensor move-se, resultará em diferentes valores de V . Esta variação é chamada *fading* (Figura 6).

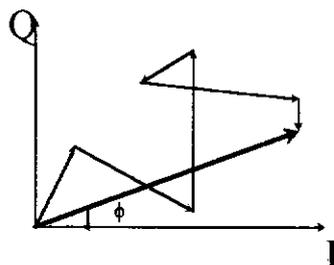


Fig. 6 - Composição de retorno de uma área - *fading*.

FONTE: Elachi (1987), p. 197.

Similarmente, tomando-se duas áreas vizinhas com a mesma seção transversal de retroespalhamento σ , mas com algumas pequenas diferenças, o retorno do sinal das duas áreas será diferente. Assim uma imagem de uma superfície homogênea, com uma seção transversal de retroespalhamento constante, apresentará variação no brilho de um *pixel* para outro. Esta variação é chamada de *speckle*.

6 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO DAS MICROONDAS COM A SUPERFÍCIE

Parte da energia enviada pelo radar é absorvida, parte é refletida, outra parte é difundida dentro do alvo e outra eventualmente, retorna para a antena para ser registrada e medida, servindo de base para a produção de uma imagem de radar.

A habilidade na 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 7 apresenta a descrição clássica da maneira pela qual a superfície afeta o retorno do sinal para a antena. Em um caso com superfícies lisas, visto por exemplo em 7a, a energia é refletida para longe da antena, e nenhum sinal é registrado, formando-se assim, uma imagem preta. Com o aumento da rugosidade na superfície, visto em 7b e 7c, a quantidade de sinal especular é reduzida, e há um aumento na quantidade de sinal registrado pela antena, conhecido como componente retroespalhada. Quanto maior a quantidade de energia retroespalhada maior é o brilho e a imagem tende aos níveis de cinza mais claros.

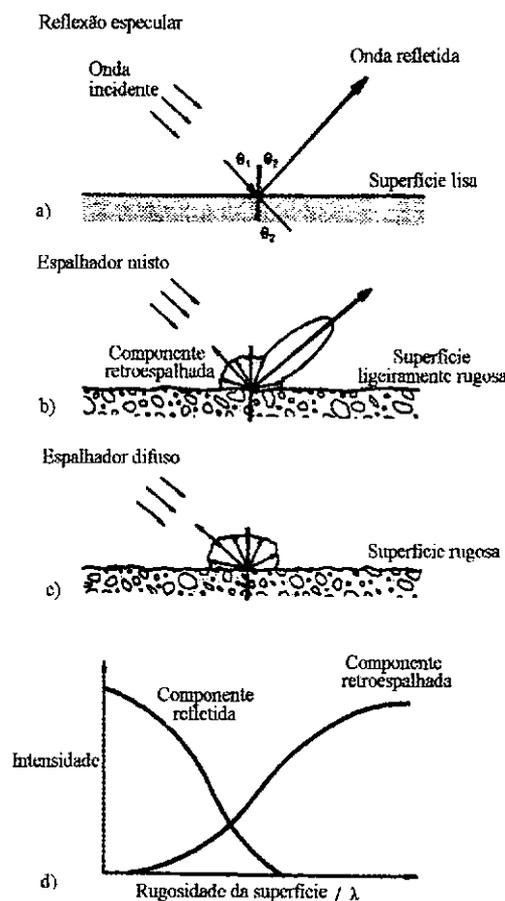


Fig. 7 - Reflexão das microondas em diferentes superfícies.

FONTE: Trevett (1986), p. 45.

A imagem de radar é, portanto, uma medida da componente de retroespalhamento do sinal e, visto que é relacionada com a rugosidade do alvo, a imagem de radar é, principalmente, uma representação da rugosidade da superfície.

Um caso particular de forte sinal de retorno ocorre quando duas, ou mais, superfícies lisas são adjacentes, causando uma reflexão especular. Este fenômeno é conhecido como reflexão de canto (*corner reflection*). A reflexão de canto é causada pelos chamados refletores de canto, que podem ser diédricos ou triédricos. Nos diédricos a reflexão ocorre quando há duas superfícies adjacentes, também chamada reflexão do tipo *double bounce*, e nos triédricos quando há três superfícies causando a reflexão (Figura 8).

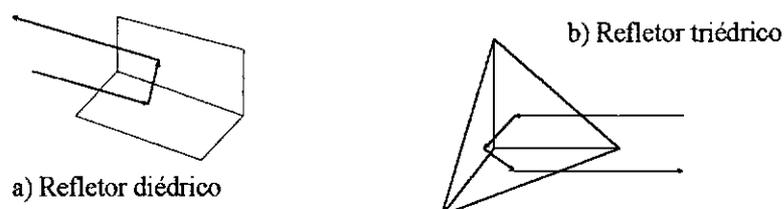


Fig. 8 - Refletores de canto: a) Diédricos; b) Triédricos.

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 o 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) sobre a área iluminada (A) - (σ/A). O coeficiente de retroespalhamento σ^0 pode ser expresso através dos níveis digitais nas imagens de radar.

As imagens de radar podem se apresentar de várias formas, dependendo do tipo de processamento e calibração usados na sua geração (Ulaby et al., 1986). Podendo se apresentar como:

a) imagem complexa: é formada pela projeção da amplitude em dois planos perpendiculares (I e Q), onde ϕ é a fase do sinal retroespalhado. Formada por uma parte real e outra imaginária para cada célula de resolução (x,y) (Figura 9).

$$Ae^{i\phi} = A \cos \phi + iA \sin \phi \quad (6-1)$$

$$Ae^{i\phi} = I + iQ \quad (6-2)$$

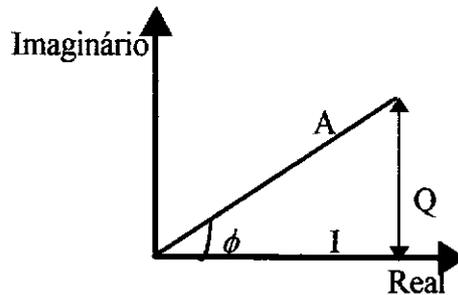


Fig. 9 - Projeção da amplitude do sinal retroespalhado em dois planos perpendiculares.

b) imagem de amplitude: o nível digital representa a amplitude (A) do sinal retroespalhado pela célula de resolução (x,y).

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (6-3)$$

c) imagem de intensidade: o nível digital representa a intensidade (i) (ou potência) do sinal retroespalhado pela célula de resolução (x,y).

$$i = A^2 \quad (6-4)$$

d) imagem relativa à seção transversal de retroespalhamento: (RBCS - *Relative Backscattering cross section*) o nível digital representa a seção transversal de retroespalhamento σ de uma célula de resolução (x,y). Neste tipo de imagem o nível digital geralmente é proporcional à $\sigma(x,y)$;

- e) imagem relativa ao coeficiente de retroespalhamento: (RBC - Relative Backscattering Coefficient) o nível digital representa σ° da célula de resolução, $\sigma^\circ(x,y)$;
- f) imagem do coeficiente de retroespalhamento: (BC - Backscattering Coefficient) quando a imagem RBC é submetida a testes de calibração absoluta, no sentido de estabelecer uma calibração relacionando o nível digital e o σ° da célula de resolução correspondente.

6.1 - VEGETAÇÃO

Ulaby et al. (1986) relacionam os parâmetros que influenciam no comportamento do retroespalhamento; sendo que os relativos ao dossel, são:

- a) a constante dielétrica da vegetação, que é fortemente influenciada pelo conteúdo de umidade. O conteúdo de umidade pode variar significativamente entre os diferentes constituintes do dossel (folhas, troncos e frutos) dependendo do estágio de desenvolvimento, 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.);

e os parâmetros relativos ao sensor:

- a) a frequência da onda incidente;
- b) a direção da onda incidente, relacionada ao ângulo de incidência e ao ângulo azimutal; e
- c) a direção de polarização das antenas de transmissão e recepção.

Um dossel é um exemplo clássico de espalhamento no volume. Parte da energia enviada pelo radar será retroespalhada pela superfície da vegetação, e outra parte da energia, dependendo das características do radar usado e do material do alvo, penetrará no alvo e será retroespalhada pelas superfícies dentro da vegetação e pelo solo. O espalhamento volumétrico é, entretanto, dependente da homogeneidade da superfície do alvo e das propriedades físicas deste, como: tamanho da folha, direção, umidade, densidade, altura, presença de vegetação rasteira, tipo de solo, etc., junto com as características do radar, tal como, o comprimento de onda.

A profundidade da penetração da onda de radar na vegetação depende da umidade e densidade da vegetação, assim como do comprimento de onda, sendo maior a penetração quanto maior o comprimento de onda (Figura 10). O espalhamento no volume conta com a habilidade da microonda em penetrar em certa cobertura do alvo e retornar sinais da subsuperfície do alvo. Na maioria dos casos o sinal resultante será a soma dos dois efeitos, em graus variados, dependendo da influência relativa da superfície e da subsuperfície dos alvos (Figura 10).

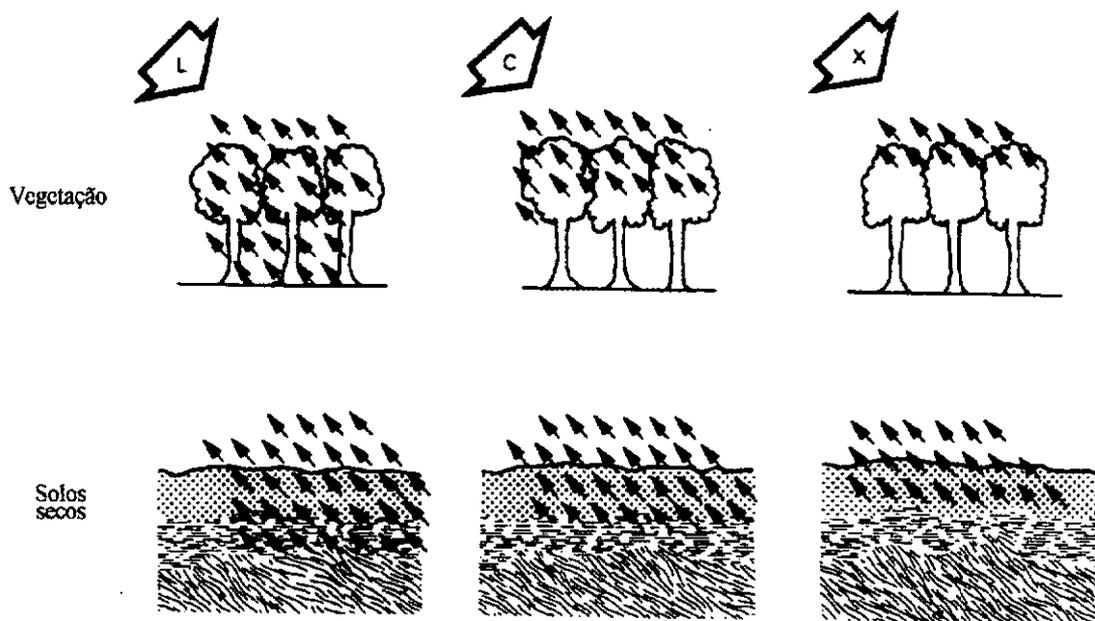


Fig. 10 - Retroespalhamento nas bandas X, C e L.

FONTE: Adaptada de Dallemand et al (1991), p. 7.

Em alguns casos o retorno da subsuperfície do alvo pode dominar a cena, tanto que a imagem gerada é da subsuperfície e não da superfície. Em superfícies descobertas pode ocorrer a penetração da onda no solo, e isto pode ser um indicador de diferentes tipos de solos. Em solos homogêneos, este fato pode ser relacionado com a sua umidade. Em alguns casos, ambos os efeitos, podem ocorrer simultaneamente. (Trevett, 1986).

A presença de água em uma determinada superfície ou sob esta superfície, tem influência direta na constante dielétrica, aumentando fortemente o retroespalhamento.

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 e, portanto, maiores chances de espalhamentos intra-dossel. Geralmente ocorre um aumento no retroespalhamento com o decréscimo no ângulo de incidência (Simonet e Davis, 1983).

A rugosidade pode ser definida pelo critério de Rayleigh. Segundo este critério uma superfície é vista como plana se a diferença entre a altura h da irregularidade da superfície for no máximo $h = \lambda / 8 \cos\theta$.

A rugosidade aparente de uma superfície é dependente do ângulo de incidência do radar e de seu comprimento de onda. Assim uma alta frequência de radar pode identificar uma superfície como rugosa, e essa mesma superfície, vista com um comprimento de onda maior, pode parecer lisa.

A seção transversal de retroespalhamento de superfícies naturais depende da polarização da onda incidente. A superfície é caracterizada por quatro seções transversais de retroespalhamento: σ_{HH} , σ_{HV} , σ_{VV} e σ_{VH} . Estes quatro parâmetros complexos, de amplitude e fase da onda, permitem a completa caracterização da matriz de espalhamento, a qual permitirá a derivação da seção transversal retroespalhada para qualquer polarização incidente ou retroespalhada, como mostrado na equação 6-5.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{HH} & \sigma_{HV} \\ \sigma_{VH} & \sigma_{VV} \end{pmatrix} \quad (6-5)$$

Isto se deve ao fato que os alvos terrestres podem ter a capacidade de despolarizar a onda incidente, transformando uma onda horizontalmente polarizada em uma onda verticalmente polarizada, por exemplo. Vários mecanismos estão envolvidos na despolarização, sendo um deles o espalhamento múltiplo devido à rugosidade do terreno (Fung e Ulaby, 1983).

A capacidade de despolarização de um meio é incrementada com o aumento da frequência, indicando a estreita relação entre o λ , a profundidade de penetração e a participação do volume e/ou da camada superficial da vegetação.

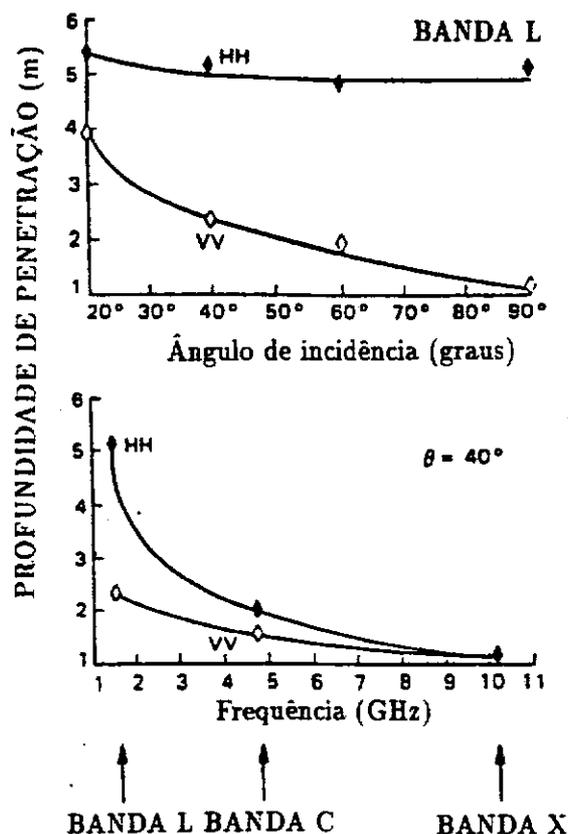


Fig. 11 - Profundidade de penetração das microondas num dossel de milho.

FONTE: NASA (s.d.), p. 195.

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 (Figura 11) (Allen e Ulaby, 1984; Le Toan et al., 1984).

A frequência e a polarização utilizadas influem, diretamente, no poder de penetração e na afinidade com os componentes vegetais do dossel, respectivamente, como ilustrado na Figura 11. Quanto maior a frequência menor a penetração no dossel.

7 - DADOS POLARIMÉTRICOS E PLANTAS AQUÁTICAS

O potencial das imagens de radar (SAR), para estudos ecológicos, tem aumentado enormemente com a introdução da multifrequência e sistemas multipolarimétricos (polSARs).

No sentido de aprimorar a identificação de espécies de plantas aquáticas com dados de radar, devido às suas características morfológicas e de tamanho, pode-se utilizar dois tipos de critérios de análise dos dados de radar: multifrequência e dados polarimétricos.

O uso da banda X, por radares orbitais, é limitado pela exigência de altas potências de transmissão, para altas frequências. O uso da banda L, devido ao seu λ (79,90 - 19,40 cm), não contribuiria com informações da superfície das plantas aquáticas, pois seu comprimento de onda é maior que os elementos difusores do dossel (folhas, hastes, inflorescências). Assim, devido à seu comprimento (5,6 cm) e à arquitetura das plantas aquáticas, o uso da banda C seria o mais indicado na identificação de espécies das mesmas, e os dados de multifrequência teriam pouca contribuição (Paris, 1994. c.p.).

O uso de dados polarimétricos pode ser uma ferramenta poderosa na discriminação de plantas aquáticas, pois permite melhor identificação dos mecanismos de espalhamento. Van Zyl et al. (1987) demonstram que informações extras fornecidas pelas medidas de polarização permitem melhor identificação dos mecanismos dominantes de

espalhamento e devem proporcionar soluções menos ambíguas para as propriedades elétricas e formas geométricas dos espalhadores.

A seguir serão mostrados alguns conceitos básicos para o uso de dados polarimétricos.

Recentemente têm havido um crescente interesse na utilização de imagens de radar polarimétrico. Estudos anteriores examinavam somente a potência do retroespalhamento das polarizações vertical e horizontal. Entretanto, a partir de medidas da magnitude e fase de quatro polarizações (HH, VV, HV e VH) é possível construir uma matriz de espalhamento completa e a matriz de Stokes.

Imagens convencionais de radar operam com uma única antena de polarização fixa, para ambos, transmissão e recepção. Desta forma, um único coeficiente de espalhamento é medido, para uma combinação específica de polarização recebida e transmitida, para todos os elementos de resolução da imagem. O resultado desta implementação é que, geralmente, a onda espalhada é medida como uma quantidade escalar, e qualquer informação adicional sobre a superfície contida nas propriedades da polarização do sinal recebido é perdida. Para assegurar que toda a informação na onda espalhada seja retida, a polarização da onda espalhada deve ser medida através de um processo de medida de vetor (Evans et al., 1988).

Uma imagem produzida por um radar polarimétrico, mede a dependência da intensidade do retroespalhamento do radar e a sua fase relativa, como uma função do estado de polarização da onda transmitida e recebida, para cada ponto na cena.

Para o uso de dados polarimétricos é necessário o entendimento do sistema de coordenadas utilizado na obtenção e tratamento dos dados (Figura 12a), e também da interpretação geométrica do estado da polarização, representado pela elipse de polarização (Figura 12b). A elipse pode ser descrita por dois ângulos: o ângulo χ que representa a elipticidade, ou “achatamento”, e o ψ que é o ângulo de orientação da elipse em relação à horizontal. O ângulo da elipticidade de 45° indica polarização circular, enquanto $\chi = 0$ representa polarização linear. Para o caso linear, ângulos de orientação

de 0° e 180° indicam polarização horizontal e $\psi = 90^\circ$ indica polarização vertical. Valores de χ entre 45° e -45° e valores de ψ entre 0° e 180° são suficientes para representar todas as polarizações físicas. O sentido da polarização é indicado pelo sinal do ângulo da elipticidade, valores negativos (positivos) de χ indica polarização com sentido para direita (esquerda). O eixo maior da elipse é proporcional à amplitude da onda, representada pela elipse.

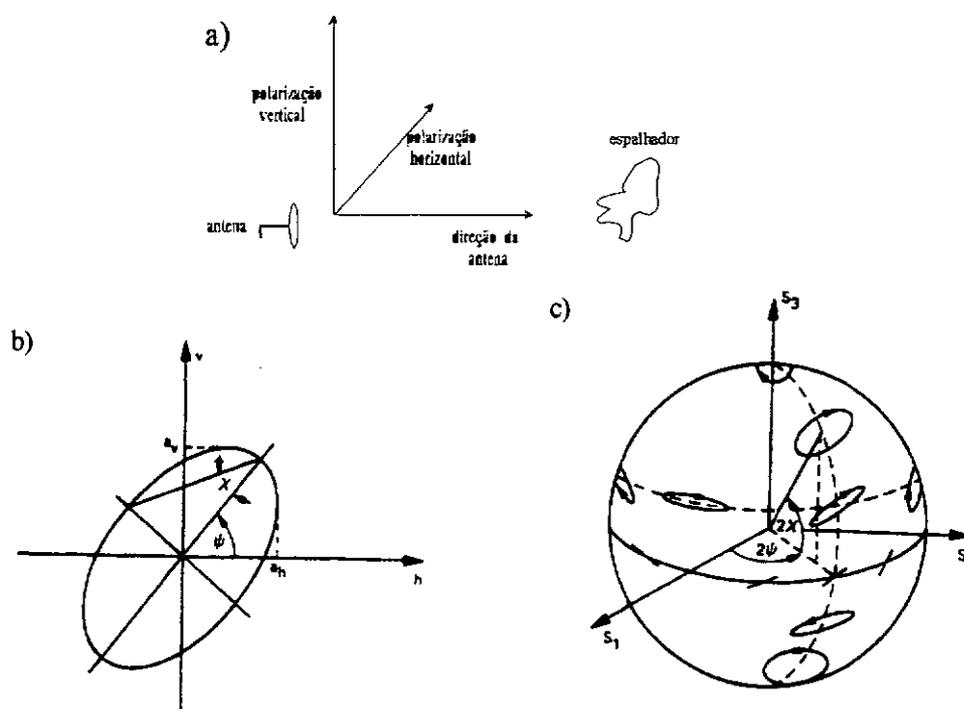


Fig. 12 - a) Sistema de coordenadas de radar polarimétrico; b) geometria da elipse de polarização; c) esfera de Poincaré.

FONTE: van Zyl et al. (1987), p. 531.

O estado da polarização de uma onda é expresso em termos dos parâmetros de Stokes, os quais são quantificados em relação ao ângulo de orientação ψ e o ângulo da elipticidade χ ,

$$S_1 = S_0 \cos(2\psi) \cos(2\chi) \quad (7-1)$$

$$S_2 = S_0 \sin(2\psi) \cos(2\chi) \quad (7-2)$$

$$S_3 = S_0 \sin(2\chi) \quad (7-3)$$

onde S_0 é o raio da esfera de Poincaré, e é proporcional a potência total na onda.

Usando o sistema de coordenadas descrito acima, é possível escrever as componentes transversas do campo elétrico da onda espalhada, em relação às componentes transversas do campo elétrico da onda de iluminação, usando uma matriz complexa de espalhamento 2×2 (eq. 6-5). Nela cada elemento descreve a magnitude e a fase relativa da onda incidente e espalhada.

Uma matriz real análoga, que relaciona os parâmetros de Stokes da onda espalhada com os parâmetros de Stokes da onda de iluminação, pode ser obtida. O espalhador pode ser, desta maneira, caracterizado também em termos da “matriz de Stokes” (van Zyl et al., 1987).

Evans et al. (1988) salientam que o conhecimento do vetor de Stokes do sinal recebido permite a decomposição de um sinal parcialmente polarizado, em componentes completamente polarizadas e completamente despolarizadas.

7.1 - ASSINATURA DA POLARIZAÇÃO

A assinatura da polarização de radar de um objeto permite inferências mais consistentes, de processos físicos de espalhamento, que medidas de uma única polarização, através da identificação e caracterização do mecanismo de espalhamento dominante.

A assinatura da polarização da matriz de espalhamento é definida por Zebker et al. (1987) como a variação da potência recebida como uma função das polarizações das antenas. A assinatura da polarização resultante medida indica a polarização ótima para a observação de certas classes de objetos, e oferece subsídios para identificação dos mecanismos de espalhamento dominantes para cada tipo de objeto. O conhecimento do mecanismo de espalhamento é útil no sentido de fornecer uma descrição precisa do objeto de interesse. van Zyl et al. (1987) introduziu a assinatura da polarização como um método conveniente de apresentação de dados polarimétricos e discutem algumas implicações da comparação de modelos teóricos com os dados observados.

O conceito de assinatura da polarização de um espalhador foi usado por van Zyl et al. (1987) e Zebker et al. (1987) para representar, por meio gráfico, a potência de retorno da onda como uma função das polarizações transmitidas e recebidas, como mostrado na Fig. 13.

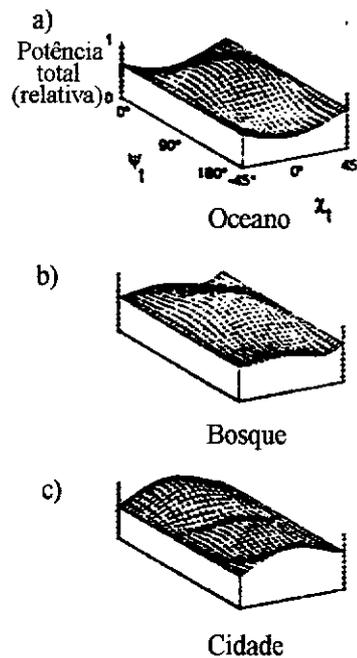


Fig. 13 - Assinatura da potência total de algumas áreas de treinamento, onde a amplitude da assinatura em cada χ , e ψ transmitidos é proporcional à potência total recebida quando a onda tem aquela polarização particular.

FONTE: Evans et al. (1988), p. 779.

Medidas da assinatura da polarização permitem testes mais completos dos modelos teóricos de espalhamento. O modelo deve prever corretamente o coeficiente de espalhamento, não somente como uma função do ângulo de incidência ou propriedades elétricas do espalhador, mas também como uma função da polarização transmitida e recebida pela antena (van Zyl et al., 1987).

7.2 - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Um parâmetro útil que pode ser derivado da assinatura da polarização é o coeficiente de variação, e representa uma medida de quanto as propriedades de espalhamento variam dentro de uma célula de resolução.

van Zyl et al. (1987) definiram esta medida de variação como coeficiente de variação v , onde:

$$v = \text{potência mínima recebida} / \text{potência máxima recebida} \quad (7-5)$$

O resultado final da assinatura da polarização é a soma das assinaturas da polarização de medidas individuais. Assim, se algum mecanismo de espalhamento está presente, então as assinaturas da polarização não são idênticas, e seus nulos (potência mínima recebida = 0) podem ocorrer em diferentes polarizações. Desta forma quando diferentes assinaturas de polarização são adicionadas, os nulos são substituídos pelos mínimos e a assinatura “achatada”. Isto resulta que a variação relativa da seção transversal de retroespalhamento torna-se menor com a variação da polarização.

Desta forma, quanto mais uma assinatura individual difere de cada outra, menor é a diferença esperada entre seus valores máximo e mínimo. Conseqüentemente, a razão do valor mínimo para o valor máximo de uma assinatura pode indicar quanto as assinaturas individuais, que constituem a assinatura final, diferem.

Quanto menor o coeficiente de variação maior é a variação na seção transversal de retroespalhamento, com a troca da polarização. Adicionalmente, o coeficiente de variação indica o grau pelo qual pode-se usar a polarização para realçar ou eliminar o retorno de uma coleção de espalhadores. Por exemplo, se o coeficiente de variação é zero indica que a assinatura da polarização possui um nulo para alguma polarização. Desta forma, usando-se esta polarização para transmissão e recepção significaria que se estaria anulando o retorno do espalhador em questão.

A partir de uma imagem, onde o brilho de um *pixel* é proporcional ao coeficiente de variação, Van Zyl et al. (1987) demonstraram que o oceano tem o menor

coeficiente de variação, visto que o espalhamento da superfície do oceano não varia significativamente para uma resolução de 40x40m, e componentes de espalhadores múltiplos não são significantes. Áreas com vegetação, por outro lado, tem maiores coeficientes de variação, provavelmente causado pela heterogeneidade entre os espalhadores dentro de uma célula de resolução e espalhadores múltiplos.

7.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE ESPALHAMENTO

A partir do desenvolvimento de técnicas de análise de dados de radar polarimétrico pode-se determinar a heterogeneidade de espalhadores dentro de sub-áreas, otimizar a potência de retorno destas sub-áreas, e identificar prováveis mecanismos de espalhamento para cada *pixel* em uma imagem de radar.

A partir do conhecimento dos parâmetros de Stokes, Evans et al. (1988) implementaram um algoritmo que classifica espalhadores em 3 tipos, baseados na relação entre o ângulo de orientação da polarização transmitida e os parâmetros correspondentes da onda recebida, para cada polarização transmitida (Figura 14).

No caso de uma superfície dielétrica ligeiramente rugosa (Fig. 14a), a onda incidente experimentaria poucos múltiplos espalhadores (reflexões de canto). Neste caso os sinais de HH e VV estariam em fase, e o ângulo de orientação da onda espalhada seria diretamente proporcional ao ângulo de orientação da onda transmitida. Assim o sentido da onda espalhada, seria oposto ao da polarização da onda transmitida. Desta forma, uma onda elipticamente polarizada para a esquerda retornaria como uma onda elipticamente polarizada para a direita.

O mecanismo de reflexão em um refletor de canto do tipo diedral (Fig. 14b), resulta em uma mudança de fase de 180° entre HH e VV. Neste caso o ângulo de orientação ψ , da onda espalhada, diminui quando o ângulo da onda transmitida aumenta. Assim o sentido da polarização da onda espalhada é o mesmo da polarização da onda transmitida, de modo que χ , para as ondas transmitidas e recebidas, possuem o mesmo sinal.

Em uma área que provoque espalhamento difuso (Fig. 14c), exibindo interações múltiplas, ocorre um comportamento diferente. Devido às interações múltiplas, a diferença de fase é altamente variável de HH para VV, exibindo sobre a área um ruído chamado *noise-like character*. A matriz de Stokes de elementos resultante implica que o ângulo de orientação da onda espalhada média segue o caminho da onda transmitida, um comportamento similar do observado para o caso de *single bounce*. Entretanto, o sentido da polarização da onda espalhada é o mesmo da polarização da onda transmitida, o qual é mais compatível com um mecanismo de *double bounce*. Evans et al. (1988) têm indicado este caso como espalhamento difuso. Entretanto salientam que não se pode determinar, unicamente, o mecanismo para espalhamento difuso em um dado *pixel*, sem o uso de informações adicionais da cena. Contudo, o caso difuso pode ser facilmente distinguido da geometria de 1 ou 2 *bounce*.

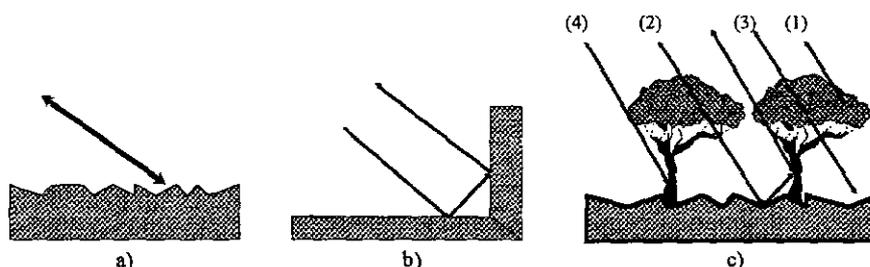


Fig 14 - Geometria para a) *single bounce*, b) *double bounce*, e c) reflexão difusa.

1) representa o retroespalhamento direto da cobertura, 2) representa sinais que foram espalhados duas vezes, 3) representa retroespalhamento direto do solo, e 4) representa retroespalhamento direta dos troncos das árvores.

FONTE: Adaptada de Evans et al. (1988), p. 780.

7.4 - APLICACÕES DE DADOS POLARIMÉTRICOS

Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar o potencial de uso das informações obtidas por radares imageadores, no sentido de identificar e diferenciar os diferentes tipos de coberturas vegetais da superfície (Wang et al., 1986, Zebker et al., 1987; Evans, et al. 1988; Ford e Casey, 1988; Novo et al. 1994). Outros estudos têm tentado modelar os mecanismos de espalhamento de diferentes

comprimentos de onda e polarizações para formas específicas de cobertura vegetal (Ulaby et al., 1987; Karam e Fung, 1989; Durben et al. 1989).

Wang et al. (1986) mostraram que um SAR em órbita, bem calibrado, e com resolução espacial fina, tem potencial de mapeamento da umidade do solo. E sugerem o uso de dados de multifrequências e multipolarizações para desvendar os efeitos da umidade do solo, rugosidade da superfície e cobertura da vegetação.

Estudos da síntese de ondas têm mostrado que a intensidade do retroespalhamento de microondas é funcionalmente dependente da polarização. Observação desta dependência para alvos naturais, incluindo áreas de florestas, tem permitido a identificação de mecanismos de espalhamento dominantes (Zebker et al. 1987).

Recentes experimentos com radar imageador polarimétrico têm usado a amplitude e a informação de fase para distinguir diferentes mecanismos de espalhamento, e têm sugerido diferenças que podem ser esperadas a partir da superfície da vegetação para longos e curtos comprimentos de onda (Zebker et al. 1987; van Zyl et al. 1987). Assim parece que há uma grande probabilidade de discriminação de estruturas do dossel usando dados adquiridos por radares polarimétricos.

Ulaby et al. (1987) trabalharam nas propriedades de atenuação na transmissão do sinal em dosséis de milho, com o objetivo de fornecer um modelo para propagação de ondas em vegetação herbácea com hastes verticais e folhas orientadas ao acaso. Os dados de atenuação apresentados pela banda-L aparecem quase contínuos (desvio padrão de VV \cong HH), com relativamente pouca descontinuidade. Para a banda-C a situação é o inverso, havendo variação no desvio padrão para polarização VV e HH. O maior desvio padrão de VV é devido aos profundos enfraquecimentos do sinal, os quais são atribuídos à atenuação pelas hastes. Comparando os dados VV e HH para a cobertura total e a cobertura somente com as hastes (sem as folhas), Ulaby et al. (1987) observaram que as hastes têm uma menor contribuição para a atenuação total. Outra observação é que na presença das folhas o espalhamento difuso aumenta.

O espalhamento difuso, e espalhamentos do tipo *single bounce* e *double-bounce* são os mecanismos de espalhamento básicos que têm permitido discriminar amplas categorias de coberturas de vegetação costeira. Entretanto, estes mecanismos não discriminam as diferenças na estrutura do dossel - altura das árvores, densidade, biomassa, etc. - na banda-L com polarização HH. Mecanismos, estes, que são necessários para diferenciar o dossel em seu interior. Esta diferenciação entretanto, pode ser viável com polarizações múltiplas e menores comprimentos de onda de radar (Ford e Casey, 1988).

Pesquisando o efeito da forma da folha no espalhamento de ondas eletromagnéticas Karam e Fung (1989) usaram discos elípticos para modelar folhas decíduas e “agulhas” para modelar folhas de coníferas. As diferenças entre as características de espalhamento das diferentes formas de folhas são ilustradas numericamente para diferentes orientações das folhas, frequências, e ângulos de incidência. Os autores concluíram que é necessário considerar ambos os coeficientes de espalhamento, das polarizações paralelas e cruzadas, para identificar as diferenças no espalhamento devido à forma e distribuição das folhas.

Durben et al. (1989) descreveram um modelo teórico de espalhamento para áreas de florestas e comparou com assinaturas da polarização calculadas e observadas, encontrando boa relação entre as assinaturas calculadas e observadas.

Novo, et al. (1994) estudando o uso de polarização individual na banda-C de macrófitas aquáticas, no reservatório de Tucuruí, conseguiram a discriminação de 3 gêneros de macrófitas. A polarização HH foi a que apresentou a maior diferenciação entre as espécies, já a banda VV apresentou marcada discriminação entre a *Salvinia* e os outros alvos, mas não conseguiu diferenciar *Eicchornia* e *Scirpus*. Para polarizações cruzadas os gêneros são pouco diferenciáveis.

7.4.1 - Índices Biofísicos

A partir da análise de dados polarimétricos, Pope et al (1994) desenvolveram uma série de índices, com o objetivo de melhorar o esforço de interpretar a fisionomia da vegetação e as propriedades hidrológicas a partir de dados AIRSAR (*Jet Propulsion Laboratory's airborne polSAR*), um dos poucos polSARs atualmente em operação.

Para o desenvolvimento dos índices biofísicos os dados de imagens AIRSAR, (matrizes contendo informações de espalhamento de todas as combinações de polarizações, emitidas e recebidas, possíveis) foram convertidos em cinco arquivos de varredura. Quatro destas varreduras (HH, VV, CS, e LK) são proporcionais ao coeficiente de retroespalhamento. Estão expressas em escala linear, e não na escala mais comum $\log(\text{dB})$, para permitir o uso de algoritmos padrões de processamento de imagens.

O quinto arquivo contém informações de ângulo-fase na matriz de Stokes, que foi convertida em novo parâmetro de diferença de fase (PD). PD é um parâmetro circular que varia de -180° , para um número uniforme de interações; até 0° , para um número ímpar de interações; e até $+180^\circ$, para casos de interações uniformes novamente. A intensidade do retorno é grandemente reduzida por interações múltiplas. Pope et al. (1994) assumiram que valores de PD próximos de 0° são derivados, na maior parte, de interações do tipo *single bounce*, e valores de PD perto de $\pm 180^\circ$ são derivados de interações do tipo *double bounce*.

Os parâmetros de espalhamento derivados da matriz de Stokes dos elementos são:

1- HH

2- VV

3- $CS = (HV+VH) / 2$

4- $LK = (VV+HH) / 2$

5- PD (VV, HH diferença dos ângulos de fase)

Pope et al. (1994) destacaram que estes índices não são baseados na combinação de frequências (ex.: banda PxC), que são afetados pela imprecisão da calibração entre bandas, especialmente daqueles resultantes da correção incompleta do padrão de antena. Destacaram, também, que estes índices possuem algumas vantagens sobre parâmetros individuais, como segue:

1) - os índices que são baseados em razões ou diferenças normalizadas, são largamente independentes do efeito de *range* ou declividade do terreno e portanto, são na maioria das vezes, uma função da vegetação ou condição da superfície. Penetração na vegetação e interações com a superfície são influenciadas pelo ângulo de incidência, entretanto, estas influências afetam os sinais HH, VV e CS de forma similar e, freqüentemente, cancelam-se quando os índices são aplicados;

2) - os índices são designados para tirar vantagem do conhecimento geral dos mecanismos de espalhamento, derivados de modelos de radar. Escolhido corretamente, tal índice é uma função de um tipo específico de interação microonda-vegetação;

3) - os índices são expressos em uma escala linear, e não na forma mais comum (dB), para permitir o uso direto de algoritmos padrões de processamento de imagem.

A seguir são descritas as características dos índices biofísicos desenvolvidos por Pope et al.(1994).

-CSI - índice da estrutura da cobertura	= $VV / (VV+HH)$;
-VSI - índice do volume de espalhamento	= $CS / (CS+LK)$;
-BMI - índice de biomassa	= LK;
-ITI - índice do tipo de interação	= PD .

CSI é uma medida da importância relativa da estrutura vertical *versus* a estrutura horizontal na vegetação. CSI não faz sentido para superfícies sem vegetação, como água ou solo exposto. Ecossistemas dominados por troncos ou caules quase verticais terão maiores valores de CSI do que aqueles dominados por ramos horizontais ou quase horizontais. Com isto, segundo os autores, pode-se comparar valores de CSI

de florestas pantanosas, as quais possuem poucas árvores de troncos verticais, com os de florestas altas, as quais são dominadas por troncos verticais. Assim, como o espalhamento do tipo *double bounce* favorece HH, ecossistemas com alta porcentagem de *double bounce* terão valores de CSI mais baixos que ecossistemas com estrutura similar mas com pouca interação do tipo *double bounce*.

VSI é uma medida da despolarização do sinal de radar incidente polarizado linearmente. Altos valores de VSI resultam quando o retroespalhamento da polarização cruzada (CS) é grande em relação à média do retroespalhamento da polarização paralela (LK). Isto indica uma maior interação da onda no volume do dossel, o que contribui para a despolarização da onda incidente. VSI é um indicador da espessura ou densidade da cobertura, pois quanto maior a densidade da cobertura menor a penetração no dossel e, conseqüentemente, menores valores de VSI. Isto é melhor demonstrado pelos autores pelo aumento do VSI do mangue em direção à floresta, dados estes na banda-P.

BMI, para as bandas L e P, é um indicador da quantidade relativa da estrutura lenhosa comparada com a biomassa de folhas. Como BMI não é uma razão, portanto, é influenciado pela declividade e também, se não corrigido, pelo efeito de *range*. BMI é maior para florestas senescentes (baixa biomassa de folhas “frescas”) que em florestas maduras, devido a absorção no volume das microondas pela maior parte das folhas verdes, proporcionando assim, um menor retorno do sinal. BMI reflete mais diretamente o total de biomassa acima do solo para tipos de vegetação herbácea.

ITI é uma medida da dominância do espalhamento do tipo *single bounce* versus *double bounce*. Como os PDs de -180° e $+180^\circ$ possuem o mesmo significado, o valor da magnitude (brilho), em um PD, pode ser ambíguo. Portanto o ITI é baseado em valores absolutos de PD. Altos valores de ITI são indicadores de freqüente espalhamento do tipo *double bounce* entre troncos e ramos, e uma superfície horizontal suave, como água. Deste modo, altos valores de ITI podem indicar vegetação inundada. ITI é, também, uma medida de fechamento da cobertura e da homogeneidade. Pois para coberturas homogêneas a maior parte do retroespalhamento vem do espalhamento do

tipo *single bounce* da superfície das folhas da cobertura. Nas coberturas mais abertas ou heterogêneas (troncos de árvores emergentes acima do dossel), há maior probabilidade de ocorrer interações do tipo *double bounce*, elevando os valores de ITI.

Pope et al. (1994) destacam que os 4 índices e as 3 bandas (P, L e C) são necessários para caracterizar completamente a paisagem. Entretanto os índices ITI e BMI, e as bandas C e P se sobressaem em importância.

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do conhecimento das características morfológicas das plantas aquáticas e do entendimento dos mecanismos de interação com as diferentes polarizações, o uso de dados de radar, e principalmente dados polarimétricos, pode ser uma ferramenta importante no estudo de plantas aquáticas.

O potencial de uso de dados de polarização individual para estudos de vegetação têm sido bem demonstrado para a banda-L e polarização HH, entretanto os estudos para a banda-C ainda tem sido pouco explorados.

O uso de polarização individual parece ter um grande potencial no estudo de extensas áreas de macrófitas aquáticas como mostrado por Novo et al. (1994). Este potencial é reforçado pelo fato de haver dois satélites SAR operando atualmente e com a previsão de lançamento de mais dois para 1995, o RADARSAT e o ERS2.

O estudo de vegetação com o uso de índices biofísicos fica limitado pelo fato de os satélites atualmente em operação, operarem com um único canal. Entretanto a partir de 1995, com o lançamento do RADARSAT, será possível se produzir os índices CSI e BMI, para a banda C, com a combinação dos dados do RADARSAT (polarização HH) e dos ERS1 e ERS2 (polarização VV) (Pope et al., 1994).

O uso dos índices biofísicos aumenta enormemente o potencial de estudo de coberturas de vegetação. Porém só são obtidos a partir de radares que fornecem os dados completos de todas as polarizações possíveis, os polSARs. Contudo não há, ainda, nenhum satélite deste tipo em operação. Somente as missões do SIR-C/X-SAR, que

começaram em abril de 1994, têm capacidade de testar estes índices em grande escala. O satélite EOS SAR, a partir do ano 2000, será o primeiro a fornecer este tipo de informação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, C.T.; Ulaby, F.T. Modelling the polarization dependence of the attenuation in vegetation canopies. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84). Strasbourg, 27-30, Aug. 1984. **Remote Sensing - From Research Towards Operational Use**. Noordwijk, ESA/ESTEC, 1984. v.1, p. 119-124. (ESA SP-215).
- Barrow, C.J. The environmental impacts of the Tucuruí dam on the middle and lower Tocantins river basin, Brazil. **Regulated Rivers**, (1) : 49-60, 1987.
- Basic concepts of imaging radar: intensive course. São José dos Campos, 17-20, Oct. 1994. São José dos Campos, INPE/CCRS/CIDA, 1994. 65p. Curso ministrado dentro do projeto PRORADAR Brasil-Canadá.
- Burrows, C.J. **Processes of vegetation change**. London, Unwin Hyman, 1990. 551 p.
- Curlander, J.C.; McDonough, R.N. **Synthetic aperture radar: systems and signal processing**. New York, John Wiley, 1991.
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Principes d'imagerie radar**. Rome, FAO/ESA, 1991. (RSC Series 67).
- Dallemand, J.F.; Lichtenegger, J.; Raney, R.K.; Schumann, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lectures notes**. Rome, FAO/ESA, 1993. (RSC Series 67).
- Durben, S.L.; van Zyl, J.J.; Zebker, H.A. Modelling and observation of the radar polarization signature of forested areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 27(3) : 290-301, May. 1989.

- Elachi, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. Pasadena, John Wiley, 1987.
- Evans, D.L.; Farr, T.G.; van Zyl, J.J.; Zebker, H.A. Radar polarimetry: analysis and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **26(6)** : 774-789, Nov. 1988.
- Ford, J.P.; Casey, D.J. Shuttle radar mapping with diverse incidence angles in the rainforest of Borneo. **International Journal of Remote Sensing**, **9(5)** : 927-943, 1988.
- Fung, A.K.; Ulaby, F.T. Matter-energy interaction in the microwave region. In: Simonett, D.S. ed. **Manual of remote sensing**. 2.ed. Falls Church, ASP, 1983. v.1, cap. 4, p. 115-164.
- Hoehne, F.C. **Plantas aquáticas**. São Paulo, Instituto de Botânica, 1948. 168 p. (Instituto de Botânica, D)
- Junk, W.J. **Macrófitas aquáticas nas várzeas da Amazônia e possibilidades do seu uso na agropecuária**. Manaus, 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 might tropical river and its basin**. Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. P. 269-293. (Monographiae Biologicae, 56).
- Karam, M.A.; Fung, A.K. Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **27(6)** : 687-697, Nov. 1989.

- 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**, 75(29) : 332-334, July, 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). Strasbourg, 27-30, Aug. 1984. **Remote Sensing - From Research Towards Operational Use**. Noorwijk, ESA/estec, 1984. v. 1, p. 155-160. (ESA SP-215).
- Morrisey, L.A.; Livingston, G.P. Use of SAR in regional methane exchange studies. **International Journal of Remote Sensing**, 15(6) : 1337-1342, 1994.
- NASA. **SAR-synthetic aperture radar**: instrument panel report. Washington, DC, NASA, s.d. 233 p. (Earth Observing System, 2f).
- Novo, E.M.; Costa, M.P.; Noernberg, M.A. Airborne SAR data to map Tucuruí reservoir (Amazon). South American Radar Experiment - SAREX-92, Paris, Dec. 6-8, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA WPP. 1994. (ESA WPP - 76).
- Ott, J.S.; Kasischke, E.S.; French, N.H.; Gross, M.F.; Klemas, V. Preliminary evaluation of a multi-channel SAR data set for a Mid-Atlantic coastal marsh. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'90). College Park, 20-24, May. 1990. **Digest**. Piscataway, IEEE, 1990. p.453-456. (IGRSE3).
- Paris, J.F.; Ustin, S.L. Quantitative estimation of standing biomass from L-band multipolarization data. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'90). College Park, 20-24, May. 1990. **Digest**. Piscataway, IEEE, 1990. p.147-150. (IGRSE3).
- Paris, J.F. **Índices biofísicos**. São José dos Campos, 1994. Comunicação pessoal.

- 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 Environmental**, **48(2)** : 205-219, May. 1994.
- 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. v. 1, cap. 25, p. 1125-1180.
- Trevett, J.W. **Imaging radar for resources surveys**. New York, Chapman and Hall, 1986. 313 p.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: fundamentals and radiometry**.. Lawrence, Addison-Wesley, 1981. v. 1.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Washington, DC, Addison-Wesley, 1982. v. 2.
- Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive**. Reading, Addison-Wesley, 1986. v. 3.
- 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**, **GE-25(6)** : 714-725, Nov. 1987.
- Ulaby, F.T.; Dobson, M.C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain**. Norwood, Artech House, 1989.
- van Zyl, J.J.; Zebker, H.A.; Elachi, C. Imaging radar polarization signatures: theory and observation. **Radio Science**, **22(4)** : 529-543, Aug. 1987.
- Zebker, H.A.; van Zyl, J.J.; Held, D.N. Imaging radar polarimetry from wave synthesis. **Journal of Geophysical Research**, **92(B1)** : 683-701, Jan. 1987.

Wang, J.R.; Engman, E.T.; Shiue, J.C.; Rusek, M.; Steinmeier, C. The SIR-B observations of microwave backscatter dependence on soil moisture, surface roughness, and vegetation covers. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-24(4) : 510-516, July. 1986.

Wetzel, R.G.; Grace, J.B. Aquatic plant communities. In: Lemon, E.R. **CO₂ and plants: the response of plants to rising levels of atmospheric Carbon Dioxide**. Boulde, Westview, 1983. Cap. 8, p. 223-264.