

SENSORIAMENTO REMOTO QUANTITATIVO DA VEGETAÇÃO: POSSIBILIDADES E LIMITAÇÕES

Iêdo Bezerra Sá
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-árido
Caixa Postal 23, 56300 - Petrolina, PE, Brasil

RESUMO

A quantificação da vegetação através de técnicas de sensoriamento remoto implica na utilização de vários procedimentos que inferem o conhecimento do comportamento espectral da vegetação, dos produtos de sensoriamento remoto e de métodos na definição de objetivos gerais e específicos. Para tanto, o emprego de diferentes sistemas sensores devem ser utilizados isoladamente ou conjugados, visando a melhor metodologia de aplicação. Com o objetivo de fornecer informações sobre a quantificação da vegetação, este trabalho apresenta uma revisão dos principais sistemas sensores em uso, ou seja: sistema Landsat, fotografias aéreas, radares imageadores e algumas caracterizados do Projeto SIR. Também discute-se alguns cursos metodológicos de utilidade no contexto de inventário florestal, como a utilização dos índices de vegetação e a aplicação da abordagem em multiestágios (orbital, aéreo e campo) multisensores, enfatizando-se os produtos Landsat e fotografias aéreas, consubstanciados com a verdade terrestre.

ABSTRACT

To quantify vegetation through remote sensing techniques imply the utilization of some data processing methods based on the understanding of the spectral characteristics of the vegetation cover that is under study, as well as of the utilized remote sensing system. This last one may be a single system or the conjugation of systems that can be of different nature. With the objective of presenting informations about vegetation quantification this is a review of the remote sensing systems and techniques that are most commonly used to this purpose: Landsat, aerial photography, imaging radar, including the orbital ones of the SIR Project. Some methodological means relevant to forestry environment are also discussed such as the utilization of vegetation indices and the utilization of Multistage Sampling Strategy coupled with the utilization of a multi-sensor strategy (satellite, airborne and field measurements).

INTRODUÇÃO

Técnicas de aquisição e interpretação de dados de sensoriamento remoto ao nível de terreno ou aéreo tem sido empregadas há muito tempo, no processo de avaliação da cobertura vegetal. Porém, mais recentemente a utilização de dados obtidos ao nível orbital dinamizou satisfatoriamente este processo.

Os dados obtidos a partir de plataformas orbitais permitem, através das características multispectrais e de visão sinóptica, a realização deste tipo de estudo, incluindo o dimensionamento das áreas ocupadas por diferentes unidades de vegetação.

A crescente demanda dos escassos recursos florestais para as diversas finalidades, tais como: a produção de celulose, laminados, carvão vegetal e demais derivados, assim como no aspecto conservacionista de proteção natural dos solos, da fauna e dos recursos hídricos, imprimiu uma premente necessidade de florestamento e/ou reflorestamento.

Como as atividades no campo florestal se

caracterizam por um processo dinâmico, tornou-se necessária a criação de sistemas de monitoramento que forneçam informações rápidas, confiáveis e a um custo relativamente baixo. Um exemplo de tais sistemas sensores é o sistema LANDSAT. As imagens obtidas por este sistema sensor permitem uma visão sinóptica da área imageada. O Landsat foi desenvolvido para permitir a aquisição de dados, com base nas características espectrais e temporais de alvos sobre a superfície da terra. Além disso, a repetitividade do imageamento permite verificar o comportamento da vegetação com relação às mudanças zonais, e também as possíveis alterações provocadas pela ação antrópica.

Assim, o presente trabalho visa contribuir com informações sobre a quantificação da vegetação, enfatizando os procedimentos metodológicos segundo vários autores, e ressaltando o potencial de alguns sistemas sensores, assim como as limitações inerentes às peculiaridades regionais.

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

A radiação solar refletida tem sido a forma de energia mais estudada em sensoriamento remoto de vegetação, embora a região do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho termal e às microondas também sejam utilizadas. As interações da energia ocorrem em função da estrutura fundamental dos alvos, do comprimento de onda da radiação e do seu ângulo de incidência.

De uma maneira geral, a interação da energia com a matéria ocorre diferencialmente em cada faixa do espectro eletromagnético. A figura 1, mostra uma curva padrão de resposta espectral de uma folha vegetal, onde se observa um pico de absorção na região do azul e outro na região do vermelho, ambos devidos à presença de pigmentos no interior do cloroplasto, tais como: clorofila, xantofilas, carotenos e outros. A absorção da energia solar que ocorre nestas faixas depende principalmente da concentração da clorofila Hoffer, (1972).

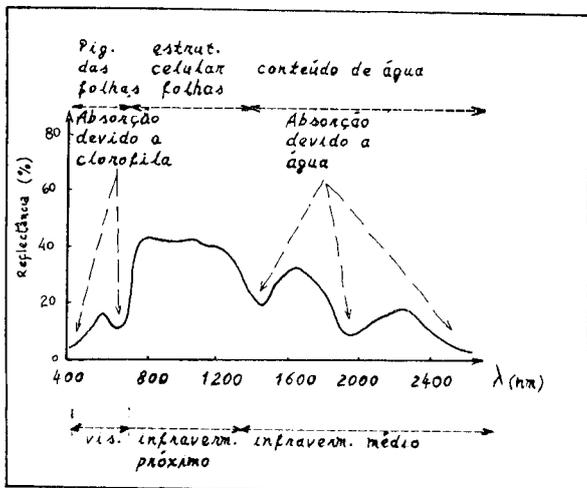


Fig. 1 - Comportamento espectral padrão de uma folha vegetal.

FONTE: Hoffer (1972).

Na região denominada infravermelho próximo (700 a 1300 nm), a vegetação verde e sadia se caracteriza pela alta reflectância (45 a 60%), causada pelo espalhamento resultante dos índices de refração do líquido intracelular e aos espaços intercelulares do mesófilo Gausman, (1974). Segundo o mesmo autor, ao se investigar as razões biofísicas da reflectância foliar, conclui-se que, ao incidir em uma camada de folhas, essa radiação é refletida em cerca de 50% e o restante é transmitida. Se essa porção transmitida encontrar outra camada de folhas, o processo se repetirá e assim sucessivamente.

Knipling et al. (1970), afirmam que, na região do infravermelho próximo, ocorrem variações na quantidade de energia refletida pela planta, quando esta, está sujeita ao ataque de pragas e doenças, ao estresse por falta de água ou à senescência. As causas predominantes destas variações são: diminuição do índice de

área foliar, alteração da estrutura interna e morfologia das folhas.

A absorção da radiação eletromagnética pela água é também um fator condicionante na reflectância das folhas na região do infravermelho próximo, sendo em 970nm e em 1200nm os pontos onde ocorrem pequenas bandas de absorção Gates (1970).

Swain e Davis (1978), salientam que, quando se comparam a reflectância de uma folha com a de uma camada de folhas, esta última pode aumentar até 85% em relação à reflectância de uma única folha, para a região do infravermelho próximo, por causa da reflectância aditiva. Isto é, a radiação eletromagnética transmitida através da primeira folha, na parte superior da camada de folhas, para a segunda, é parcialmente refletida por esta de volta para a primeira folha, e assim sucessivamente, até a última folha da camada.

Myers (1970), observou que a reflectância aditiva sofre atenuações em função do número de camadas e da espécie vegetal estudada, conforme ilustra a figura 2.

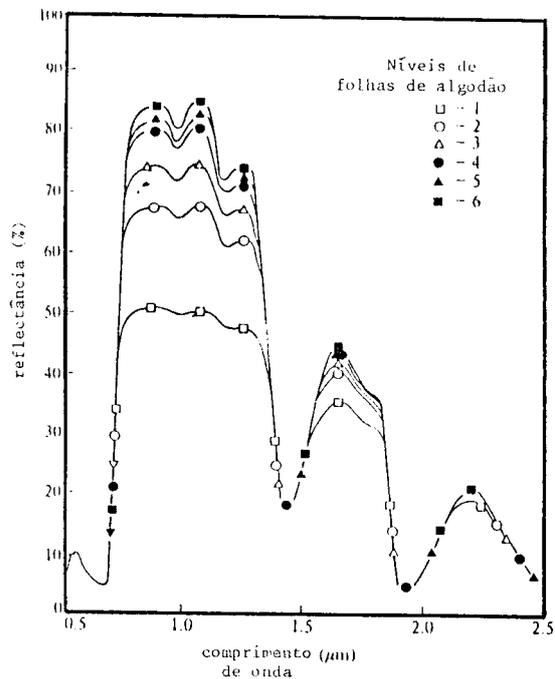


Fig. 2 - Curvas de reflectância aditiva em função do número de camadas de folhas (sobre algodão).

FONTE: Myers (1970).

Na faixa do infravermelho médio (1300 a 2600nm), Gausman et al. (1970) e Gates (1970), relatam que, a resposta espectral da vegetação sofre grandes modificações em função da presença de água nas folhas, provocando grandes bandas de absorção. Os pontos de maior absorção encontram-se em 1400 e 1900nm.

DADOS ORBITAIS DO SISTEMA LANDSAT

O programa Landsat foi desenvolvido com a

finalidade de se obter uma ferramenta útil no controle e exploração racional dos recursos da Terra. A aquisição repetitiva e de alta resolução de dados multiespectrais permite um constante fluxo de informações sobre os alvos, captados pelos sensores colocados a bordo de um satélite que opera numa órbita circular, quase polar, síncrona com o sol, a uma altitude de aproximadamente 705 Km. Estas informações são recebidas por uma estação rastreadora e, posteriormente, são enviadas a uma estação processadora que as transformará em dados compatíveis com computador (fitas CCTs) e/ou em produtos fotográficos. Em ambas as formas cada ponto na cena registra a radiancia proveniente de um elemento de resolução ou "pixel".

Os três primeiros satélites da série Landsat, lançados em 1972, 1975 e 1978, conduziram basicamente dois tipos de sensores: um imageador multiespectral de varredura (MSS) de 4 canais (5 no Landsat 3) e um sistema de televisão (RBV) de 3 canais (1 no Landsat 3), conforme a tabela 1.

TABELA 1

FAIXAS ESPECTRAIS DO MSS E RBV DO LANDSAT

| CANAL | MSS (nm) |
|-------|--------------------------------|
| 4 | 500 a 600 (verde-laranja) |
| 5 | 600 a 700 (laranja-vermelho) |
| 6 | 700 a 800 (verm. infrav. prô) |
| 7 | 800 a 1100 (infrav. próximo) |
| 8 | 10400 a 12600 (infrav. termal) |
| -- | RBV (nm) |
| 1 | 475 a 575 |
| 2 | 580 a 680 (L1 e L2) |
| 3 | 698 a 830 |
| 1 | 505 a 750 (L3) |

Os satélites Landsat 4 e 5 foram lançados em 1982 e 1984 respectivamente, conduzindo basicamente um imageador multiespectral (MSS) e um mapeador temático (TM). O MSS apresenta as mesmas faixas espectrais que as dos satélites anteriores. As bandas espectrais do TM estão apresentadas na Tabela 2.

O sensor TM opera em sete bandas espectrais caracterizadas a seguir:

Banda 1 - Penetração de corpos d'água, cartografia de águas costeiras, diferenciação entre solo e vegetação e diferenciação entre coníferas e folhosas.

Banda 2 - Determinação do vigor de vegetação através da medição da reflectância máxima do verde.

Banda 3 - Banda de absorção da clorofila, importante no estudo da cobertura vegetal.

Banda 4 - Utilizada para determinar o conteúdo de fitomassa e para delinear corpos d'água.

Banda 5 - Infere sobre o conteúdo de água da vegetação e sobre a umidade do solo.

Banda 6 - Mapeamento termal e avaliação de tensões na vegetação.

Banda 7 - Diferenciação de tipos de rochas e cartografia hidrométrica.

TABELA 2

BANDAS ESPECTRAIS DO TM DO LANDSAT 5

| CANAL | TM |
|-------|------------------|
| 1 | 450 a 520 nm |
| 2 | 520 a 600 nm |
| 3 | 630 a 690 nm |
| 4 | 760 a 900 nm |
| 5 | 1550 a 1750 nm |
| 6 | 10400 a 12500 nm |
| 7 | 2080 a 2350 nm |

Um pixel do sensor TM/Landsat, tem uma resolução espacial de 30 x 30 metros nas bandas TM 1-5 e TM7, possuindo uma resolução de 120 x 120 metros na banda TM 6 localizada na região do infravermelho termal.

A melhora nas resoluções espacial e espectral dos dados TM em relação aos dados MSS permitiu maiores ampliações quando analisados automaticamente e possibilitou trabalhar digitalmente em escalas maiores Foresti e Pereira, (1987).

OUTROS SISTEMAS SENSORES

Fotografias Aéreas

Apesar do grande avanço ocorrido no desenvolvimento de sensores eletrônicos "Scanner", radar, televisão etc., cujas imagens, obtidas em ampla faixa do espectro, podem ser visualizadas em tempo real, digitalizadas e processadas automaticamente, os sistemas fotográficos continuam a ser uma ferramenta de indiscutível valor para a aquisição de dados em sensoriamento remoto.

Operados a partir de aeronaves e espaçonaves, os sistemas fotográficos tem permitido a obtenção de imagens da superfície da terra, com resolução espacial raramente igualada por outros tipos de sensores. Considerando o fato de que fotografias são sensíveis à radiação da região do visível do espectro e de suas proximidades, o seu conteúdo é de mais fácil interpretação, pois apresenta uma aparência mais natural com relação à forma, tamanho, cor etc., dos objetos fotografados.

A radiancia dita visível refere-se aos comprimentos de onda que podem ser detectados pelo olho humano e que situam-se na faixa de 380 a 720nm. Entretanto, porções invisíveis do ultra-violeta próximo e do infravermelho próximo

ximo podem ser captados por sistemas fotográficos apropriados e registradas em formas de imagem. Além disso, uma seleção conveniente de câmara, lente, filme e filtro pode ampliar grandemente o detalhamento espacial e espectral obtido por uma foto.

Em Engenharia florestal as fotografias aéreas têm sido amplamente usadas em mapeamento e inventário e as informações obtidas a partir dessas fotos podem ser checadas através de processos de amostragem de campo. As atividades antrópicas são prontamente identificáveis nas fotografias aéreas, de modo que estes produtos têm grande aplicação em estudos de uso da terra, análise de desenvolvimento urbano, e outros.

RADARES IMAGEADORES

Das regiões do espectro eletromagnético usadas em sensoriamento remoto: visível, infravermelho e microondas, a de microondas tem uma posição particular. Nesta região, a observação da terra é feita quase que independente das condições atmosféricas. A observação através de nuvens, névoa, alguma chuva e durante a noite é possível. Outro fato que justifica a sua importância é a capacidade de penetração mais profunda das microondas na vegetação, devido aos comprimentos de onda em que este sensor opera.

Dentro da classe de radares imageadores, o radar de visada lateral (SLAR) mostrou-se essencial para o sensoriamento remoto. Tem sido usado para o levantamento ao nível de reconhecimento de regiões inexploradas dos continentes e para o estudo dos fenômenos oceanicos.

Além das tradicionais utilizações meteorológicas e militares, os radares têm sido usados para o mapeamento da vegetação, estudo da interação mar-gelo, medidas oceanicas de velocidade e direção do vento, conteúdo de umidade de solo e avaliação do uso da terra.

Os sistemas de radar utilizados em sensoriamento remoto podem ser incluídos dentro de três categorias: radares imageadores, escatêrometros e radares altímetros.

Um radar escatêrometro é um sistema não imageador que quantifica o espalhamento do sinal de radar no terreno, como função de seu ângulo de incidência, comprimento da onda e polarização. A representação dos resultados é feita em perfis e curvas de coeficiente de espalhamento.

Os radares altímetros têm sido utilizados em conjunção com satélites, onde a exatidão das medidas é da ordem de 10 cm.

PROJETOS SIR

Na ordem de desenvolvimento de base científicas em radar, para a futura utilização no satélite EOS, teve início na época de 1978, o projeto SIR-A em 1981 e SIR-B em 1984. Nos próximos 10 anos, existem projetos avançados entre os quais o revôo do SIR-B e a experimentação do SIR-C em 1989 e SIR-D em 1992 com a co-

bertura do avançado imageador, multiespectral, multipolarizador que voará no EOS em 1994.

Principais características do SIR-B:

Altitude orbital: 352, 274, 225 Km;

Inclinação orbital: 57 graus;

Duração da missão: 8,3 dias;

Comprimento de onda: 23,5 cm (banda L);

Frequência: 1,28 GHz;

Polarização: HH;

Ganho da antena: 33,2 db;

Ângulo de visada: 15-60 graus;

Largura da faixa de recobrimento: 20-50 Km

e

Faixa de resolução: 14-40 m.

Da missão SIR-B, foram obtidos dados do norte da Flórida, durante um período de 3 dias. As imagens possuíam um ângulo de incidência de 28, 45 e 58 graus. Essa coleção de dados é única, sendo a primeira vez a obtenção de dados de radar orbital com ângulos de múltipla incidência.

O sensor SIR-C representa o maior avanço da capacidade científica e tecnológica da NASA em sofisticação de sensores de imageamento de radar para veículos espaciais.

Possui frequência dual (banda L e banda C) e máxima capacidade em polarização (HH; HV; VH; VV). Quatro canais receptores podem ser utilizados simultaneamente. Cada um por sua vez repete a polarização direta ou cruzada para o multiplexador. Desta maneira, as quatro polarizações e as duas frequências podem ser recebidas simultaneamente.

O sensor SIR-D, cujos componentes físicos serão reconfigurados para uso no EOS, pela altitude da plataforma (500 a 750 Km) uma grande antena será necessária. Está planejado para o SIR-D que o sistema da antena será estendido de 12 m para 18 m.

Além dos sistemas sensores brevemente descritos, pode-se destacar algumas outras missões tais como:

Missão MOS-1;

Missão ERS-1 e

Missão MOMS.

INVENTÁRIO FLORESTAL

Considerações básicas

A quantificação da vegetação tem se tornado uma atividade imprescindível no planejamento do setor florestal. Os recursos florestais de um país, região ou mesmo ao nível de empresas, devem ser suficientemente conhecidos para que se possa elaborar planos de manejo adequados, tendo em vista as necessidades da matéria prima, do aspecto conservacionista e mesmo na área de recreação. Para tanto, técnicas de sensoriamento remoto tem sido empregadas na obtenção de informações relativas a cobertura flo-

restal.

A floresta, numa definição simplista, é a associação predominante de árvores ocupando extensa área no solo. Em Silvicultura, floresta é conceituada como uma associação florestal de natureza semelhante e independente, constituindo objeto de tratamento e exploração. A floresta é o resultado da evolução da vegetação numa área, constituída por diferentes comunidades vegetais e por práticas artificiais providas da ação do homem, através das formas de plantio Hernandez Filho & Shimabukuro, (1978).

Para a caracterização dos tipos de cobertura vegetal em determinada área de estudo, faz-se a interpretação dos produtos de vários sensores colocados em aeronaves e/ou plataformas orbitais. Todas essas informações, de um modo geral, podem ser complementadas com dados em campo.

Uma vez caracterizados os diferentes tipos de vegetação e estudando o comportamento espectral em relação ao produto do sensor utilizado, efetua-se o reconhecimento e delimitamento das áreas com padrões homogêneos Santos et al., (1981).

As fotografias aéreas são amplamente utilizadas para a determinação de tipos de cobertura florestal, bem como para discriminação espacial de espécies naturais e artificiais.

Um grande número de trabalhos visando a quantificação da cobertura vegetal foi realizado com base em fotografias aéreas. Em fotografias de grande escala e que possibilitem visão estereoscópica, é possível reconhecer o tipo de copa de determinadas espécies. Algumas espécies tem copas típicas que podem ser facilmente descritas, mas outras, principalmente folhosas, são de difícil descrição quanto ao tipo de copa. Segundo Sayn-Witgenstein (1978), citado por Santos et al., (1981) as características morfológicas das árvores são aspectos importantes na caracterização de espécies. O tipo de arranjo dos galhos e características da folhagem, são fatores que influenciam a caracterização das espécies. Outro elemento responsável é a sombra, tendo em vista que com uma tonalidade mais escura a copa se apresenta mais densa, enquanto que tonalidade mais clara apresenta uma copa mais aberta. O mesmo autor cita que as variações sazonais estão entre os maiores elementos que influenciam a aparência das árvores nas fotografias aéreas, e que a diferença entre espécies decíduas e não decíduas, nas fotografias tomadas no início da primavera, para as regiões tropicais, possibilitam a observação das características dos troncos e da distribuição dos galhos. Outros fatores como a distribuição das espécies em diferentes latitudes, diferença de local, diferenças genéticas, de idade e de vigor das árvores, produzem influências no aparecimento das folhas e consequentemente, diferenças entre espécies.

Conforme Thorley (1975), um trabalho de correlação entre o diâmetro da copa das árvo

res com o diâmetro à altura do peito (DAP), na Indonésia, obteve a seguinte equação de correlação:

$$d = 3,5c + 12,3$$

onde: d = DAP (cm)

c = diâmetro da copa

Outro exemplo de estimativa de volume de madeira, em função do diâmetro da copa e do número de copas (utilizando a relação DAP e volume, correlacionada a medias de campo) é citado por Thorley (1975), que classificou a floresta em três classes de qualidade, a saber: pobre, moderada e boa. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

TABELA 3

ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA (m³/ha)

| VOL. DE QUA-MADEIRA LIDADE DA FLORESTA | Nº DE ÁRVORES / Ha. NA CLASSE DE DIAMETRO DE MAIOR FRE- QUÊNCIA. | | |
|---|--|-----|-----|
| | 20 | 40 | 60 |
| POBRE | 20 | 40 | 60 |
| MODERADA | 70 | 140 | 210 |
| BOA | 100 | 400 | 600 |

No Brasil, alguns trabalhos de inventário florestal realizado com uso de técnicas de sensoriamento remoto foram desenvolvidos, a título de exemplo; um estudo com o objetivo de estimar o potencial lenheiro e carvoeiro de uma área no nordeste do Estado de Minas Gerais foi conduzido. Para tanto, fez-se uso de fotografias aéreas pancromáticas, na escala de 1:40.000, cujo método de interpretação utilizado foi o da contagem estatística sistemática, que visou o levantamento das formações vegetais para a determinação do potencial carvoeiro.

Análise Multiestágio

No processo de avaliação do volume de madeira de áreas reflorestadas com base no inventário florestal em múltiplo estágio, conforme a metodologia proposta por Langley (1975), utilizam-se simultaneamente os dados contidos em imagens orbitais e fotografias aéreas, complementadas com informações de campo. Este método de inventário florestal foi delimitado para gerar informações dos recursos florestais, artificiais ou naturais, ao nível regional, visando principalmente levantar dados para um planejamento nacional de alocação de recursos e fornecer subsídios para orientar o estabelecimento de uma política florestal de um país ou região.

Este método de estimação de volume de madeira denominado Amostragem em Múltiplo Estágio foi utilizado por Hernandez Filho (1980) e

Shimabukuro et al. (1981).

Primeiro estágio

No primeiro estágio (nível orbital) procede-se a classificação das áreas reflorestadas, onde, posteriormente, é sobreposta uma grade que permitirá uma estimativa de área nas Unidades Primárias de Amostragem (UPA). Os valores para determinar a probabilidade de seleção, no trabalho desenvolvido por Hernandez Filho et al., no Mato Grosso do Sul, são mostrados na tabela 4.

TABELA 4

VALORES PARA DETERMINAR A PROBABILIDADE DE SELEÇÃO DE UPA

| Nº DA UPA (1) | ÁREA (Ha) (2) | SOMA ACUM. (3) | INTERVALO (4) | PROBAR. DE SELEÇ. (5) |
|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | 36 | 36 | 1-36 | 36/135 |
| 2 | 25 | 61 | 37-61 | 25/135 |
| 3 | 15 | 76 | 62-76 | 15/135 |
| 4 | 43 | 119 | 77-119 | 43/135 |
| 5 | 16 | 135 | 120-135 | 16/135 |

Na tabela, a coluna (1) contém a lista dos números em sequência das UPAs. A coluna (2) mostra os valores de áreas (ha) de reflorestamento em cada UPA. A coluna (3) contém a soma acumulada das áreas (ha) da coluna (2). A coluna (4) mostra os valores de intervalos de cada UPA determinados na coluna (3). Na coluna (5) verifica-se que as probabilidades de seleção, para qualquer UPA, são variáveis; visto que os seus valores são determinados pela razão entre a área contida em cada UPA, e a área total das UPAs. Como a percentagem de área e o volume de reflorestamento em cada UPA estão relacionados, verifica-se que, para uma alta percentagem de área reflorestada, existe uma percentagem alta de volume de madeira e, assim, uma alta probabilidade de seleção.

Os intervalos, coluna (4) são baseados nos valores de área das UPAs. Analisando a UPA 1, o intervalo de seleção é definido como de 1 a 36. Assim, a probabilidade de seleção para a UPA 1 é 36/135, sendo que o valor 135 representa a somatória acumulada na coluna (3).

Similarmente, o intervalo para a UPA 2 é 37-61, que representa a probabilidade de seleção de 25/135. O mesmo procedimento é usado para estabelecer os intervalos para as outras UPAs.

Os números aleatórios, distribuídos, são gerados para cair no intervalo (1, soma acumulada), onde soma acumulada (135 ha) na coluna (3) é o total em (ha) de áreas

reflorestadas.

Estes números aleatórios são usados para selecionar as UPAs que serão consideradas no segundo estágio. Com isto, é feita a demarcação dos números aleatórios no intervalo (1, soma acumulada). A UPA selecionada tem probabilidade de seleção proporcional à área (ha) de reflorestamento e, assim, a probabilidade de seleção é definida como:

$$P(s) = \frac{\text{área de refl. para a UPA}}{\text{total da área de refl. para a área de estudo}}$$

A área de reflorestamento de cada UPA determina a probabilidade de seleção e o intervalo para cada UPA. O número de UPAs a ser selecionando é definido pela seguinte fórmula:

$$m = \frac{t^2 \cdot (CV)^2}{(EE)^2}$$

onde:

m = número de UPAs selecionadas no primeiro estágio;

t = valor "t", para inventário florestal em extensas áreas usa-se o valor t = 1 (Wiant Jr., 1976);

CV = coeficiente de variação

EE = erro de amostragem esperado.

Segundo estágio

As UPAs selecionadas são demarcadas em bases cartográficas planialtimétricas e subdivididas em quadrados ou retângulos que correspondem às Unidades Secundárias de Amostragem (USA). Em fotografias aéreas infravermelhas coloridas, escala 1:20.000, as USAs são delimitadas e avaliadas em termos de área (ha). Os dados assim coletados e analisados para cada USA, dentro de cada UPA, são selecionados da mesma maneira que no primeiro estágio.

Terceiro estágio

Cada USA selecionada é subdividida em quadrados ou retângulos que correspondem às Unidades Terciárias de Amostragem (UTA). As fotografias aéreas infravermelhas coloridas, ampliadas para a escala de 1:10.000 ou 1:15.000, servem como base para a demarcação das UTAs. A seleção deste estágio é baseada no número ou na densidade de copas das áreas reflorestadas em cada UTA. Os dados assim coletados são analisados para cada UTA, dentro de cada USA, do mesmo modo que nos estágios anteriores. Cada UTA selecionada é demarcada no campo, onde se obtêm dados para determinação do volume de madeira.

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

As técnicas de sensoriamento remoto envolvem medidas da radiância espectral que resulta da interação entre a cobertura das plantas com a irradiância espectral do sol. Estas medidas podem ser feitas de qualquer altitude

acima da vegetação (1m, 10.000m, 1000Km) dependendo do sistema de sensoriamento remoto em questão: base-campo, aéreo e orbital, respectivamente Tucker, (1979).

Na estimativa de biomassa de vegetação, geralmente são usadas duas regiões de comprimento de onda: vermelho (600 - 700 nm), e do infravermelho próximo (750 - 1000 nm). Os espectroscópicos comprimentos de ondas usados, frequentemente variam muito pouco entre diferentes trabalhos, mas as mesmas regiões são sensíveis na quantificação da área de folhas verdes ou biomassa foliar presente Tucker, (1979).

Combinações lineares de dados espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, tem sido usados numa variedade de diferentes tipos vegetais. Os índices de vegetação (IVs) são modelos numéricos que visam indicar a densidade de vegetação através de razões e combinações, lineares ou não, das respostas espectrais do alvo nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo. Visando estimar melhor a fitomassa por este método, vários índices de vegetação foram propostos. Entretanto, um índice que vem sendo apontado como o que melhor estima e que é simultaneamente o mais simplificado é o proposto por Rouse et al. (1973), o TVI (Transformation Vegetation Index), conhecido por IVT (Índice de Vegetação Transformado, $TVI = \sqrt{\frac{[IVP-V]}{[IVP+V]} + 0,5}$ além de estimar a fitomassa com bastante precisão, tem sido mencionado como um índice que atenua os efeitos atmosféricos quando os dados de sensoriamento remoto são orbitais Foresti & Pereira, (1987).

Segundo Jackson et al. (1983), um índice de vegetação deve ser bastante sensível à vegetação e insensível às variações de fundo (solo e sombra), além de ser pouco influenciado pela atmosfera. Como não se dispõe de nenhum índice que atenda a todas estas requisitos, os autores sugerem que para o acompanhamento de uma cultura, ao longo de seu ciclo, sejam utilizados dois ou mais índices Rudorff, (1985).

O uso de combinações da reflectância do vermelho e do infravermelho próximo e medidas de radiância, comumente chamados índices de vegetação (IVs), são frequentemente usados pela comunidade de sensoriamento remoto, muitos destes índices tem se mostrado altamente correlacionado com as características de densidade da cobertura vegetal, conteúdo de água nas folhas e conteúdo de clorofila Tucker, (1980).

Um dos mais importantes destes fatores ambientais diz respeito a geometria de visada que descreve as condições de iluminação e de detecção dos alvos. As variáveis de importância são: o ângulo de elevação solar (α), o ângulo azimutal entre o plano de iluminação e o plano de detecção (ϕ) e o ângulo de visada do sensor (θ), conforme a figura 3. Wardley, (1984). Todos os alvos são visados sobre condições únicas de iluminação e detecção e tem se mostrado que a reflectância e medidas de radiância ao nível de campo, são altamente dependentes destas relações angulares entre o sol e o sensor. Similarmente, certos índices

de vegetação tem se mostrado variável em função da geometria de visada.

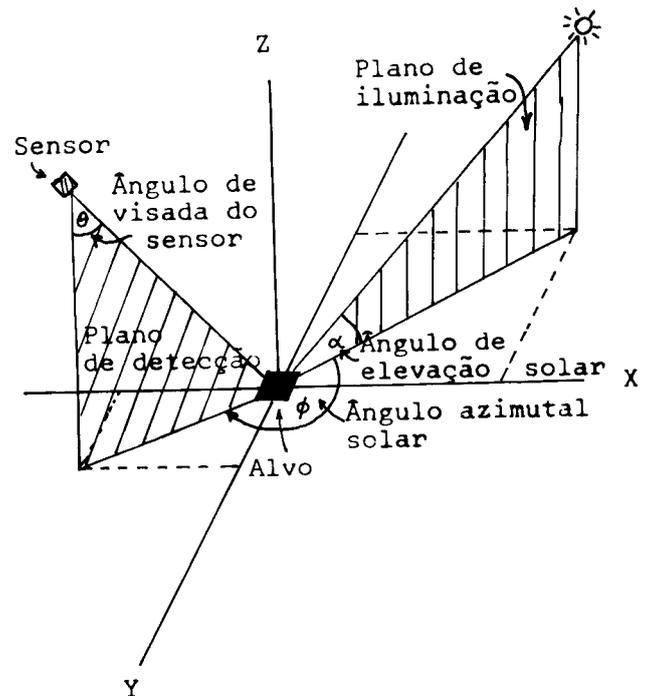


Fig. 3 - As relações entre os planos de detecção e de iluminação.

FONTE: Wardley, 1984.

Segundo Pereira (1986), os índices mais comumente encontrados na literatura são:

- a) Razão simples, proposta por Pearson e Miller (1972), é dada por:

$$R = IVP/V.$$

- b) Razão normalizada e transformada (TVI), proposta por Rouse et al. (1973), é dada por:

$$TVI = \sqrt{\frac{[IVP-V]}{[IVP+V]} + 0,5}.$$

- c) Índice de vegetação perpendicular (PVI), desenvolvido por Richardson e Wiegand (1977), é dado por:

$$PVI = \sqrt{(R_{gg5}-R_{p5})^2 + (R_{gg7}-R_{p7})^2}$$

onde:

Rp = reflectância do ponto de vegetação em estudo nas faixas do vermelho e infravermelho próximo;

Rgg = reflectância da projeção desse ponto ao nível do solo;

5 e 7 = respectivamente canais 5 e 7 do MSS.

Em todos os casos acima, onde houver infravermelho próximo, podem-se obter mais dois índices, bastando que se substitua o IVP por IVP6 ou IVP7, considerando, os canais 6 e 7 do MSS.

- d) Índice de vegetação verde (GVI), desenvolvido por Kauth and Thomas (1976), é dado por:

$$GVI = (\alpha\text{verde}) + (\beta\text{vermelho}) + (\gamma\text{IVP6}) + (\delta\text{IVP7}),$$

onde α , β , γ , e δ são coeficientes obtidos a través da transformação (componentes principais) de dados multitemporais obtidos por espectroradiometria de campo.

Segundo Jackson et al. (1983), a razão simples não será um bom indicador de densidade de quando a cobertura vegetal verde for inferior a 50%. Porém, sua sensibilidade vai aumentando a medida que a porcentagem de cobertura verde se aproxima de 100%. Ainda segundo Jackson (1983), a razão simples é tão sensível à densidade de vegetação quanto à interferência das condições atmosféricas, tornando-o pouco útil quando calculado com dados obtidos por satélite. Para esses autores, os índices de vegetação TVI, PVI e GVI sofrem, nesta ordem, cada vez menos interferência das condições atmosféricas.

Em trabalho realizado numa formação de campo cerrado, Pereira (1986), fez as seguintes conclusões a partir dos resultados alcançados:

1) Houve uma relação linear significativa entre a fitomassa foliar obtida de modo destrutivo no campo e a respectiva resposta espectral transformada em índices de vegetação (razão simples e TVIs)

2) Com relação aos índices de vegetação estudados, o teor de umidade da vegetação apresentou coeficientes de correlação linear mais altos do que a fitomassa fresca total.

3) As razões normalizadas (RN) e transformada (TVIs) mostraram-se melhores indicadores de teor de umidade da vegetação quando comparadas com as razões simples (Rs).

4) A correção para atenuar o espalhamento atmosférico aproximou numericamente os IVs obtidos com dados de satélite dos obtidos com dados de radiometria de campo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantificação de cobertura vegetal através de sensoriamento remoto implica na utilização de vários procedimentos que inferem o conhecimento de técnicas e abordagens, na definição de objetivos gerais e específicos. Para tanto, o emprego de diferentes sistemas sensores devem ser utilizados isoladamente ou conjuntamente visando a melhor metodologia de aplicação.

Técnicas de sensoriamento remoto vem sendo utilizadas no processo de conhecimento da realidade da cobertura vegetal em vários domínios espaciais. Ou seja, ao nível de nação, região ou mesmo ao nível de propriedades.

Com a crescente modernização dos sistemas sensores, a quantificação e qualificação da cobertura vegetal tem sofrido um grande avanço no que diz respeito ao nível de detalhamento e precisão, e com a utilização repetitiva dos dados coletados por satélites, foi possível observar e quantificar a vegetação através de indicadores de quantidade de vegetação ou índices de vegetação.

Para a obtenção desses índices de vegetação são utilizados comumente os dados do sistema Landsat, analisados digitalmente, com auxílio de algoritmos devidamente implementados.

Além das técnicas convencionais de inventário florestal assim como a utilização dos índices de vegetação, a metodologia proposta por Langley (1975), Amostragem em Múltiplo Estágio, tem se mostrado uma preciosa fonte de informações no planejamento de alocação de recursos no setor florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FORESTI, C.; PEREIRA, M.D.B. **Utilização de índices vegetativos obtidos com dados do sistema TM-LANDSAT no estudo da qualidade ambiental: Cidade de São Paulo.** São José dos Campos, INPE, 1987. (INPE-4177-PRE/1071).
- GATES, D.M. Physical and physiological properties of plants. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Remote Sensing with Special Reference to Agriculture and Forestry.** Washington, D.C., National Academic of Sciences, 1970.
- GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near infrared. **Photogrammetric Engineering**, 40 (2):18-192, Feb. 1974.
- HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E. **Estabelecimento de metodologia para avaliação de povoamentos florestais artificiais utilizando-se dados do Landsat.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos, INPE, 1978. (INPE-1271-TPT/089).
- HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E.; MEDEIROS, J.S.; SANTANA, C.C.; ALVES, E.C.M. **Relatório das atividades do projeto IBDF/INPE (sub-projeto reflorestamento) durante o ano de 1979.** São José dos Campos, INPE, Jan., 1980. (INPE-1664-RPE/104).
- HOFFER, R.M. Spectral characteristics of natural resource materials. In: PURDUE UNIVERSITY. LARS. **Remote Sensing Technology and Applications.** Lafayette, 1972. (Short course outline).
- JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JR.; P.J. Discrimination of grow and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, 13(3):187-208, July, 1983.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tassled cap: A graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 3. West Lafayette, IN, 1976. **Proceedings.** West Lafayette, IN, LARS Purdue, University LARS. IEEE, 1976.
- KNIPLING, E.B.; LAMBERCK, P.F.; CRIST, E.P. Physical and physiological basis for the reflectance on visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 1(3):155-159, 1970.

- LANGLEY, P.G. **Multistage variable probability sampling:** Theory and use in estimating timber resources from space and aircraft photography, PhD Dissertation, University of California, Berkeley, CA, 1975.
- PEREIRA, M.D.B. **Correlação de fitomassa foliar de campo cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS/Landsat e por radiometria de campo.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 1986. (INPE-3758-TDL/205).
- RICHARDSON, A.J.; WIEGAND, C.L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12):1541-1552, 1977.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3. Dec. 10-14, 1973. **Proceedings.** Washington, D.C., 1973, V. 1: Section A, p. 309-317.
- RUDORFF, B.F.T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar.** São José dos Campos, INPE, 1985. (INPE-3744-TDL/202).
- SANTOS, J.R.; HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em vegetação.** São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2215-MD/010)
- SHIMABUKURO, Y.E.; HERNANDEZ FILHO, P.; MEDEIROS, J.S.; ASSIS, O.R. **Relatório das atividades do projeto IBDF/INPE (sub-projeto reflorestamento) durante o ano de 1980.** São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2187-RTR/011).
- SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. **Remote sensing: the quantitative approach.** New York, NY, McGraw-Hill, 1978. 396 p.
- THORLEY, G.A. Forest land: inventory and assessment. In: AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Remote Sensing.** Falls Church, VA., 1975. V. 2. cap. 17.
- TURCKER, C.J. **A critical comparison of remote sensing and other methods for nondestructive estimation of standing crop biomass.** Greenbelt, MD, 1979. GSFC. 15p.
- _____. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. **Remote Sensing of Environment**, 10(1):23-32, Aug. 1980.
- WARDLEY, N.W. Vegetation index variability as a function of viewing geometry. **International Journal of Remote Sensing**, 5(5):861-870, 1984.
- WIANT JR.; H.V. **Elementary sampling.** West Virginia, VA., University Agriculture and Forestry Experimental Station, 1976.