

RELAÇÃO ENTRE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO (NDVI E SAVI) E PARÂMETROS BIOMÉTRICOS DE PLANTIOS DE *Eucalyptus urophylla* E *Eucalyptus camaldulensis* EM CACHOEIRA DO MANTEIGA (MG)¹

Flávio Jorge Ponzoni² e Yosio Edemir Shimabukuro²

RESUMO - Foram coletados dados radiométricos referentes à amplitude espectral compreendida entre 400 e 1.100 nm, por meio de um radiômetro SPECTRON-SE 590 colocado a bordo de um helicóptero ESQUILO, de plantios de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* localizados em Cachoeira do Manteiga-MG. As imagens TM/Landsat foram transformadas em imagens-reflectância e calibradas, utilizando os dados radiométricos coletados com o helicóptero. Os índices de vegetação (NDVI e SAVI) foram determinados a partir dos dados coletados nesses dois níveis de aquisição, os quais foram correlacionados com os dados biométricos (índice de área foliar - IAF, volume de madeira, área basal e número de árvores) estimados em campo. Os resultados indicaram a viabilidade de estimar os dados biométricos a partir de valores de IAF, em campo. Os NDVIs determinados por meio dos dados orbitais mostraram-se mais correlacionados com os dados biométricos que os SAVIs. A atenuação do efeito do solo mostrou-se desnecessária para as condições dos plantios considerados.

Palavras-chave: Índices de vegetação, biomassa florestal e parâmetros biofísicos.

RELATIONSHIP BETWEEN VEGETATION INDICES (NDVI AND SAVI) AND BIOMETRIC PARAMETERS OF *Eucalyptus urophylla* AND *Eucalyptus camaldulensis* STANDS IN CACHOEIRA DO MANTEIGA (MG)

ABSTRACT - Airborne radiometric data from *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus camaldulensis* stands located in Cachoeira do Manteiga, MG, were collected using an airborne SPECTRON SE 590 radiometer running at 400 to 1100 nm spectral range, installed in a helicopter. TM/Landsat images were transformed in reflectance images and were also calibrated considering the airborne data as a reference. Vegetation indices (NDVI and SAVI) were calculated from both acquisition data levels. These indices were correlated with biometric data estimated in the field (Leaf Area Index-LAI, Timber volume, Basal area and Number of trees). The results indicated that it would be possible to estimate biometric data from LAI. The NDVIs calculated from the orbital data showed better correlations with the biometric data than the SAVIs. The soil attenuation in SAVI was shown to be unnecessary, at least in forest stands like the ones considered in this work.

Key words: Vegetation indices, Forest biomass, Biophysical parameters.

¹ Recebido para publicação em 3.3.1998.

Aceito para publicação em 19.11.1998.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Divisão de Sensoriamento Remoto, Av. dos Astronautas, 1758 Jardim da Granja, 12227-010 São José dos Campos-SP.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação quantitativa da vegetação, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, tem sido comumente feita mediante o uso dos chamados *índices de vegetação*. Os vários índices fundamentam-se em razões elaboradas a partir de valores de reflectância ou radiância apresentados pela cobertura vegetal, nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo, uma vez que estas regiões são fortes indicadores da quantidade de biomassa fotossinteticamente ativa (TUCKER, 1979).

Dentre os índices mais usados destaca-se o NDVI (**Normalized Difference Vegetation Index**), que tem sido relacionado à biomassa, ao índice de área foliar (IAF), à produtividade primária, à radiação fotossintética, ao dióxido de carbono e aos parâmetros meteorológicos e ecológicos (TEILLET et al., 1997). Seu cálculo é realizado pela aplicação da seguinte equação: $NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$, em que IVP e V representam as “respostas espectrais” (reflectância) dos objetos existentes na superfície terrestre, referentes às regiões do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente.

HUETE (1987) estudou a influência do solo nos valores de NDVI e verificou a necessidade de desenvolver alguma alternativa para minimizar este efeito, para o caso de coberturas vegetais pouco densas. Assim, HUETE (1988) propôs outro índice, denominado SAVI (**Soil-Adjusted Vegetation Index**), dado por: $SAVI = ((IVP - V) / (IVP + V + L)) * (1 + L)$, em que L representa um fator de cobertura do solo, que varia de 0 a 1, sendo 0 o valor correspondente à não-existência de cobertura vegetal e 1, à cobertura de 100% do solo.

A aplicação desses índices na avaliação de parâmetros biométricos da vegetação tem sido motivada pela necessidade de quantificar a biomassa florestal para estimativas de emissão de carbono (C) na atmosfera, em consequência da queima de florestas para uso agropecuário do solo; de avaliar o estado fitossanitário de florestas implantadas; de estudar os estados fenológicos

etc. ROUGHGARDEN et al. (1991) mencionaram que as correlações altas entre NDVI e produção primária e entre fotossíntese e transpiração permitem a geração de mapas globais que representam a atividade da vegetação com confiabilidade satisfatória, além de permitir estimativas quantitativas de emissão de CO₂. Apesar destas possibilidades e potencialidades, as relações entre tais índices e os parâmetros biométricos da vegetação precisam ser mais bem conhecidas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as relações existentes entre os dois índices de vegetação mencionados (NDVI e SAVI), determinados a partir de dados radiométricos coletados em nível de aeronave (helicóptero) e orbital (TM/Landsat), e os valores de índice de área foliar (IAF), volume de madeira, área basal, número de árvores e altura média, estimados em campo, de plantios de *Eucalyptus* spp. localizados na confluência dos rios São Francisco e Paracatu, no município de Cachoeira do Manteiga-MG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está compreendida entre as coordenadas 16° 30' S - 16° 50' S e 45° 00' W - 45° 20' W, no município de Cachoeira do Manteiga, em Minas Gerais (Figura 1). Na confluência dos rios Paracatu e São Francisco, existe uma área acupada por plantios de *Eucalyptus* spp. (eucalipto), destinados à exploração comercial do material lenhoso produzido. As duas espécies predominantes (*Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla*) foram plantadas em uma área relativamente plana, constituída por solo arenoso e de baixa fertilidade.

2.2. Coleta de Dados para Estimativas de IAF e Volume de Madeira

Foram selecionados, arbitrariamente, 32 pontos a serem amostrados em campo, levando em consideração a diversidade de idades que pudessem conferir variações de densidade da cobertura

vegetal. As amostragens incluíram tanto a coleta de dados biométricos em campo, quanto de dados radiométricos nos dois níveis (aeronave e orbital). Os pontos 1, 2 e 3 continham a espécie *Eucalyptus urophylla*, plantada em 1990; os pontos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 continham a espécie *Eucalyptus camaldulensis*, plantada em 1992; os pontos 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22 continham esta mesma espécie, plantada em 1990; e, finalmente, os pontos 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32 continham também esta mesma espécie, plantada em 1991.

Para realizar as estimativas de IAF em cada um dos pontos amostrados, foi utilizado o instrumento LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LICOR, Technical Information, 1989), desenvolvido para fazer determinações rápidas e não-destrutivas

do IAF e de outros atributos estruturais do dossel. Com o uso deste instrumento, para o caso de dosséis de porte florestal, as estimativas de IAF apresentam tendência de superestimar os valores, uma vez que troncos e galhos influem no balanço da radiação no interior do dossel. Os valores de IAF estimados representaram, na realidade, a densidade da parte aérea do dossel. As medidas realizadas no interior do dossel incluíram seis repetições para cada ponto, e determinou-se a média aritmética desses valores de IAF, resultando em uma única estimativa de IAF para o ponto.

Os parâmetros biométricos, comuns ao inventário florestal tradicional, como área basal, volume de madeira, altura e número de árvores, foram obtidos mediante o emprego do método descrito por LEE et al. (no prelo).

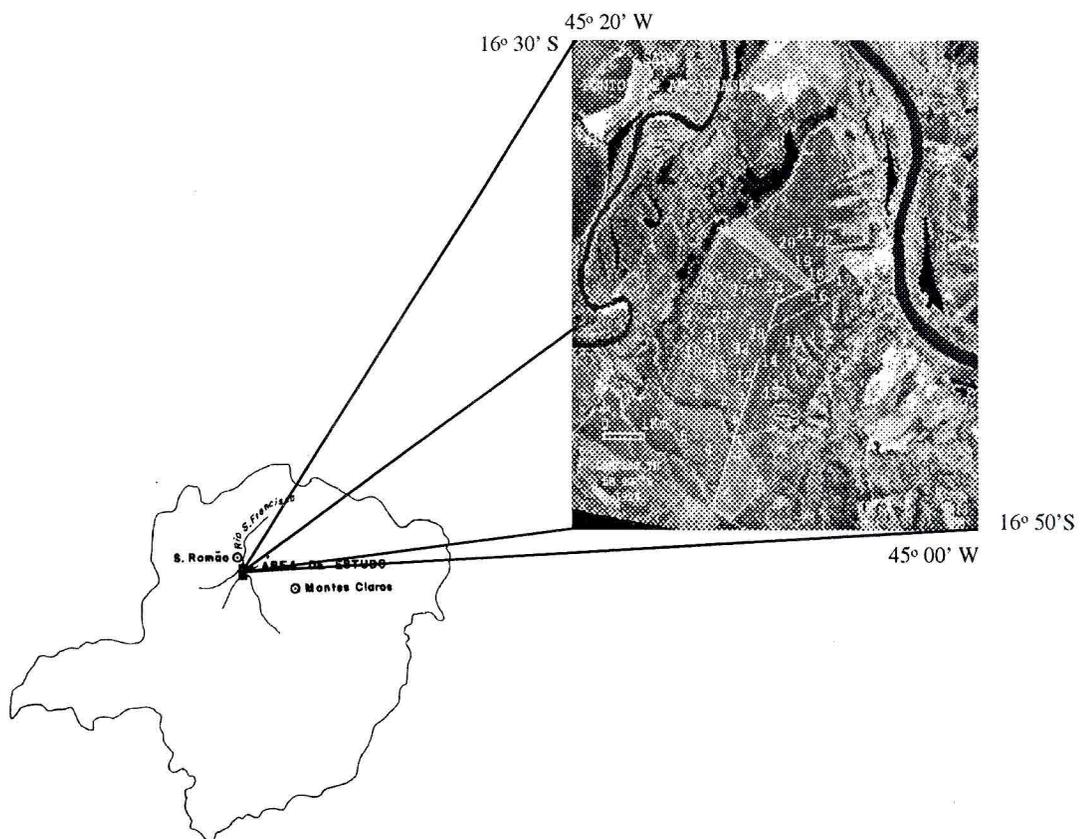


Figura 1 - Localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais.
Figure 1 - Minas Gerais study area location.

2.3 Coleta de Dados Radiométricos

Os 32 pontos amostrados em campo encontram-se assinalados na composição colorida referente à área de estudo, elaborada a partir das imagens das bandas TM3, TM4 e TM5, com os filtros azul, verde e vermelho, respectivamente (Figura 1).

Foi utilizado um helicóptero ESQUILO do 2º Esquadrão do 8º Grupo de Aviação da Aeronáutica, sediado em Recife-PE, no qual foi instalado o Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportados (SADA), abrigando o radiômetro SPECTRON SE-590, que operou na faixa espectral compreendida entre 400 nm e 1.100 nm, dotado de uma abertura (IFOV) de 10°. Outro radiômetro semelhante àquele colocado a bordo do helicóptero foi destinado à coleta de dados radiométricos de uma placa de sulfato de bário posicionada no solo, em um local estrategicamente selecionado, que permitia o contato via rádio entre as equipes de vôo e de solo. Posteriormente, foram realizadas medições radiométricas da placa-padrão nas mesmas condições de iluminação e visada, com ambas as unidades de coleta de dados dos dois radiômetros, para posterior intercalibração.

Os dados radiométricos foram coletados entre o período de 10 e 11 horas dos dias 3 e 4/5/95, por meio do vôo pairado da aeronave, mantendo uma altitude de aproximadamente 150 m, o que conferia um elemento de resolução espacial no terreno (pixel) de aproximadamente 30 m. Pelo contato via rádio, ambos os instrumentos (radiômetro colocado no helicóptero e aquele mantido no solo) foram acionados, simultaneamente. De cada ponto foram coletadas três medidas (repetições), para posterior determinação de valores médios dos Fatores de Reflectância (FRs).

Os dados coletados, tanto dos pontos no terreno quanto da placa-padrão, foram dispostos sob a forma de espectros (vetores com 252 linhas) e introduzidos em planilha eletrônica, para determinação dos FRs, calculados mediante a razão entre a radiância refletida pelos pontos no terreno e a radiância da placa-padrão, levando em consideração

o horário de aquisição de cada espectro. Anteriormente à introdução dos espectros referentes à placa-padrão na planilha eletrônica, eles foram multiplicados pelos fatores de intercalibração das unidades de coleta de dados dos radiômetros, com o objetivo de uniformizar suas sensibilidades. Foram elaborados gráficos referentes às curvas dos FRs e determinados seus valores médios em quatro bandas espectrais, para cada um dos 32 pontos e suas respectivas repetições, levando em consideração os intervalos espectrais das quatro primeiras bandas do sensor TM/Landsat (banda 1 - 450 a 520 nm, banda 2 - 520 a 600 nm, banda 3 - 630 a 690 nm e banda 4 - 760 a 900 nm.)

Calculou-se a média aritmética dos três espectros de reflectância espectral de cada ponto, que foram então mediados (média aritmética), originando um único espectro para cada ponto. Os FRs médios das quatro bandas mencionadas foram determinados pela média aritmética dos FRs contidos dentro de cada uma das respectivas amplitudes espectrais.

Os valores médios referentes aos FRs das bandas 3 e 4 foram utilizados para o cálculo do NDVI e do SAVI, por meio das seguintes equações: $NDVI = (b4-b3)/(b4+b3)$ e $SAVI = ((b4-b3)/(b4+b3+0,25))*1,25$, em que b4 e b3 são os valores dos FRs das bandas 4 e 3, respectivamente. O valor de 0,25 na fórmula do SAVI foi assim estabelecido, assumindo pouca densidade dos plantios.

2.4 Processamento de Imagens Orbitais

Todos os procedimentos descritos a seguir foram conduzidos no aplicativo PCI Easi Pace, disponível no Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE (LTID/INPE).

Foi utilizada uma imagem TM/Landsat, órbita/ponto 219/71 de 12/6/95, data esta mais próxima à realização das medições radiométricas sobre os plantios (maio de 1995). As imagens referentes às bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7 foram então recortadas sob forma de um módulo com 1.024 x 1.024 pixels de dimensão e,

em seguida, submetidas ao processamento de um programa computacional especialmente elaborado para determinar os valores de reflectância aparente para cada um dos pixels constituintes, o que originou as chamadas **imagens-reflectância**.

Os FRs de cada uma das quatro bandas espectrais, referentes aos dados radiométricos coletados com o helicóptero, foram utilizados para calibrar os valores de reflectância aparente existentes nas respectivas imagens-reflectância dessas bandas espectrais. Essa calibração consistiu em definir equações de regressão linear, tendo como variável dependente os valores médios de reflectância de cada banda, oriundos do campo (helicóptero), e como variável independente os valores de reflectância aparente extraídos da imagem em cada um dos pontos assinalados na Figura 1 e de outros pontos representativos de água (objeto escuro) e de solo (objeto claro). A inclusão de FRs de água e solo teve como objetivo abranger os extremos dos valores de brilho de cada imagem, a fim de permitir o estabelecimento de equações de regressão mais consistentes, levando em conta não só a área ocupada pelos plantios de eucalipto, como também toda a cena analisada.

As equações resultantes para cada uma das bandas foram introduzidas em um programa computacional, compatível com o ambiente PCI Easi Pace, de forma a determinar novos valores de reflectância para cada pixel das imagens das quatro primeiras bandas do sensor TM/Landsat. Estas imagens foram denominadas **imagens-calibradas**.

A partir dessas **imagens-calibradas** foram elaboradas mais duas imagens, referentes ao NDVI e ao SAVI, utilizando as mesmas equações já apresentadas, que foram implementadas em um programa compatível com o ambiente PCI Easi Pace. Estes índices passaram a ser denominados de $NDVI_{ima}$ e $SAVI_{ima}$, respectivamente, para diferenciá-los daqueles determinados a partir dos dados coletados com o uso do helicóptero. Os valores de NDVI e de SAVI específicos de cada um dos pontos amostrados em campo/helicóptero (Figura 1), os dados biométricos e aqueles extraídos das imagens orbitais ($NDVI_{ima}$ e $SAVI_{ima}$)

foram transpostos para uma planilha eletrônica, para determinação dos coeficientes de correlação e para elaboração de gráficos ilustrativos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dados Biométricos

No Quadro 1, estão os dados de área basal, altura média, número de árvores, fator de forma, volume e IAF, para os 32 pontos amostrados em campo.

Observou-se que os pontos amostrais recaíram sobre talhões que apresentaram diferenças de densidade, conforme mostram os valores de G, N, V e IAF.

3.2. Relação entre IAF Estimado em Campo e os Parâmetros V, G, H e N

A Figura 2 apresenta os gráficos ilustrativos das relações entre IAF e os valores de V, G, H e N.

Esses resultados são coerentes com aqueles obtidos por SOUSA (1997), em plantios adultos de *Pinus* spp. Estes plantios apresentavam valores de IAF em torno de 3 a 5, os quais, segundo BARET e GUYOT (1991), encontram-se acima do chamado ponto de saturação, onde os valores de reflectância da vegetação na região do visível (região de operação do LAI-2000) não apresentam variações significativas. Inclusive, SOUSA (1997) mencionou a conveniência de trabalhar com plantios florestais que apresentam valores de IAF inferiores a 3, para que as relações pretendidas pudessem ser avaliadas satisfatoriamente. A única relação na qual foi encontrado resultado aparentemente incoerente foi entre IAF e N. O esperado seria uma relação positiva entre esses dois parâmetros, apesar de nem sempre o número de árvores estar correlacionado positivamente à densidade de uma cobertura florestal. Para o caso dos plantios considerados neste trabalho, a relação entre V e N reforça essa suposição, como pode ser observado na Figura 3.

Quadro 1 - Dados biométricos estimados a partir de dados coletados em campo
Table 1 - Biometric data estimated from field data

Ponto	G(m ² /ha)	H(m)	N(N ^o árv./ha)	FF	V(m ³ /ha)	IAF
1	8,16	6,48	1105	0,57833	30,70932	1,19
2	7,05	7,47	1798	0,57833	31,35705	1,24
3	5,15	8,53	1487	0,57833	26,41811	1,36
4	5,01	5,66	1773	0,57833	16,41878	0,88
5	3,32	6,64	1329	0,57833	11,12128	1,03
6	2,40	3,98	1055	0,57833	7,339007	0,84
7	5,18	3,80	2644	0,57833	11,93094	1,05
8	3,02	4,97	951	0,57833	8,67495	0,91
9	2,95	4,79	1177	0,57833	8,304818	0,93
10	1,81	4,99	907	0,57833	5,661850	1,31
11	4,49	5,36	2471	0,57833	13,89148	1,05
12	2,24	4,05	2320	0,57833	5,569317	0,80
13	6,80	8,83	1820	0,57833	34,97161	1,41
14	6,21	10,45	1600	0,57833	37,82278	1,38
15	9,54	8,38	1643	0,57833	44,50827	1,12
16	7,99	9,44	1578	0,57833	44,52562	1,39
17	8,86	12,69	1367	0,57833	64,74404	1,78
18	7,13	7,61	1290	0,57833	41,29854	1,74
19	4,44	9,05	949	0,57833	23,22573	1,51
20	7,68	12,53	1303	0,57833	55,42136	1,44
21	6,85	9,33	1484	0,57833	38,26231	1,52
22	5,24	7,80	1267	0,57833	26,31979	1,39
23	6,06	7,83	932	0,57833	27,29139	1,03
24	5,01	9,10	1203	0,57833	26,71884	1,14
25	7,34	8,37	1678	0,57833	35,68874	1,62
26	4,68	7,22	1632	0,57833	20,46131	1,20
27	4,81	8,22	1464	0,57833	21,17266	1,09
28	7,88	6,26	2697	0,57833	27,86972	1,46
29	3,95	8,25	1046	0,57833	17,52339	1,56
30	3,39	9,25	1223	0,57833	18,41402	1,07
31	5,21	7,19	939	0,57833	21,95340	1,32
32	4,64	6,86	1390	0,57833	18,15377	0,84

G = área basal média em m²/ha; H = altura média das árvores; FF = fator de forma médio; V = volume médio em m³/ha, corrigido pelo fator de forma; e IAF = índice de área foliar.

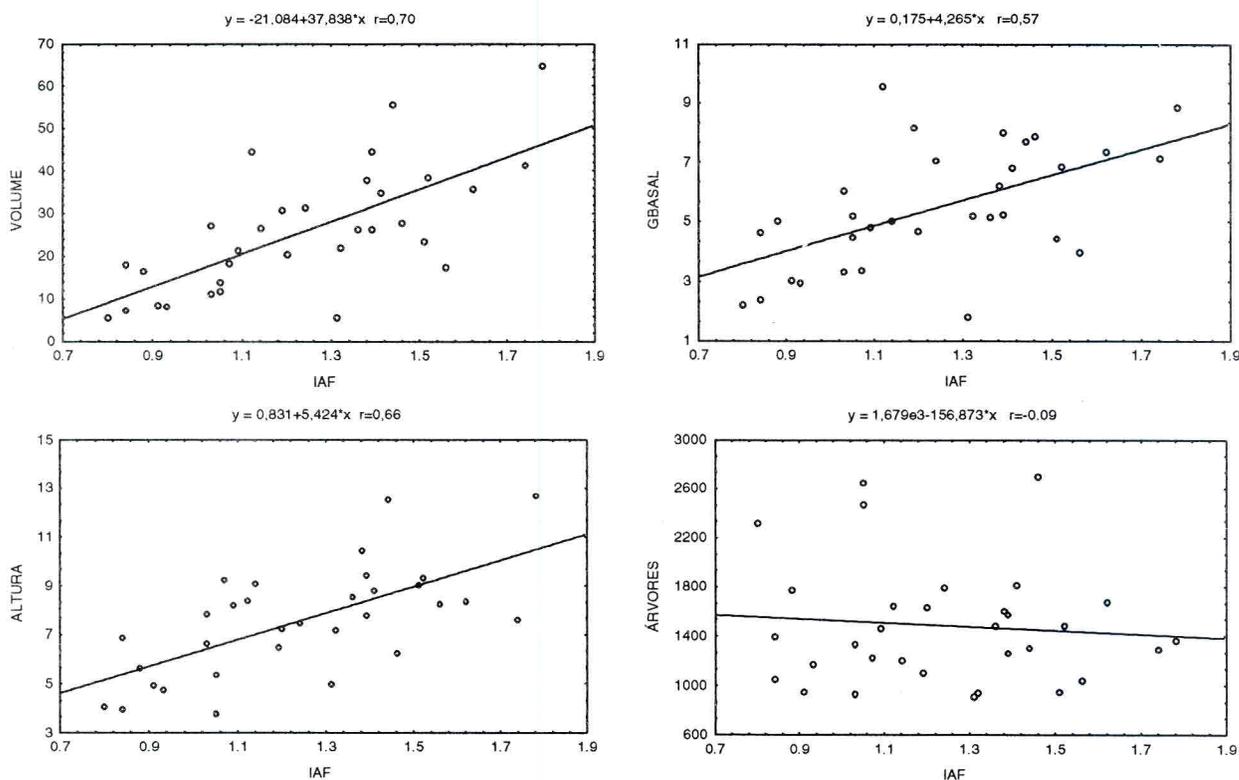


Figura 2 - Relações entre IAF e V, G, H e N.
Figure 2 - Relationships between IAF and V, G, H and N.

Por meio dos modelos apresentados na Figura 2, é possível estimar, embora com menor precisão, o volume médio de madeira, a área basal e a altura média de um talhão a partir de estimativas de IAF realizadas em campo.

3.3. Relações entre os Índices de Vegetação (NDVI, NDVI_{ima}, SAVI e SAVI_{ima}) e os Parâmetros V, G, H, N e IAF

A Figura 4 apresenta os gráficos ilustrativos das relações entre NDVI e os demais parâmetros biométricos (V, G, H e N), incluindo o IAF estimado em campo.

As relações apresentadas na Figura 4 mostraram-se relativamente fracas para estimar os parâmetros biométricos por meio do NDVI, calculado a partir de dados aerotransportados. Por outro lado,

essas relações apresentaram-se um pouco melhores, porém ainda fracas, quando realizadas com os dados orbitais, conforme pode ser observado na Figura 5.

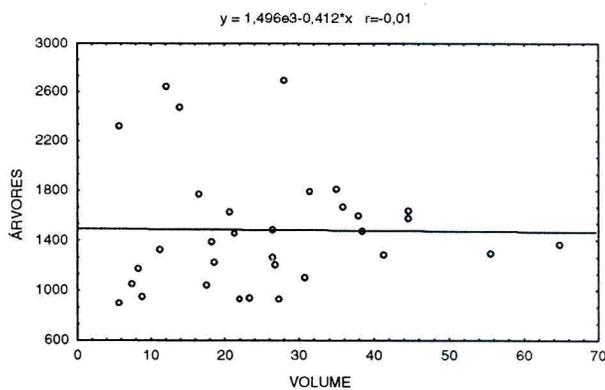


Figura 3 - Relação entre N e V.
Figure 3 - Relationship between N and V.

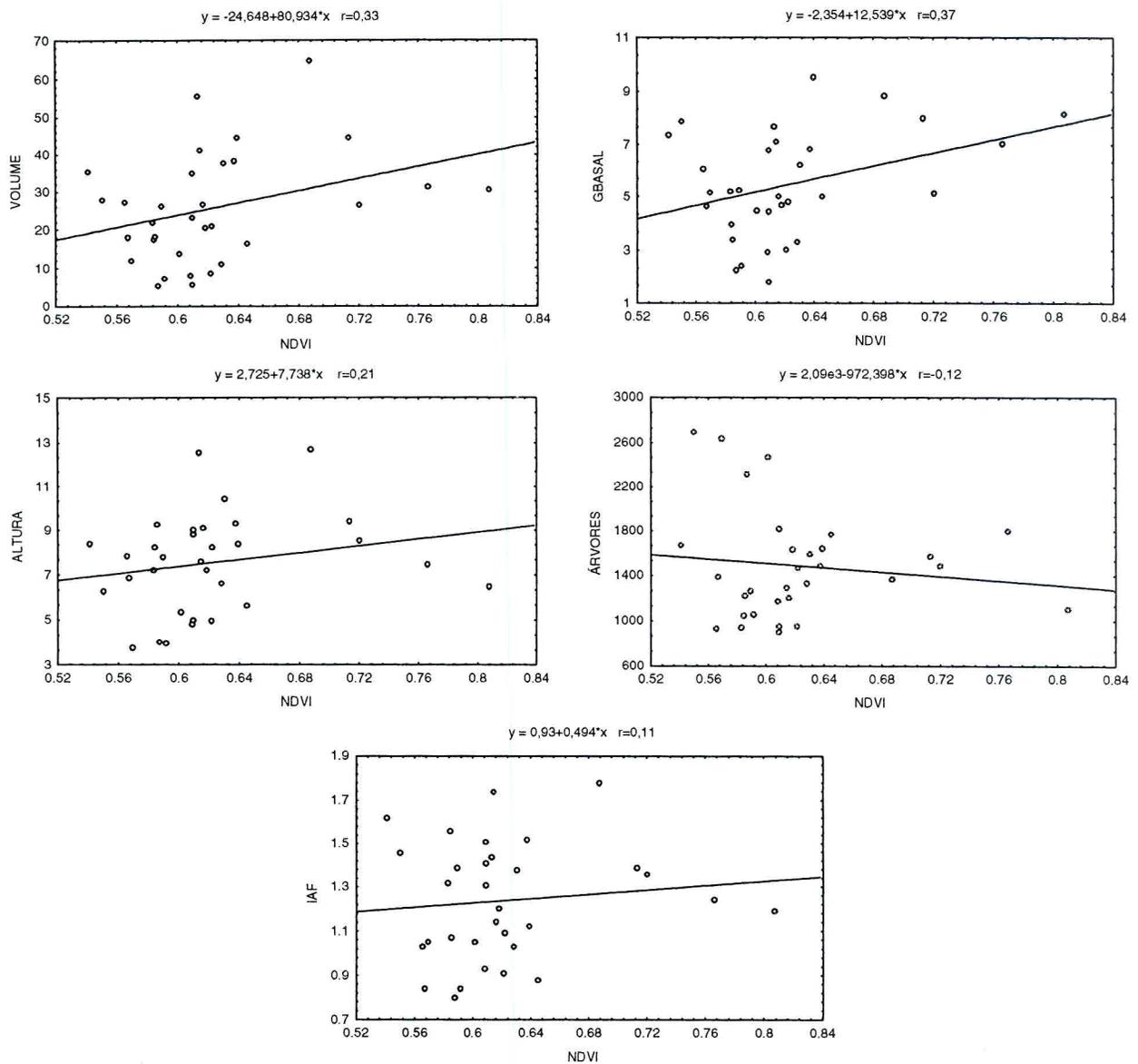


Figura 4 - Relações entre NDVI e parâmetros biométricos.

Figure 4 - Relationship between NDVI and biometric parameters.

No Quadro 2 estão, resumidamente, os coeficientes de correlação referentes a cada uma das relações apresentadas nas Figuras 4 e 5.

Essa ligeira superioridade dos dados orbitais, em relação aos dados aerotransportados, pode ser explicada pela maior influência do solo sobre os valores de FRs das regiões do visível e do infra-

vermelho próximo, utilizados no cálculo de NDVI referente aos dados aerotransportados.

Os resultados alcançados para SAVI seguiram as mesmas tendências daquelas apresentadas pelas relações referentes ao NDVI, conforme pode ser observado no Quadro 3, razão pela qual os gráficos foram omitidos.

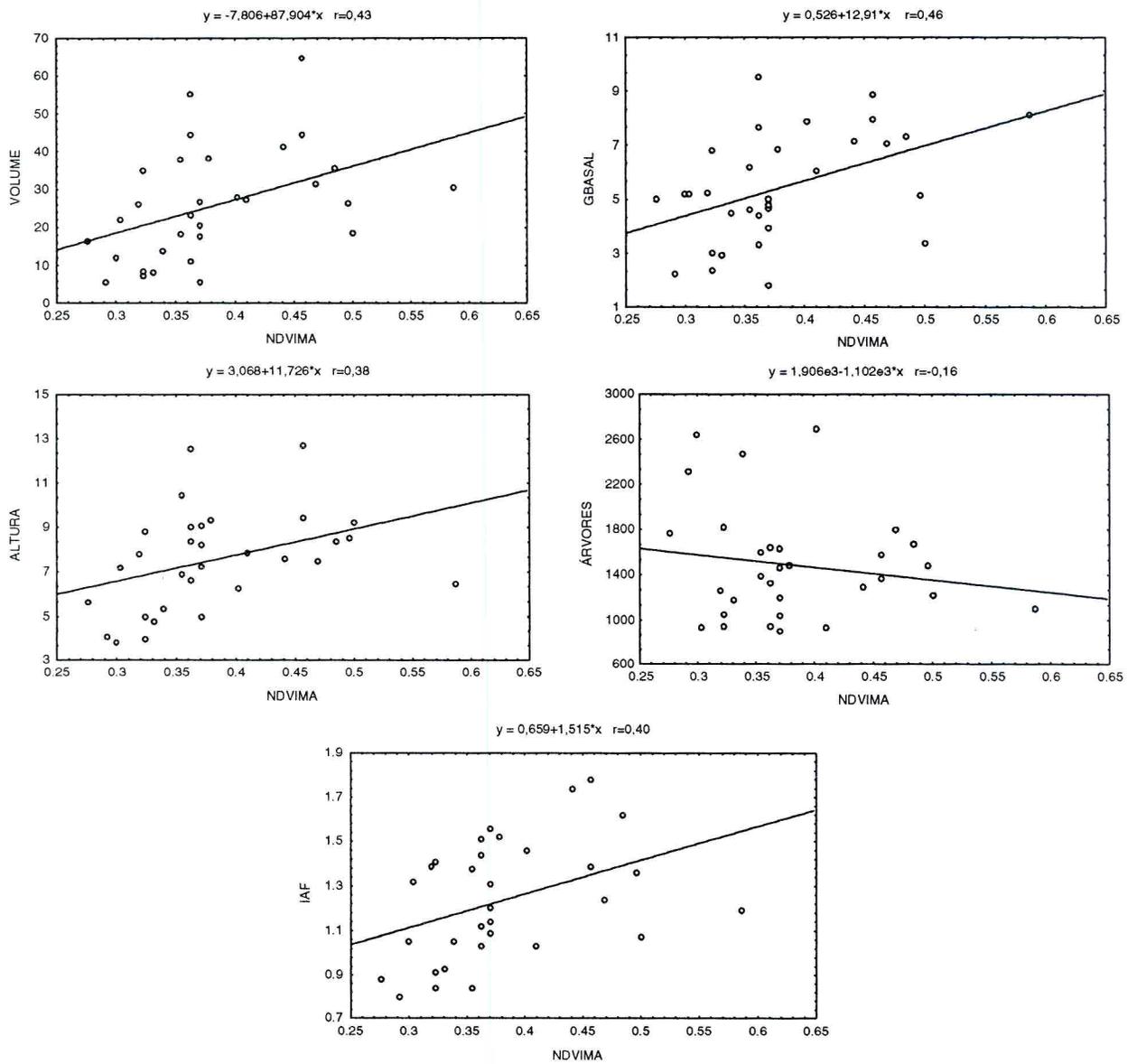


Figura 5 - Relações entre NDVI_{ima} e parâmetros biométricos.
Figure 5 - Relationships between NDVI_{ima} and biometric parameters.

Quadro 2 - Coeficientes de correlação entre NDVI e NDVI_{ima} e os parâmetros biométricos
Table 2 - Correlation Coefficients between NDVI and NDVI_{ima} and the biometric parameters.

	Volume	Área Basal	Altura	Nº de Árvores	IAF
NDVI	0,33	0,37	0,21	-0,12	0,11
NDVI _{ima}	0,43	0,46	0,38	-0,16	0,40

Quadro 3 - Coeficientes de correlação entre SAVI e SAVI_{ima} e os parâmetros biométricos
Table 3 - Correlation coefficients between SAVI and SAVI_{ima} and the biometric parameters

	Volume	Área Basal	Altura	Nº de Árvores	IAF
SAVI	0,33	0,41	0,16	-0,03	0,10
SAVI _{ima}	0,29	0,33	0,30	-0,12	0,28

Os valores dos coeficientes de correlação mostrados no Quadro 3 não apresentaram diferenças tão contrastantes como aquelas ocorridas entre NDVI e NDVI_{ima} (Quadro 2), o que indica que, possivelmente, o efeito do solo foi realmente minimizado no cálculo de SAVI. Tal efeito não foi tão marcante sobre os valores de FRs referentes às imagens orbitais.

4. CONCLUSÕES

Os valores de IAF estimados em campo apresentaram correlação positiva com os parâmetros biométricos dos plantios de *Eucalyptus* spp., o que evidencia a viabilidade de utilizar técnicas de sensoriamento remoto na sua estimativa.

Os dados aerotransportados forneceram valores de NDVI menos correlacionados com os parâmetros biométricos que aqueles determinados a partir de dados orbitais (NDVI_{ima}).

As correlações apresentadas por NDVI_{ima} com os parâmetros biométricos mostraram-se superiores àquelas apresentadas por SAVI_{ima}, sendo desnecessária a atenuação do efeito do solo.

Para os dados aerotransportados, o efeito da atenuação do solo também não foi satisfatório, uma vez que as relações de SAVI com os parâmetros biométricos não sofreram alterações significantes em relação àquelas verificadas entre estes parâmetros e os valores de NDVI.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARET, F., GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v.35, p.161-173, 1991.
- HUETE, A.R. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, n.1, p.61-68, 1987.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, Madison, v.25, n.3, p.295-309, 1988.
- LEE, D.C.L., Ponzoni, F.J., SANTOS, J.R. **Considerações sobre aplicações práticas do ACS para inventário florestal: o uso do relascópio para obter medidas relativas**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [199-] (Relatório Técnico no prelo).
- ROUGHGARDEN, J., RUNNING, S.W., MATSON, P.A. What does remote sensing do for Ecology? **Ecology**, Durham, v.72, n.6, p.1918-1922, 1991.
- SOUSA, C.L. **Uso de imagens-índice e de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de *Pinus* spp.** São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997. 111p. (INPE-6398-TDI/614).
- TEILLET, P.M., STAENZ, K., WILLIAMS, D.J. Effects of spectral, spatial and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v.61, p.139-149, 1997.
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, Madison, v.8, p.127-150, 1979.
- R. Árv., Viçosa-MG, v.22, n.3, p.357-366, 1998