

**Estimativa de Fitomassa Aérea
em Região de Floresta Tropical
com uso de Dados TM-LANDSAT 5 E HRV-SPOT 1**

NEWTON JORDÃO ZERBINI¹
JOÃO ROBERTO DOS SANTOS²

¹ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil
EEA - Departamento de Meio Ambiente
SCN - Quadra 06 Conjunto A Bloco C Sala 301
70.718-900 - Brasília - DF - Brasil

²INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Avenida dos Astronautas, 1758 - C.P. 515
12.201-970 - São José dos Campos - SP - Brasil

Abstract - The Amazon forest has been the subject of much debate due to the extent of human intervention occurring there. The Brazilian Amazon, with 3.5 million km², requires efficient systems of data collection for rational management of its forest resources. The present work develops a quantitative method for determining the biomass of tropical forest using satellite imagery from TM-LANDSAT 5 and HRV-SPOT in an area to be inundated for hydroelectricity. The study determined the correlation of biomass above-ground and tree measurements with spectral response and elevation in four samples: Dense Forest on Dry Land - Undulated Relief (samples 1 and 4), Dense Forest on Dry Land - Flat Relief (sample 2), and Floodplain Forest (sample 3). The forest samples were divided into three vertical levels for analysis. In comparison with the other forest levels, the spectral variables combined with the biomass variables did not permit the quantification of the biomass in the highest level of the forest. Regression analysis identified the equations for quantifying biomass. The proposed method is practical and gave significant results using either image index or image fraction for both TM-LANDSAT or HRV-SPOT data. Of the twelve models tested, a linear model was which gave a significant relationship for the biomass in the intermediate and low levels with spectral and elevation variables. It is recommended that future studies determine the most efficient model to quantify the biomass in the three levels of the forest.

Introdução

Este trabalho surgiu da conveniência de subsidiar os estudos de impacto ambiental na construção de usinas hidrelétricas em regiões de domínio de floresta tropical mediante a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto. Tais técnicas demonstram ser adequadas considerando-se a amplitude das áreas de floresta tropical do mundo (29,5 milhões de km²).

Foi desenvolvida uma metodologia para estimar a fitomassa aérea em área de floresta tropical, no caso área de inundação da Usina Hidrelétrica Porteira (UHE Porteira), através da Análise de Mistura Espectral e modelos numéricos (Índices de Vegetação) obtidos de imagens TM-LANDSAT e HRV-SPOT, correlacionados com dados de campo. Adicionalmente pretendeu-se

apresentar mapeamento da fitomassa aérea, utilizando sistema de informações geográficas.

Desta forma, foi possível determinar a quantidade de matéria orgânica vegetal acima do solo - fitomassa, visando ao estudo dos aspectos funcionais da floresta, quais sejam a produtividade primária, o ciclo de nutrientes e o fluxo de energia. Torna-se também possível, com o uso dessa técnica, a interferência humana na floresta.

Revisão de Literatura

O sensoriamento remoto pode ser utilizado como técnica não-destrutiva de avaliação de fitomassa aplicável a todas as formações florestais. Envolve medidas de radiação espectral refletida feitas a partir de

sensores situados no solo ou em plataformas orbitais. A unidade básica para compreensão desse processo de interação radiação eletromagnética x cobertura é a folha, cujas propriedades de reflectância, absortância e transmitância fornecem o entendimento extensivo à toda cobertura florestal [Knipling, (1970)].

Com base nesses elementos, encontram-se na literatura modelos para a estimação de fitomassa denominados Índices de Vegetação (IVs). Jordan (1969) fez o primeiro relato do uso do método de razão (R) do infravermelho próximo e vermelho para obtenção de valores de fitomassa em floresta tropical úmida.

Considerando as restrições apresentadas por Sader et al. (1989) ao uso de Índices de Vegetação para estimação da fitomassa de floresta tropical, são promissoras as possibilidades de utilização de outros métodos, entre eles a Análise de Mistura Espectral. Aplicada por Shimabukuro (1987) e Adams et al. (1990), a técnica Análise de Mistura Espectral mostrou-se mais eficiente, quando comparada com os resultados obtidos pelo Índice Diferença Normalizada (NDVI), para a classificação de áreas florestais.

Metodologia

Área Teste

A área total a ser inundada para a formação do reservatório da UHE Porteira é estimada em 91.500 ha. A área deste trabalho consiste em um retângulo de aproximadamente 20.000 ha, próxima ao local de barramento - cachoeira Viramundo, no rio Trombetas, no Município de Oriximiná, Estado do Pará - Brasil, limitada pelas coordenadas geográficas 0° 30' e 1° 03' S e 56° 49' e 57° 37' W.

As tipologias florestais que apresentam maior grau de participação na área de inundação são a Floresta Densa de Terra Firme (92,5%) e a Floresta de Baixio (4,4%). Foram essas as tipologias relevantes para o estudo.

Dados de Campo

A seleção e distribuição das unidades amostrais no campo, primeira atividade da seqüência metodológica adotada, abrangeu as variações fisiográficas apresentadas na área de estudo, levando-se em consideração inventários realizados na área e conhecimentos *in situ*. Foram amostradas quatro parcelas sendo duas de Floresta Densa de Terra Firme -

Relevo Ondulado (parcela 1 e 4), uma de Floresta Densa de Terra Firme - Relevo Plano (parcela 2) e uma de Floresta de Baixio (parcela 3).

As instalações das parcelas no campo, desenvolvidas de novembro de 1987 a maio de 1988, obedeceram a seguinte seqüência metodológica: localização, checagem e instalação. Na tipologia Floresta Densa as parcelas tiveram tamanho de 20m x 500m e na tipologia Floresta de Baixio 20m x 100m. A instalação das parcelas consistiu na abertura de picada e consecutivo picateamento de 20m em 20m para locação alternada das subparcelas, uma com 10m de largura do lado direito da picada, a seguinte do lado esquerdo e assim sucessivamente.

Em cada tipologia estudada realizou-se uma avaliação da contribuição dos componentes estruturais (litter, fustes, galhos e folhas), em três diferentes estratos da floresta: inferior (litter), intermediário (arvoretas e palmeiras) e superior (árvores com Diâmetro à Altura do Peito - DAP acima de 7cm).

As operações de campo consistiram, portanto, na pesagem e posterior coleta de amostras individualizadas de material lenhoso e folhoso que foram enviadas ao laboratório para secagem e pesagem. Nesta etapa foram obtidos valores por subparcela correspondentes às variáveis dendrométricas, de fitomassa e de cota.

Dados Orbitais

Os dados orbitais utilizados foram provenientes das bandas refletidas do sensor TM-LANDSAT (3 - 0,63 a 0,69 μ m, 4 - 0,76 a 0,90 μ m e 5 - 1,55 a 1,75 μ m), de 15/08/87 e das bandas multiespectrais refletidas do sensor HRV-SPOT (1 - 0,50 a 0,59 μ m, 2 - 0,61 a 0,68 μ m e 3 - 0,79 a 0,89 μ m), de 26/08/88.

Através da aplicação nessas imagens originais de funções disponíveis no Sistema Interativo de Tratamento de Imagens (SITIM), como registro e imagens fração, viabilizou-se a obtenção dos dados necessários para a quantificação da fitomassa aérea a partir de dados orbitais.

Tratamento das Imagens

Visando uma melhor análise das variáveis espectrais, procedeu-se à separação dos temas nas imagens frações de componentes espectrais (sombra, solo, água, vegetação verde e regeneração), que foram

obtidas mediante a conversão de imagens originais TM e HRV através da técnica Análise de Mistura Espectral.

No local correspondente a cada subparcela nas imagens, foram obtidos os valores digitais de IV e de Proporção de Vegetação (PV). Os parâmetros espectrais foram: TM R4,3; TM NDVI4,3; TM PV3,4,5,R,NDVI; HRV R3,2; HRV NDVI3,2; e HRV PV1,2,3,R,NDV.

Geração e Análise de Planos de Informação

No Sistema Geográfico de Informações (SGI), criou-se um Projeto e alguns Planos de Informação (PIs). Inicialmente foram digitalizadas cartas de vegetação, de topografia, de rede hidrográfica, de rede viária, de parcelas e outras que pudessem interessar. Foram importadas do SITIM as imagens originais e imagens frações.

Os PIs de imagens fração foram cruzados com os PIs de topografia e de vegetação, levando em consideração os valores de fitomassa aérea de cada estrato.

Tratamento Estatístico

Buscou-se determinar a relação existente entre diversas variáveis de fitomassa, dendrométricas, espectrais e de cota, demonstrando a existência e o tipo de correlação. O grau de correlação entre duas variáveis foi determinado pelo coeficiente de correlação R, que é um número adimensional, variando de -1 a +1.

Nas parcelas 1, 2, 3 e 4 elaborou-se, por subparcela, uma matriz de correlação dos parâmetros utilizados para determinar a fitomassa aérea, utilizando-se o pacote estatístico SAEG. Para verificar sua validade, o R obtido foi confrontado com os valores de R tabelado, com limite de significância de 5% de probabilidade [Snedecor e Cochran, (1967)].

Running et al. (1986) relataram a existência de correlação entre valores de Razão Simples e Índice de área foliar e, posteriormente, Sader et al. (1989) comentaram haver uma alta relação linear entre os valores de fitomassa foliar e fitomassa lenhosa, comprovando que dados espectrais consistem em bons estimadores da fitomassa total.

Com base nos parâmetros correlacionados, foram identificadas equações de regressão que permitissem estimar a fitomassa aérea em função das variáveis espectrais e posteriormente variável de cota. A

determinação de equações de regressão para indicação da produtividade florestal foi feita por Cook et al. (1989) em áreas de florestas temperadas nos Estados Unidos.

Foram testados doze modelos de ajuste do pacote estatístico SAEG: linear, quadrático, cúbico, raiz quadrada, potencial, exponencial, hiperbólico 1, hiperbólico 2, logarítmico e, logarítmico 10, log. recíproco e cúbico-raiz. Utilizaram-se as variáveis espectrais e de cota como variáveis independentes e as variáveis de fitomassa como variáveis dependentes.

As análises das equações de regressão foram feitas com base no Coeficiente de Determinação (R^2), no Erro Padrão Residual (S_{yx}) e no Teste F no nível de significância de 5% de probabilidade. Os coeficientes da regressão foram testados pelo teste "t" de Student, com o mesmo nível de significância. O Intervalo de Confiança (IC) foi determinado pelo valor médio da variável independente (x) $\pm S_{yx}$, no nível de significância de 5%.

Resultados

De um modo geral, foi possível constatar que as matrizes de correlação das quatro parcelas apresentaram resultados significativos entre os parâmetros espectrais e os parâmetros do estrato intermediário, do estrato inferior e o parâmetro de cota e não apresentaram correlação com os parâmetros do estrato superior.

Com base nestes resultados, selecionaram-se alguns parâmetros para fazer a análise de regressão com o objetivo de estimar a fitomassa aérea. As variáveis espectrais foram consideradas como variáveis independentes e levaram-se em consideração os parâmetros presentes nos grupos de parâmetros que continham variáveis espectrais ou que apresentavam alguma relação com elas.

Embora fossem considerados os baixos valores obtidos de R^2 devido, entre outros fatores, à alta dispersão dos dados, encontraram-se valores elevados para F e t, em razão da grande quantidade de dados trabalhados. Os valores de S_{yx} apresentaram-se baixos, indicando uma acentuada precisão. Esse fato, todavia, é enganoso uma vez que é causado pela alto Grau de Liberdade (G.L.) dos resíduos.

A estimativa de fitomassa, com uso de dados espectrais, foi feita através de equações obtidas na análise de regressão. Neste estudo foi utilizado o modelo:

$$y = a + b.x,$$

(1) No estrato inferior fez-se uso da equação:

onde:

y = variável dependente;

a = constante;

b = coeficiente da variável independente;

x = variável independente.

Foram testados doze modelos para ajuste e quase todos os resultados obtidos foram significativos. A escolha desse modelo decorreu de este apresentar, ao contrário dos onze demais, resultados para todas as análises de regressão realizadas. Na maioria das regressões, os valores mais significativos de R² foram dos ajustes com modelos quadrático, cúbico, raiz quadrada e cúbico-raiz.

Como não se verificou relação das variáveis do estrato superior com as variáveis espectrais, procedeu-se, então, a cálculos de estimativa média de fitomassa dos estratos intermediário (A) e inferior (B), utilizando valores médios das variáveis.

Na parcela 1 estimou-se a fitomassa aérea seca total do estrato intermediário pela equação:

$$A = 0,208642 + 0,000577257 \times \text{TMPV} \quad (2)$$

$$R^2 = 0,2007 \quad F = 100,44 \quad \text{IC} = 0,292 \pm 0,063$$

O resultado corresponde a 14,6 t/ha.

A fitomassa aérea seca do estrato inferior foi estimada pela equação:

$$B = -0,0911609 + 0,447858 \times \text{TMNDVI} \quad (3)$$

$$R^2 = 0,1612 \quad F = 76,89 \quad \text{IC} = 0,157 \pm 0,004$$

Foi obtido total equivalente a 7,8 t/ha.

O total de fitomassa aérea seca, estimada em função de variáveis espectrais, foi de 22,4 t/ha. Considerando os dados de campo, 320 t/ha do estrato superior, 14 t/ha do estrato intermediário e 8 t/ha do estrato inferior, estimou-se a fitomassa aérea seca em 342 t/ha.

Para a parcela 2 a fitomassa aérea seca do estrato intermediário foi calculada pela equação:

$$A = -0,605435 + 1,65995 \times \text{TMNDVI} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,1106 \quad F = 36,32 \quad \text{IC} = 0,299 \pm 0,110$$

O resultado obtido totalizou 0,30 t/0,02 ha, equivalente a 15 t/ha.

$$B = 0,239230 - 0,0284057 \times \text{HRVR} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,0515 \quad F = 15,87 \quad \text{IC} = 0,132 \pm 0,026$$

O resultado apresentado foi equivalente a 6,6 t/ha.

O total de fitomassa aérea seca estimada em função de variáveis espectrais foi de 21,6 t/ha. Os dados de campo apresentaram valor de 219 t/ha, assim distribuídos: 198 t/ha no estrato superior, 14,5 t/ha no estrato intermediário e 6,5 t/ha no estrato inferior.

Ao contrário das outras parcelas, na parcela 3 foi possível definir uma equação para estimar a fitomassa foliar verde (úmida) do estrato superior (C):

$$C = 119,166 - 27,6911 \times \text{TMR} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,0920 \quad F = 5,17 \quad \text{IC} = 22,948 \pm 25,900$$

O total encontrado corresponde a 1147,4 t/ha. Os dados de campo apresentam valor de 12 t/ha. Verifica-se essa disparidade em virtude da reduzida relação entre as variáveis testadas, apesar de ter sido possível constatar a respectiva correlação. Deduziu-se, neste caso, que o modelo de ajuste linear não é apropriado, sendo recomendável a identificação de outro modelo.

Através da equação 7, estimou-se a fitomassa aérea seca do estrato intermediário em 13,9 t/ha.

$$A = -0,561657 + 0,241570 \times \text{TMR} \quad (7)$$

$$R^2 = 0,8396 \quad F = 266,88 \quad \text{IC} = 0,278 \pm 0,031$$

A fitomassa seca do estrato inferior não foi avaliada.

No campo estimou-se em 181 t/ha a fitomassa aérea seca do estrato superior, em 12,5 t/ha a do estrato intermediário e em 4,5 t/ha a do estrato inferior, totalizando 198 t/ha.

Na parcela 4 não houve significância para o cálculo da fitomassa aérea seca do estrato intermediário. Não foi calculada a fitomassa aérea seca do estrato inferior. O valor de fitomassa seca total calculado com dados de campo foi de 480 t/ha, assim divididos: 458 t/ha de fitomassa do estrato superior, 14 t/ha do estrato intermediário e 8 t/ha do estrato inferior.

Conclusões

A estimativa de fitomassa aérea em região de floresta tropical mediante a aplicação de método

destrutivo, apesar de extremamente trabalhosa, apresentou-se factível, dando origem a resultados satisfatórios.

A estimativa com o emprego de dados orbitais, associados a dados de campo, conforme a aplicação da metodologia proposta por este estudo, apresentou-se promissora.

Comprovou-se satisfatória a sistemática adotada de alocação de parcelas amostrais e coleta de dados de campo, tendo sido, entretanto, constatada a necessidade de sua compatibilização com técnica de sensoriamento remoto. As parcelas devem ser orientadas no alinhamento da órbita do satélite a ser utilizado e as subparcelas devem ter tamanho equivalente ao respectivo IFOV.

Em função de certos obstáculos quanto à definição das parcelas e obtenção dos dados orbitais TM-LANDSAT e HRV-SPOT, enfrentou-se o problema de se trabalhar com dados de diferentes estações do ano, com condições atmosféricas diversas.

A ausência de feições de fácil identificação nas imagens, que tendem a não sofrer alterações com a passagem do tempo, dificultou a atividade de registro e conseqüentemente tornou mais trabalhosa a integração de imagens e dados em sistema de informação geográfico. Para solucionar esse aspecto, recomenda-se a utilização de Sistema de Posicionamento Global (GPS) na identificação de pontos de controle para realização do registro, bem como no reconhecimento de parcelas.

A geração de imagens de Mistura Espectral e de Índices de Vegetação mostrou ser operacionalmente simples. Sob o aspecto digital, essas imagens forneceram boa distinção na variação das feições na cobertura vegetal.

Foram significantes as correlações existentes entre as variáveis determinantes da fitomassa aérea, as variáveis dendrométricas, as variáveis espectrais e a variável cota. As variáveis de fitomassa do estrato superior não seguiram essa tendência, constituindo alternativa para correlação com as demais a transformação matemática dessas variáveis.

Com relação ao tratamento estatístico dos dados, foram observadas algumas distorções no Coeficiente de Determinação (R^2), no teste "t", no Teste F e no Erro Padrão Residual (S_{yx}) das equações analisadas. Isto deveu-se, principalmente, à grande quantidade de dados coletados por parcela e à variação de classes existentes dentro de cada variável.

O modelo de ajuste linear utilizado demonstrou significância entre as variáveis de fitomassa dos estratos intermediário e inferior e as variáveis espectrais e de cota. É recomendável a realização de estudo de modelagem, com vistas à definição de modelos mais eficientes para quantificação de fitomassa nos três estratos. Outras alternativas de avaliar a fitomassa do estrato superior seriam a identificação de correlação entre suas variáveis dendrométricas e de fitomassa com as mesmas variáveis dos estratos intermediário e inferior ou a geração de variáveis espectrais para serem correlacionadas.

Os modelos de ajuste foram significativos seja com a utilização de imagens TM-LANDSAT ou HRV-SPOT, seja imagens índice ou imagens fração. Entretanto, as parcelas 1 e 4, alocadas na mesma tipologia florestal, apresentaram modelos de ajustes distintos.

Em razão do emprego de Índices de Vegetação, esperava-se correlacionar os dados espectrais somente com variáveis do estrato superior e encontrar problemas de ocorrência de sombreamentos provocados pela variação no dossel e relevo. Ocorreu, efetivamente, correlação com variáveis dos estratos intermediário e inferior, onde o efeito de sombra é acentuado, e não foi verificada diferença com a variação no relevo.

Constatou-se aparente impossibilidade do emprego de variáveis espectrais para estimativa de fitomassa do estrato superior em região de cobertura florestal com grande quantidade de fitomassa. Embora o valor de fitomassa foliar do estrato superior seja em geral baixo em relação à fitomassa total, há contribuição de todos os demais componentes da vegetação, tanto do estrato superior, como dos demais, elevando consideravelmente a influência da fitomassa sobre a resposta espectral.

A "visualização" dos estratos intermediário e inferior pode ser causada pela penetração da radiação, em função de ocorrência de aberturas naturais no dossel. Dessa forma, percebe-se a necessidade de identificação científica das espécies presentes na área e de seu estudo fenológico.

Não foi feito o mapeamento da fitomassa aérea, considerando-se os estratos, as curvas de nível e as tipologias em razão das dificuldades de quantificação do maior contribuinte de fitomassa, o estrato superior. Tal fator não invalida a potencialidade de se realizar mapeamento por esse método, uma vez sanados os obstáculos descritos anteriormente.

Referências Bibliográficas

- J.B. Adams; M.O. Smith; R. Almeida Filho; A.R. Gillespie; D.A. Roberts A new LANDSAT view of land use in Amazonia. IN: **International Symposium on Primary Data Acquisition, Manaus, 24-29 Jun. 1990. Proceedings, Manaus, ISPRS, 1990, V.2, p. 177-185.**
- E.A. Cook; I.R. Iverson; R.L. Graham Estimating forest productivity with Thematic Mapper and biogeographical data. **Remote Sensing of Environment, 28**, Apr.-June: 131-141, 1989.
- C.F. Jordan Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology, 50(4)**: 663-669, 1969.
- E.B. Knippling Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment, 1(2)**: 155-159, 1970.
- S.W. Running; D.L. Peterson; M.A. Spanner; K.B. Teuber Remote sensing of coniferous forest leaf area. **Ecology, 67(1)**: 273-276, 1986.
- S.A. Sader; R.B. Waide; W.T. Lawrence; A.T. Joyce Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from LANDSAT TM data. **Remote Sensing of Environment, 28(2)**: 143-156, 1989.
- Y. E. Shimabukuro **Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas.** (Doctor of Philosophy Dissertation) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1987.
- G.W. Snedecor; W.G. Cochran **Statistical methods.** Ames, The Iowa State University Press, 1967. 593p.