



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

***USO DE IMAGENS-ÍNDICE E DE IMAGENS-PROPORÇÃO PARA
AVALIAR A QUANTIDADE DE MADEIRA EM POVOAMENTOS DE
Pinus spp.***

Claudia Linhares de Sousa

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelos
Drs. Flávio Jorge Ponzoni e Yosio Edemir Shimabukuro,
aprovada em julho de 1997.

INPE
São José dos Campos
Julho de 1997

**Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca/Coordenação de Ensino,
Documentação e Programas Especiais (CEP) – INPE**

528.711.7:630

SOUSA, C.L. de

Uso de imagens-índice e de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de Pinus spp. / C.L. de Sousa. – São José dos Campos: INPE, 1997.

133 p. – (INPE-6398-TDI/614)

1. Reflorestamento. 2. Índice de Vegetação. 3. Inventário de madeira. 4. Índice de Área Foliar. 5. Biomassa. 6. Modelo Linear de Mistura. 7. Landsat 5. Processamento de Imagens. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto

Dr. Flávio Jorge Ponzoni	Orientador/Presidente
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro	Orientador
Dr. Jurandir Zullo Júnior	Membro Convidado – UNICAMP
Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves	Membro Convidado – ESALQ

Candidata: Claudia Linhares de Sousa

São José dos Campos, 04 de julho de 1997

“Desconfio de quem não ri, sobretudo de si próprio e depois dos outros. Desconfio de quem se leva muito a sério.”

Lina Wertmüller

(Cineasta italiana)

*“Ao ver a elegância de seus vegetais,
qualquer pessoa que ame as ciências naturais sente um prazer,
uma alegria tão imensa como não poderá sentir jamais.”*

Charles Darwin

Para Raquel

AGRADECIMENTOS

Al Dr. Flávio Jorge Ponzoni, per orientarmi con tanta dedicação, competenza e amicizia. Sempre con molta saggezza e umiltà, ha saputo incoraggiarmi e tranquillizzarmi, facendomi sorridere e nello stesso tempo apprendere sotto tutti gli aspetti. All amico e collega di lavoro, grazie per momenti tanto ricchi e indelebili.

Ao Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, pela orientação e pelo acompanhamento constante em todas as etapas, contribuindo de forma importante com sua experiência durante a elaboração deste trabalho, sempre com paciência.

À DURATEX FLORESTAL S.A., nas pessoas dos Engs. Jeannicolau Lacerda, Raul Chaves, Roberto Pinto e Márcio Rogério, que possibilitou a realização deste trabalho, fornecendo dados, informações e apoio logístico para o trabalho de campo, sempre com atenção e dedicação.

Ao Dr. João Roberto dos Santos, pelo incentivo, presença, amizade, carinho, colaboração, sugestões... desde meus primeiros contatos com o INPE.

Ao Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves e ao Dr. Jurandir Zullo Júnior, por participarem da banca examinadora, com sugestões e questionamentos que enriqueceram o trabalho e meus conhecimentos adquiridos durante o curso.

Ao MSc. Camilo Daleles Rennó e ao MSc. Sérgio Bernardes, pela ajuda constante nos mais diversos aspectos e ótimas contribuições ao longo de todo trabalho, mas principalmente, pela boa vontade, paciência, carinho e amizade com que prestaram essa ajuda.

Ao Dr. Sérgio Almeida e ao colega Sérgio Monteiro Soares, pelas aulas práticas e teóricas de GPS.

À M^a Etelvina R. D. Arbex, tão querida pelos alunos, sempre alegre, otimista, eficiente e apaixonada pelo que faz. O mestrado não seria o mesmo sem ela... Obrigada Etel.

Ao Joaquim Godoi Filho, pela confecção dos desenhos da Fundamentação Teórica, com eficiência e rapidez.

À Suelena C. B. Coelho, bibliotecária exemplar e amiga querida. Obrigada!

Aos funcionários do LTID; da secretaria da DSR; da gráfica; da DGI do INPE de Cachoeira Paulista e a todos que colaboraram de alguma forma.

Ao CNPq, por conceder bolsa de estudo e ao INPE, pela oportunidade.

Ao Fabiano Luis de Sousa, incentivador, professor, crítico e companheiro, é o maior responsável por eu ter entrado neste curso de mestrado.

Aos colegas de curso e aos amigos Claudia Zuccari F. Braga, Dalton de M. Valeriano, Elisabete C. Moraes, Gerardo Kuntschik, Maria Silvia Pardi Lacruz, Milton C. Ribeiro e Sérgio Azevedo, pelos momentos de alegria, descontração e amizade.

RESUMO

Diversos problemas ambientais atuais estão relacionados com a diminuição da biomassa florestal, que ocasiona um aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera. A biomassa florestal é expressa por peso seco de material vegetal ou por volume de madeira e muitos trabalhos têm demonstrado sua relação com o Índice de Área Foliar (IAF), principal parâmetro de um dossel. A transformação de imagens orbitais, visando a extração de informações sobre a vegetação, fornecem estimativas indiretas do IAF, de maneira rápida e não destrutiva. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a sensibilidade de imagens-índice de vegetação e de imagens-proporção na detecção de alterações no volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp., submetida à prática de desbastes. A área de estudo consistiu em uma fazenda da DURATEX FLORESTAL S.A., localizada no município de Agudos, da qual se dispunha dos dados de volume de madeira anteriores e posteriores à realização de desbastes. Estes dados de volume foram comparados com dados extraídos das imagens digitais transformadas (TM/Landsat) nas mesmas datas, entre os anos de 1992 e 1994. Anteriormente à transformação das imagens, as mesmas foram georreferenciadas utilizando pontos de controle obtidos com GPS diferencial em campo. Em seguida foram convertidas para imagens reflectância e então, realizada uma retificação radiométrica, que visou minimizar as diferenças radiométricas devido aos efeitos atmosféricos e de diferentes calibrações dos sensores, entre as datas de passagem. Finalmente, foram geradas as imagens-índice (NDVI e SAVI) e as imagens-proporção (VEGETAÇÃO, SOLO e SOMBRA), cujos valores nelas contidos foram relacionados com os volumes de madeira nas duas situações mencionadas (antes e depois do desbaste). Também foi realizado um trabalho de campo, em junho de 1996, no qual foram estimados os valores de IAF em diversos talhões utilizando o LAI-2000. Foi realizada uma análise de regressão para avaliar a relação entre os valores de IAF e os dados de volume estimados para a mesma época. Para analisar os resultados obtidos, foram realizadas análises de variância (ANOVA), considerando-se dois tratamentos: antes e depois do desbaste. Além da ANOVAS, foram gerados gráficos de dispersão entre as variáveis. Os resultados mostraram que os dados de volume e de IAF situaram-se acima do ponto de saturação preconizado na literatura e as imagens-índice de vegetação e imagens-proporção não foram sensíveis às variações de volume decorrentes da realização dos desbastes, ao menos para o caso de florestas nas condições apresentadas neste trabalho.

USING INDEX-IMAGES AND END MEMBERS-IMAGES TO EVALUATE TIMBER
AMOUNT IN PINUS SPP. STANDS

ABSTRACT

Presently several environmental problems are related to the reduction of forest biomass which causes increase in the atmospheric concentration of carbon dioxide. Forest biomass is expressed by vegetal matter dry weight or by timber volume and many investigations have shown its relationship with Leaf Area Index (LAI), a major canopy parameter. The transformation of orbital images aiming at the extraction of information about the vegetation yields indirect LAI estimation in a fast and non-destructive way. Hence the objective of this investigation was to evaluate the sensitivity of vegetation index images and end-members images in the detection of timber volume change in Pinus spp. plantation under thinning practices. The study site is a DURATEX FLORESTAL S.A. plantation in the city of Agudos from which timber volume data was available before and after thinning. This volume data was compared to data collected from transformed digital images (TM/Landsat) from the same dates, between the years of 1992 and 1994. Prior to image transformation they were georeferenced using ground control points collected with a differential GPS. Next, they were converted into reflectance images and then a radiometric rectification was applied with the goal of minimizing the radiometric differences due to atmospheric effects and to different sensor calibrations between the two dates. Finally, index images (NDVI, SAVI) and end-members images (VEGETATION, SOIL and SHADOW) were derived and the relationships of their values with timber volume in the two situations (before and after thinning) were assessed. A field work was also carried in June, 1996 in which LAI from several stands was estimated with a LAI-2000. A regression analysis was carried out to evaluate the relationships between LAI and timber volume projected for the same date. Analysis of variance (ANOVA) considering the two treatments, before and after thinning, was conducted to analyze the results. Besides the ANOVA, scatterplots of the variables with regression lines were produced. The results show that volume and LAI data fell above the saturation level stated in the literature and that the index images and the proportion images were not sensitive to the volume variation caused by the thinning practice, at least for the case of forest stands in the conditions presented in this work.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	14
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	15
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	17
2.1 - Florestas Implantadas.....	17
2.2 - Comportamento Espectral de Alvos.....	21
2.2.1 - Princípios Físicos	23
2.2.2 - Vegetação	25
2.2.3 - Solos.....	29
2.2.4 - Água.....	31
2.3 - Estimativa de Parâmetros Biofísicos (IAF e Biomassa) Através de Técnicas de SR	33
2.3.1 - Adequação Radiométrica.....	38
2.3.2 - Transformação de Imagens Orbitais.....	42
2.3.2.1 - Índices de Vegetação.....	43
2.3.2.2 - Modelo Linear de Mistura	49
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	53
3.1 - Área de Estudo.....	53
3.2 - Cartas Topográficas e Imagens Orbitais.....	57
3.3 - Fluxograma de Atividades	59
3.4 - Trabalho de Campo	60
3.4.1 - Índice de Área Foliar (IAF).....	60
3.4.2 - Coordenadas Geodésicas.....	62
3.5 - Processamento dos Dados Orbitais	63
3.5.1 - Georreferenciamento e Registro das Imagens Orbitais	64
3.5.2 - Adequação Radiométrica.....	64
3.5.3 - Geração das Imagens-Índice de Vegetação	68
3.5.4 - Geração das Imagens-Proporção	69
3.5.5 - Composição das Máscaras dos Talhões.....	69

3.6 - Tratamento Estatístico dos Dados	70
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	73
4.1 - Trabalho de Campo	73
4.1.1 - Índice de Área Foliar.....	73
4.1.2 - Coordenadas Geodésicas.....	75
4.2 - Processamento dos Dados Orbitais	75
4.2.1 - Georreferenciamento e Registro	75
4.2.2 - Adequação Radiométrica.....	76
4.2.3 - Modelo de Mistura Espectral	81
4.3 - Análise Estatística das Imagens Transformadas.....	82
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u>	90
<u>CAPÍTULO 6 - RECOMENDAÇÕES</u>	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
APÊNDICE A - DADOS DE CAMPO.....	101
APÊNDICE B - INVENTÁRIO DA DURATEX FLORESTAL S.A.....	102
APÊNDICE C - MODELO DE REGRESSÃO	103
APÊNDICE D - VALORES DE REFLECTÂNCIA.....	104
APÊNDICE E - VALORES DOS ÍNDICES E DAS PROPORÇÕES	106

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Curva de reflectância típica de uma folha verde e sadia.....	25
2.2 - Efeito de diferentes pigmentos na curva de reflectância de uma folha	26
2.3 - Curvas de reflectância de uma folha verde e de uma folha vermelha	26
2.4 - Curvas de reflectância de coníferas e de decíduas	27
2.5 - Efeito do teor de umidade na curva de reflectância de uma folha	28
2.6 - Efeito do teor de umidade na curva de reflectância de um solo siltoso	30
2.7 - Curvas de reflectância de uma água turva e de uma água límpida.....	32
2.8 - Assinaturas espectrais da água, da vegetação e do solo.....	33
2.9 - Comportamento do NDVI em função do IAF	46
3.1 - Localização da área de estudo.....	54
3.2 - Fluxograma de atividades	59
3.3 - Esquema ilustrativo dos transectos dentro do talhão.....	61
3.4 - Obtenção dos IAF's via modelo.....	62
3.5 - Esquema da determinação dos conjuntos de pontos de controle claros e escuros	67
3.6 - Exemplo da ANOVA aplicada às variáveis	71
4.1 - Equação e diagrama de dispersão de VOL x IAF.....	74
4.2 - Plotagem dos polígonos dos talhões sobre a área de estudo.....	76
4.3 - Curvas de reflectância dos pixels puros.....	82
4.4 - Gráficos de dispersão NDVI x VOL e VEG x VOL	85
4.5 - Gráficos de dispersão dos índices e das proporções entre si	86
4.6 - Gráficos de dispersão dos índices de vegetação com relação ao volume.....	88
4.7 - Gráficos de dispersão de SOLO e de SOMB com relação ao volume	88

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Características dendrométricas dos talhões.....	56
3.2 - Datas de ocorrências dos desbastes, talhões desbastados e datas de passagem do satélite Landsat 5/TM, órbita/ponto 221/76 B (-2'').....	58
3.3 - Cobertura de nuvens e níveis de visibilidade das datas de passagem selecionadas.....	59
3.4 - Valores de $L_{máx}$ e $L_{mín}$ (em W/m^2sr) utilizados na conversão para radiância.....	65
3.5 - Valores de irradiância (em W/sr) utilizados na conversão para reflectância	65
3.6 - Ângulos de elevação solar (em graus) das datas de passagem.....	66
3.7 - Gráficos e matrizes de correlação gerados.....	72
4.1 - Valores de IAF obtidos em campo	73
4.2 - Médias dos pontos claros e escuros da imagem referência.....	78
4.3 - Médias de reflectância dos pontos de controle claros e escuros antes da retificação e a diferença das médias da imagem referência	79
4.4 - Médias de reflectância dos pontos de controle claros e escuros após a retificação e a diferença das médias da imagem referência	80
4.5 - Valores médios de reflectância dos pixels puros.....	81
4.6 - Valores médios dos volumes, dos índices e das proporções	83
4.7 - ANOVA aplicada ao volume	83
4.8 - Teste de igualdade de variâncias para os índices e as proporções	84
4.9 - ANOVAS aplicadas aos índices e às proporções.....	84
A.1 - Informações relativas ao trabalho de campo e dados coletados pelo LAI-2000.....	101
B.1 - Dados de volume fornecidos pela empresa.....	102
C.1 - Dados utilizados na obtenção da equação $VOL \times IAF$	103
D.1 - Valores de reflectância antes dos desbastes.....	104
D.2 - Valores de reflectância depois dos desbastes	105
D.3 - Valores médios de reflectância por banda	105
E.1 - Valores utilizados na análise estatística	106

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BR	- Imagem Brightness
CLS	- “Constrained Least Squares”
DAF	- Distribuição Angular de Folhas
DAP	- Diâmetro à Altura do Peito
EEM	- Espectro Eletromagnético
GPS	- “Global Positional System”
GR	- Imagem Greenness
IAF	- Índice de Área Foliar
IMA	- Incremento Médio Anual
NDVI	- “Normalized Difference Vegetation Index”
REM	- Radiação Eletromagnética
SAVI	- “Soil Adjusted Vegetation Index”
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SOLO	- Proporção de solo
SOMB	- Proporção de sombra
SR	- Sensoriamento Remoto
VEG	- Proporção de vegetação
VOL	- Volume
WLS	- “Weight Least Squares”

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde o início das discussões relacionadas às emissões de CO₂ em nível global, o Brasil tem se esforçado para adquirir conhecimento sobre sua efetiva contribuição nestas emissões devido à utilização/destruição de seus recursos naturais, sobretudo dos recursos florestais da região amazônica. Neste sentido, instituições de todo o país têm desenvolvido projetos cujos objetivos incluem a quantificação de biomassa florestal através de diferentes técnicas, dentre as quais destacam-se as de Sensoriamento Remoto (SR). Essas técnicas se fundamentam na interação da Radiação Eletromagnética (REM) com os objetos dos quais se pretende extrair informações. Para o caso de estudos da cobertura vegetal, inicialmente a aplicação destas técnicas foram voltadas quase que exclusivamente aos mapeamentos, discretizando a vegetação em classes fisionômicas. Atualmente, a despeito destes mapeamentos ainda serem realizados, ênfase tem sido dada à quantificação de parâmetros biofísicos, os quais caracterizam a chamada arquitetura de um dossel vegetal, incluindo a biomassa.

Estimativas de biomassa florestal através de técnicas de SR podem ser realizadas mediante a utilização de dados coletados em níveis de campo, aeronave ou orbital. Em qualquer um destes níveis, são exploradas relações existentes entre diferentes parâmetros biofísicos, dentre as quais destaca-se a existente entre o Índice de Área Foliar (IAF) e a biomassa. Para o caso dos dados orbitais, as estimativas de biomassa são comumente realizadas mediante a conhecida relação entre o IAF e os padrões da cobertura vegetal apresentados em imagens orbitais multiespectrais. Esta última relação motivou o desenvolvimento dos chamados Índices de Vegetação, que fundamentam-se na razão entre a reflectância espectral da cobertura vegetal nas regiões do infravermelho próximo e do vermelho, e na geração das Imagens-Proporção, que são originadas através de proporções estimadas de vegetação, solo e sombra existentes nos elementos pictóricos (pixels) das imagens.

Apesar da viabilização destes produtos (Imagens-Índice e Imagens-Proporção), suas sensibilidades quanto à quantificação da biomassa florestal são ainda pouco conhecidas, principalmente para o caso das florestas existentes na região amazônica, que apresentam grande diversidade florística, fisionômica e fenológica. A avaliação destas sensibilidades em ambiente amazônico é bastante dificultada devido à pouca disponibilidade de dados quantitativos de biomassa coletados em nível de campo, bem como daqueles de SR, devido a problemas das mais variadas ordens, que incluem cobertura de nuvens, periodicidade das imagens coincidente com levantamentos de dados em campo, por exemplo.

Desta forma, as florestas implantadas apresentam algumas vantagens por serem constituídas por pelo menos um gênero cobrindo extensas áreas, serem inventariadas regularmente quanto ao estado fitossanitário, volume de madeira, realização de técnicas de manejo florestal, entre outros. Dentre estas técnicas de manejo florestal que promovem alterações na quantidade de biomassa florestal, destacam-se as técnicas de desbastes, que são aplicadas com objetivos bem definidos e que são viabilizadas mediante o conhecimento do estoque de biomassa florestal, expressa comumente por volume de madeira (m^3/ha), antes e depois da retirada de material lenhoso. A disponibilidade dessa informação viabiliza o estudo das sensibilidades mencionadas acima, gerando conhecimentos e possibilitando possíveis aplicações tanto em áreas de florestas naturais (monitorando sua devastação), como de florestas implantadas (monitorando seu crescimento e desbastes).

O objetivo deste trabalho é avaliar as sensibilidades de Imagens-Índice e de Imagens-Proporção na detecção de alterações no volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp., submetida à prática de desbastes.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Florestas Implantadas

Uma floresta pode ser definida como sendo uma comunidade biológica de plantas e animais em complexa interação com o ambiente físico-químico ao seu redor, que inclui o solo e o clima (Young, 1982). Um conceito mais simples, porém que fornece uma idéia imediata de floresta foi citado por Hernandez Filho e Shimabukuro (1978), que definiram uma floresta como uma associação predominantemente de árvores, ocupando grandes extensões da superfície terrestre.

A importância das florestas está relacionada com os benefícios que proporcionam e com a influência no ambiente bio-físico-químico ao qual estão inseridas. Uma área de floresta oferece abrigo e proteção aos animais; fornece diversos produtos, como a madeira, alimentos, resinas e produtos medicinais e controlam as erosões e as inundações, protegendo os solos. Além disso, proporcionam bem-estar por sua beleza, pelo canto dos pássaros, pelas flores e seu colorido, sendo este benefício impossível de ser quantificado, mostrando-se úteis também para o paisagismo e como áreas de lazer (Simões *et al.*, 1981; Young, 1982). As florestas também regulam o escoamento de águas e protegem o solo contra temperaturas extremas e ação do vento (Rosales, 1967).

Quando manipuladas, as florestas influenciam o clima local, o solo sobre o qual se encontram e a vida animal a elas associada. Com relação ao clima, as florestas reduzem a velocidade dos ventos e a temperatura local (dentro e ao seu redor); a perda de água por evaporação é menor, preservando a umidade do solo e a taxa de transpiração é mais elevada, causando maiores níveis de precipitação. Os solos são influenciados em sua temperatura e em sua umidade, mostrando-se mais frios e úmidos quando recobertos por florestas, e em sua composição, sendo mais férteis devido às liteiras e ao húmus proveniente de elementos vegetais em decomposição. A remoção de áreas de floresta torna o ambiente mais vulnerável a erosões e a inundações, além de causar impacto sobre as espécies animais presentes (Taylor, 1969; Sharpe *et al.*, 1976).

O produto florestal mais importante do ponto de vista econômico é a **madeira**, da qual se obtém celulose, papel, carvão, compensados, laminados, lenhas, serragens, estacas, resinas e óleos, entre outros. A substituição da lenha e do carvão vegetal pelo carvão mineral, petróleo e seus derivados desacelerou um pouco o processo de devastação de grandes áreas de floresta. No entanto, o uso da madeira como matéria prima do papel e para construções civis, utensílios e móveis ainda

exigirá sua extração por muitos anos, apesar dos numerosos materiais alternativos, como metais, plástico, cimento e o papel reciclado (Rosales, 1967).

No Brasil, a crescente demanda de madeira e a extinção das matas de Araucaria angustifolia, resultou em uma necessidade de implantação de **florestas artificiais**, impulsionada pela lei dos incentivos fiscais, de 1967 (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978; Simões *et al.*, 1981). Estas florestas implantadas pelo Homem, caracterizam-se pela homogeneidade da vegetação (homóclita) em consequência do uso de plantas de uma única espécie, de igual idade (coetâneas) ou não (dissetâneas), geralmente alinhadas e plantadas em maciços para suprimento industrial (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978). A produção de madeira proveniente destas florestas tem por objetivo principal o suprimento das indústrias de celulose e papel e de carvão para indústria siderúrgica (Simões *et al.*, 1981).

A madeira comercial proveniente de florestas implantadas pertence a dois grupos, dependendo das espécies vegetais: as folhosas (Eucalyptus sp.) e as coníferas (Pinus sp.). A implantação de florestas de Pinus sp., visa suprir o mercado de matéria-prima de fibra longa, especialmente indicado para produção de celulose e papel (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978).

O gênero **Pinus** pertence à Divisão Spermatophyta, Subdivisão Gymnospermae, Ordem Coniferae, Família Pinaceae e possui mais de 100 espécies (Mirov, 1967). O nome conífera vem do formato do fruto e da árvore quando jovem, em forma de cone, na maioria das espécies. Uma característica comum a várias espécies é a capacidade de conservação de água em situações de estresse hídrico, que ocorrem em verões muito quentes, invernos secos e frios e a baixos níveis de precipitação, características das suas regiões de origem (Rushforth, 1987). O Pinus é um gênero resinoso, com madeira de boa qualidade e forte, apesar de leve, conferindo-lhe a denominação de **madeira mole** (“softwoods”) (Young, 1982), de fuste longo e ereto, copas relativamente pequenas e acículas verde escuras (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978). As florestas de Pinus sp. apresentam uma copa compacta, deixando passar pouca luz para subsistência de outras plantas localizadas no sub-bosque (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978) e são estáticas sob ponto de vista fenológico, não perdendo suas folhas e mantendo as acículas sempre verdes, diferente de florestas compostas por espécies de folhas largas, que podem apresentar variações sazonais (Young, 1982; Peterson e Running, 1989).

Uma floresta pode se desenvolver e produzir madeira naturalmente, sem a interferência do homem. No entanto, através da aplicação dos conhecimentos humanos, é possível a obtenção de produtos florestais em maior quantidade e em menor tempo (Stoddard, 1968). Este é o ponto central

da **silvicultura**, ramo da ciência florestal, que tem como objetivo principal criar condições adequadas para a exploração periódica ou anual de florestas implantadas em benefício humano (Veiga, 1976) ou ainda, uma ciência que visa o planejamento eficiente para obter uma floresta com os maiores benefícios possíveis, mantendo-a sem prejuízo para seu desenvolvimento normal, onde os produtos são obtidos a um menor custo e vendidos a um maior preço (Taylor, 1969; Simões *et al.*, 1981). Estas definições implicam na consideração da floresta como um todo, incluindo a vida animal, as águas e o controle de fogo, de insetos e de doenças, além das suas árvores constituintes (Young, 1982). A silvicultura requer o conhecimento das exigências e do comportamento das espécies florestais com relação ao ambiente, de sua habilidade em crescer em povoamentos mistos ou puros ou qualquer outra situação, donde se conclui que deve-se conhecer bem as espécies individualmente antes da prática da silvicultura (Taylor, 1969).

A silvicultura compreende as técnicas de **manejo florestal**, que consiste na condução racional e organizada de uma floresta para que a produção sustentada de madeira e de outros produtos sejam da melhor qualidade e de menor custo (Simões *et al.*, 1981). Uma função importante do manejo florestal é a manutenção e a proteção da floresta, não permitindo retiradas superiores ou inferiores à sua capacidade, o que causaria prejuízo ao seu desenvolvimento normal. Numa floresta adequadamente manejada, a fertilidade do solo e a produtividade florestal estão asseguradas. Estas florestas devem possuir classes de idade que ocupem uma mesma área, além de fornecer rendimentos anuais regulares (Taylor, 1969).

Dentre as técnicas de manejo florestal estão as aplicações de **desbastes** em plantios florestais, que são cortes parciais feitos em povoamentos imaturos para estimular o crescimento das árvores remanescentes e aumentar a produção de madeira utilizada. Nesta operação, removem-se as árvores excedentes, diminuindo a competição e concentrando o potencial produtivo do povoamento em um número limitado e selecionado de árvores. O principal objetivo do desbaste é estimular o crescimento em diâmetro das árvores remanescentes, em ritmo mais rápido que o natural (Taylor, 1969; Simões *et al.*, 1981; Boas *et al.*, 1986).

Há dois tipos de desbaste: sistemático e seletivo. O sistemático é aplicado em povoamentos muito uniformes, geralmente jovens, onde são retiradas linhas inteiras de plantação, sem seleção dos indivíduos. No seletivo, há escolha de indivíduos, de acordo com o propósito da produção, onde geralmente são retiradas as árvores dominadas ou as defeituosas (Simões *et al.*, 1981). Os desbastes seletivos são caros, sendo que muitas vezes são preferidos os sistemáticos (Boas *et al.*, 1986).

O princípio do desbaste considera que um povoamento jovem, recém plantado, tem à sua disposição nutrientes, luz, umidade e outros fatores em quantidade acima do necessário. O povoamento cresce e se desenvolve em resposta ao aproveitamento destes fatores, aumentando suas exigências em relação aos mesmos. A competição entre os indivíduos por água, nutrientes e luz atingirá um estágio onde as condições edafo-climáticas não poderão atender às exigências do povoamento, pois estas coincidem com sua disponibilidade máxima, não sendo suficientes para proporcionar o crescimento deste povoamento e o mesmo entrará em fase de estagnação, ou seja, baixas ou insignificantes taxas de crescimento. Neste momento deve ser realizado o primeiro desbaste, quando é então definida a área basal total ou média que representará os índices de estagnação, de produtividade e de aproveitamento (Rosales, 1967; Sharpe *et al.*, 1976; Veiga, 1976).

Na escolha da porcentagem de extração em um desbaste, leva-se em consideração o espaçamento, estado geral do talhão e a porcentagem de árvores com **Diâmetro à Altura do Peito** (DAP) abaixo da média do povoamento. Geralmente é retirado de 30 a 50% do povoamento, sendo que acima destes limites os desbastes são considerados **desbastes fortes**. O estado geral do talhão refere-se às condições da copa; vigor e sanidade; forma e qualidade do tronco, que revelam o valor comercial de seus indivíduos (Veiga, 1976; Simões *et al.*, 1981). Após a aplicação dos desbastes, são realizadas as medidas do volume de madeira retirada e do volume remanescente ou anterior ao desbaste, através de métodos que incluem o uso de equações para estimativas e/ou medidas em campo, a partir de amostragens aleatórias ou sistemáticas (Stoddard, 1968).

É possível concluir que as técnicas de manejo florestal conferem às florestas implantadas um dinamismo que se manifesta tanto na aparência geral da floresta, quanto no desenvolvimento de seus indivíduos. Vale salientar que estas florestas cobrem aproximadamente 40% da superfície terrestre, produzem anualmente 70% do carbono global e seus produtos são as principais mercadorias provenientes de recursos naturais, avaliadas em bilhões de dólares ao ano (Peterson e Running, 1989). Estas estatísticas mostram a importância da realização do monitoramento dos processos aos quais estão submetidas as florestas implantadas, o qual é passível de ser realizado mediante a aplicação de técnicas de SR (Hernandez Filho e Shimabukuro, 1978; Peterson e Running, 1989).

Atualmente há uma gama de sensores e metodologias que permitem a realização de diversos estudos da cobertura vegetal. Para estudar as florestas, dados orbitais, por exemplo, podem ser utilizados juntamente com aqueles provenientes de **Sistemas de Informações Geográficas** (SIG's), permitindo o acesso a outras informações ou suas inclusões em modelos. Por exemplo, mudanças

ocorridas em dosséis e detectadas pelos sensores servem como dados de entrada em modelos de sucessão vegetal (Peterson e Running, 1989).

No entanto, as florestas são alvos particularmente difíceis de serem estudados através da aplicação das técnicas de SR devido aos mais diversos fatores. Com relação às folhas, a dificuldade consiste na extensa variedade de tamanhos, cores e formatos, desde acículas verde escuras até folhas largas e verde claras. O substrato de uma floresta é outro fator influente, uma vez que pode ser constituído de rochas ou solos expostos, neve, grama, liteira, pequenas árvores, arbustos, sendo que essas feições possuem diferentes respostas e contribuem para o sinal refletido medido pelo sensor. A compreensão dos fatores que regulam o desenvolvimento de uma floresta e sua interação com a radiação solar é complicada pela sua larga distribuição geográfica. Florestas crescem e se desenvolvem desde os lugares mais quentes e úmidos até os mais frios e secos; desde o nível do mar até 4000 metros de altitude (Peterson e Running, 1989).

Deve ser ressaltado que alguns processos relativos às florestas não podem ser diretamente detectados via dados de SR, tais como as trocas de carbono realizadas durante a fotossíntese e a respiração, a evapotranspiração, a emissão de gases e o crescimento. Porém, o IAF, importante parâmetro biofísico do dossel e passível de ser estimado através de SR, pode ser utilizado em modelos (FOREST-BGC, por exemplo) para a estimativa de processos como a evapotranspiração e a fotossíntese (Peterson e Running, 1989; Running *et al.*, 1989; Roughgarden *et al.*, 1991), além de permitir uma análise quantitativa e uma descrição qualitativa das trocas entre energia e biomassa de um ecossistema (Gong *et al.*, 1992).

2.2 - Comportamento Espectral de Alvos

O SR é uma técnica de obtenção de informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos a distância, por instrumentos que não estão em contato com o objeto, área ou fenômeno em estudo (Landgrebe, 1978; Lillesand e Kiefer, 1987; Asrar, 1989; Roughgarden *et al.*, 1991). Estes instrumentos são sensores, que podem estar a bordo de satélites localizados em órbita da terra e são utilizados para gravar variações na REM refletida e/ou emitida pelos objetos de interesse localizados na superfície da Terra.

O estudo dos recursos naturais utilizando dados de SR envolve duas etapas: a aquisição dos dados e sua análise. Os elementos envolvidos na etapa de aquisição são: a fonte de REM, a atmosfera, o alvo e o sensor. Em sensores passivos (atualmente os de principal uso em SR dos recursos naturais) a principal fonte de REM é o Sol. A energia radiante proveniente do Sol é

propagada através da atmosfera, sofrendo modificações em sua intensidade e distribuição espectral (Szekielda, 1988). Ao atingir a superfície terrestre, a REM interage com as feições dessa superfície, podendo ocorrer três processos: absorção, reflexão e transmissão (Lillesand e Kiefer, 1987; Szekiolda, 1988). A fração de REM refletida e/ou emitida pela feição terrestre atravessará novamente a atmosfera, sofrendo novas modificações e atingirá o sensor localizado em órbita terrestre (Lillesand e Kiefer, 1987).

A etapa de análise dos dados pode ser realizada segundo dois procedimentos básicos, com a finalidade de extrair informações: **digitalmente**, através de computadores, quando os dados estão dispostos na forma digital, ou **visualmente**, quando os dados estão dispostos na forma de produtos analógicos, como os fotográficos (Richards, 1986; Lillesand e Kiefer, 1987). A escolha de um destes procedimentos envolve a disponibilidade de equipamentos e de conhecimento técnico por parte dos profissionais responsáveis, bem como da própria natureza do trabalho a ser executado. Ambos os procedimentos fundamentam-se no reconhecimento de padrões, que viabiliza a identificação de objetos, inicialmente de natureza desconhecida na imagem, individualizando-os em categorias ou classes. Estes objetos formam grupos de alvos, com assinaturas espectrais semelhantes e que podem servir de padrão de comparação para a identificação de outros alvos desconhecidos (Szekielda, 1988).

Implícitos às técnicas de SR estão três domínios fundamentais: o espacial, o espectral e o temporal. Estes domínios manifestam-se através das chamadas resoluções, que são definidas pelo tipo de sensor utilizado. Assim, podem ser definidas a resolução **espacial**, referente às dimensões e às formas dos alvos e à capacidade dos sensores de detectar estas características; resolução **espectral**, referente às propriedades espectrais dos alvos terrestres e às regiões do **Espectro EletroMagnético** (EEM) exploradas pelos sensores para detecção destas propriedades e a resolução **temporal**, referente à detecção de alterações sazonais e/ou antrópicas, no intervalo de tempo compreendido entre duas coletas de dados (Ponzoni, 1993).

A utilização de dados de sensores remotos requer o conhecimento e a compreensão das características espectrais das várias feições terrestres e dos fatores que influenciam estas características (Hoffer, 1978). Esta compreensão da interação energia/matéria pode ser elementar para alguns materiais e inexistente para outros, lembrando que a caracterização espectral de um objeto depende não só da composição do alvo, mas das condições em que é efetuada (Lillesand e Kiefer, 1987). Com o objetivo de iniciar o assunto a ser tratado neste Item, serão rapidamente discutidos alguns conceitos físicos e radiométricos.

2.2.1 - Princípios Físicos

A energia radiante incidente na superfície terrestre interage com as feições terrestres e esta interação energia/matéria pode ser expressa pelas três propriedades radiométricas dos objetos: **absortância** ou coeficiente de absorção (α), **reflectância** ou coeficiente de reflexão (ρ) e **transmitância** ou coeficiente de transmissão (τ). Estas propriedades são definidas como sendo as frações da energia incidente que são absorvida, refletida e transmitida por um objeto, respectivamente. Pelo princípio da conservação de energia, a inter-relação entre a energia incidente e suas frações pode ser expressa pela equação:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (2.1)$$

As proporções dessas frações variam de uma feição para outra, dependendo do seu material, condições e comprimento de onda, permitindo a distinção das diferentes feições terrestres (Lillesand e Kiefer, 1987). No entanto, a propriedade mais importante e explorada nos estudos de SR, com enfoque nos recursos naturais, ainda é a reflectância (Lillesand e Kiefer, 1987; Ponzoni, 1993), devido aos sensores operarem em regiões onde a energia refletida predomina (0,4 a 3 μm).

A **reflectância espectral** pode ser definida como sendo a porção de energia incidente que é refletida por um objeto (Lillesand e Kiefer, 1987). Seu cálculo é realizado através da razão entre a intensidade do fluxo radiante refletido pelo objeto e a intensidade do fluxo radiante que atinge este objeto, provindo da fonte de REM. A **radiância espectral**, em $\text{w}/\text{sr m}^2 \mu\text{m}$, é dada pela equação:

$$L_{\lambda} = \tau_{\lambda} \cdot \left(\frac{\rho_{\lambda} \cdot E_{\lambda}}{\pi} \right) + L_{atm \lambda} \quad (2.2)$$

onde τ_{λ} e $L_{atm \lambda}$ são, respectivamente, a transmitância e a radiância espectrais da atmosfera e ρ_{λ} e E_{λ} são a reflectância espectral da superfície e a irradiância espectral (Steffen *et al.*, 1996).

A radiância espectral é portanto, a intensidade do fluxo radiante refletido por uma superfície, numa dada direção, dentro do campo de visada do sensor (“Field Of View” - FOV), que corresponde à abertura do coletor, expressa em radianos, e define uma área na superfície do terreno (“Instantaneous Field Of View”-IFOV), correspondente a um pixel da imagem, para o caso dos sensores eletro-ópticos imageadores (Slater, 1980). A partir da radiância espectral de uma superfície é possível calcular o **Fator de Reflectância Bidirecional (FRB)**, que é definido com sendo a razão

entre a sua radiância espectral e a radiância espectral de uma superfície lambertiana (geralmente uma placa de referência de MgO ou BaSO₄), nas mesmas condições de iluminação e visada (Milton, 1987). As medidas realizadas em campo ou em laboratório são preferenciais para a obtenção do fator de reflectância por diminuir o número de elementos interferentes, como por exemplo, a atmosfera. Nestes casos é utilizado um espectrorradiômetro, que mede a radiância espectral refletida pelo objeto de interesse em pequenos intervalos do EEM e fornece os dados de saída na forma de dígitos ou de gráficos. O procedimento ideal para obtenção da reflectância de um alvo é a **Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB)**, que consta da medida da reflectância bidirecional em todos os ângulos possíveis dentro de um hemisfério. No entanto, é inviável a realização desta medida, pois para cada ângulo sólido ($\Delta\omega = 1^0$), por exemplo, são necessárias 4×10^8 medidas. Recorre-se, então, ao cálculo do **FRB** (Milton, 1987). Em condições de campo, os termos referentes à atmosfera são desconsiderados e o FRB é obtido pela seguinte equação:

$$FRB = \frac{L_{\lambda_{alvo}}}{L_{\lambda_{ref}}} = \frac{\frac{\rho_{\lambda} \cdot E_{\lambda}}{\pi}}{\frac{\rho_{\lambda} \cdot E_{\lambda}}{\pi}} \quad (2.3)$$

Uma vez que π é uma constante e que as condições de iluminação e de visada (E_{λ}) são as mesmas, ambos os termos podem ser anulados da equação. Tem-se, então, que $FRB = \rho_{\lambda_{alvo}}/\rho_{\lambda_{referência}}$. Como a reflectância de uma superfície de referência (isotrópica) é aproximadamente igual a um (1), conclui-se que o FRB é equivalente à reflectância do alvo.

No caso dos sensores orbitais, a radiância espectral refletida pela superfície é detectada e transformada em um sinal elétrico, o qual é armazenado e transmitido à distância. Como produto, obtém-se uma imagem digital, onde cada pixel possui um valor discreto de brilho, de 0 a 255, o qual é função da radiância espectral média proveniente de uma dada área no terreno (Novo, 1989). Neste caso, deve ser realizada uma transformação radiométrica de modo que os valores de brilho sejam convertidos em valores físicos, como radiância ou reflectância, a qual será discutida com mais detalhes adiante.

De qualquer forma, a otimização da utilização destes valores convertidos somente é atingida através do conhecimento do processo de interação entre a REM e o objeto em estudo. Esse conhecimento somente é atingido através do estudo do Comportamento Espectral de Alvos, que inclui o estudo das propriedades bio-físico-químicas e das propriedades espectrais dos objetos. Será

apresentada a seguir uma breve discussão sobre os principais aspectos dos comportamentos espectrais dos principais recursos naturais, com maior ênfase à vegetação, tema do presente trabalho.

2.2.2 - Vegetação

Nos estudos de vegetação, um dos principais objetivos é o monitoramento das condições fisionômicas, fisiológicas e das mudanças ocorridas numa área ocupada por cobertura vegetal (Jackson e Huete, 1991), as quais se expressam por alterações no processo de interação energia/matéria explicado anteriormente. Nestes estudos, as propriedades espectrais de folhas e de dosséis têm sido amplamente demonstradas e discutidas, não sendo necessária, portanto, uma nova revisão sobre o assunto, a qual pode ser encontrada completa e com detalhes nos trabalhos de Kumar (1972) e Goel (1988), entre outros.

A Figura 2.1 apresenta a curva de reflectância de uma folha verde sadia, seus fatores influentes e as bandas de absorção de REM.

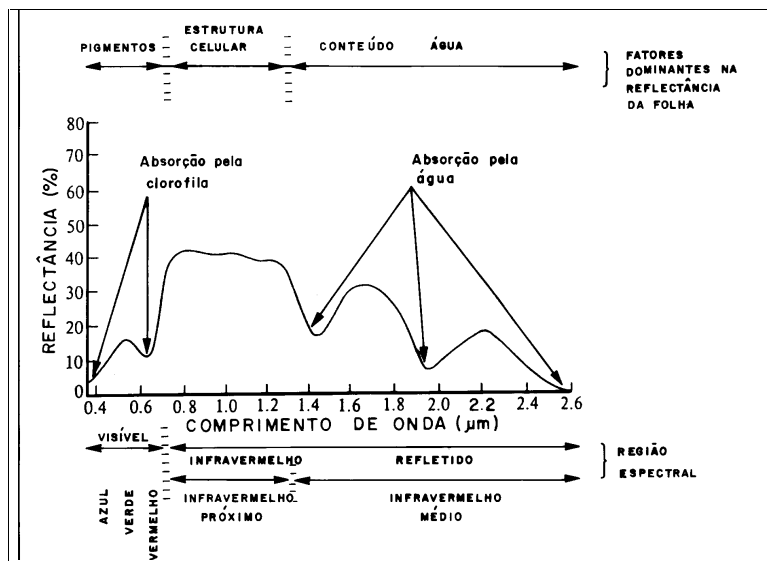


Figura 2.1 - Curva de reflectância típica de uma folha verde e sadia.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p.232.

No intervalo do EEM de 0,4 a 0,7μm, correspondente à região do visível, a reflectância espectral das folhas é dominada pela ação dos pigmentos fotossintetizantes (Kumar, 1972; Hoffer, 1978; Richards, 1986; Szekiolda, 1988). Os pigmentos fotossintetizantes mais encontrados nas plantas são as clorofilas (verdes), os carotenos (amarelos), as xantofilas (amarelos) e as antocianinas (vermelhos), sendo que as concentrações destes pigmentos podem variar de planta para planta e de espécie para espécie (Kumar, 1972; Hoffer, 1978). A Figura 2.2 mostra as alterações

na curva de reflectância de uma folha na ausência e na presença de alguns destes pigmentos e a Figura 2.3 mostra as curvas de uma folha verde e uma vermelha.

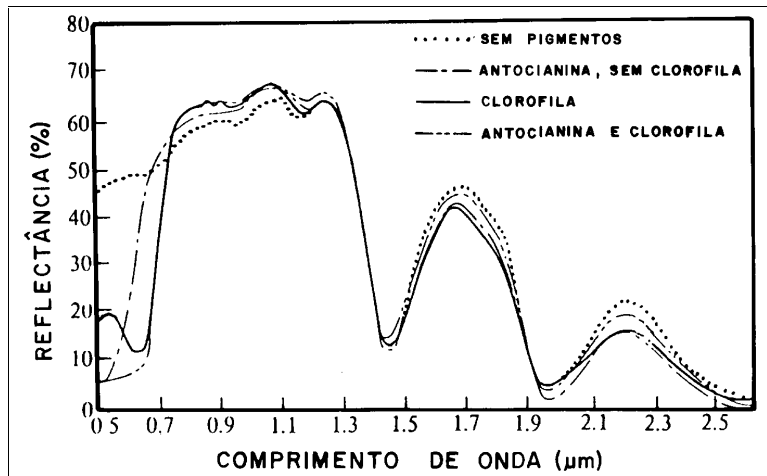


Fig. 2.2 - Efeito de diferentes pigmentos na curva de reflectância de uma folha.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p.234.

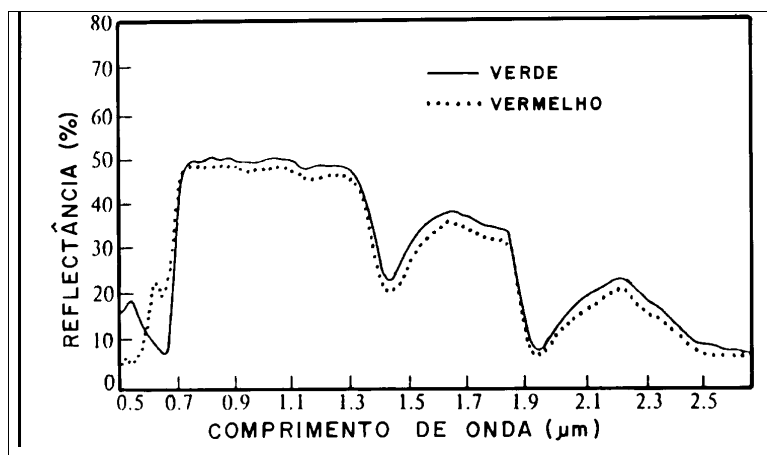


Fig. 2.3 - Curvas de reflectância de uma folha verde e de uma folha vermelha.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p.234.

Na região do azul, há absorção de REM por todos os pigmentos, ocasionando valores muito baixos de reflectância nesta faixa espectral. Uma absorção menor na região do verde ocasiona um pico de reflectância em $0,55\mu\text{m}$, responsável pela coloração esverdeada da maioria das folhas. A região do vermelho, correspondente à de máxima absorção ($0,67$ a $0,68\mu\text{m}$), apenas a clorofila absorve REM (Kumar, 1972; Hoffer, 1978; Richards, 1986; Szekiolda, 1988). Geralmente os carotenos e as xantofilas são mascarados pela clorofila, mas durante o processo de senescência, os pigmentos amarelos tornam-se dominantes com o desaparecimento da clorofila, proporcionando uma coloração amarelada às folhas. Em situações de estresse, ocorre um processo semelhante, no

qual a diminuição na produção da clorofila diminui a absorção de REM por este pigmento, principalmente no vermelho, acarretando um aumento da reflectância nesta região. Valores mais altos na região do vermelho juntamente com os valores normalmente mais altos na região do verde, resulta na cor amarela das folhas em situações de estresse (Hoffer, 1978).

No intervalo entre 0,7 e 1,3 μm , correspondente à região do infravermelho próximo, a reflectância espectral da vegetação é dominada pela complexa estrutura interna da folha, sendo pouco afetada pelos pigmentos e pelo conteúdo de água (Kumar, 1972; Hoffer, 1978; Richards, 1986; Szekiêda, 1988). Na curva típica de reflectância de uma folha verde e sadia (Figura 2.1) observa-se nesta região um platô com altos níveis de reflectância (45-50%), devido ao espalhamento da REM pela estrutura interna, e baixíssimos níveis de absorção (menos de 5%) (Kumar, 1972; Hoffer, 1978). Folhas com parênquima lacunoso mais compacto, como as do milho, espalham menos a REM incidente que folhas de soja, cujo parênquima possui mais espaços intercelulares. Assim, folhas de milho apresentam menores valores de reflectância que as de soja nesta região espectral (Hoffer, 1978). Apesar dos níveis de reflectância no infravermelho próximo serem altos para a vegetação em geral, há variações de espécie para espécie (Szekiêda, 1988). Por exemplo, as coníferas em geral possuem resposta mais baixa nesta região que as decíduas (entre 20 e 30%) (Figura 2.4) (Lillesand e Kiefer, 1987).

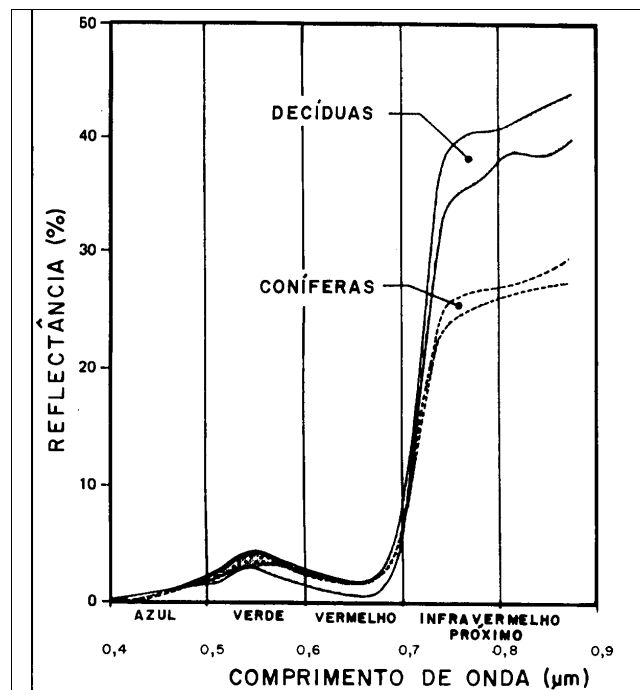


Fig. 2.4 - Curvas de reflectância de coníferas e de decíduas.

FONTE: Adaptada de Lillesand e Kiefer (1987), p.15.

Finalmente, no intervalo entre 1,3 e 2,6 μm , correspondente à região do infravermelho médio, a reflectância espectral das folhas é dominada por uma forte absorção pela água, principalmente nas chamadas bandas de absorção, em 1,4 μm , 1,9 μm e 2,7 μm (Kumar, 1972; Hoffer, 1978; Richards, 1986; Szekiolda, 1988). Os picos de reflectância ocorrem em 1,6 μm e 2,2 μm , entre as bandas de absorção. Quando o conteúdo de água na folha diminui, a reflectância nesta região aumenta. Mudanças no formato típico da curva da vegetação começam a ocorrer apenas quando o conteúdo de água é menor que 50% (Figura 2.5) (Hoffer, 1978).

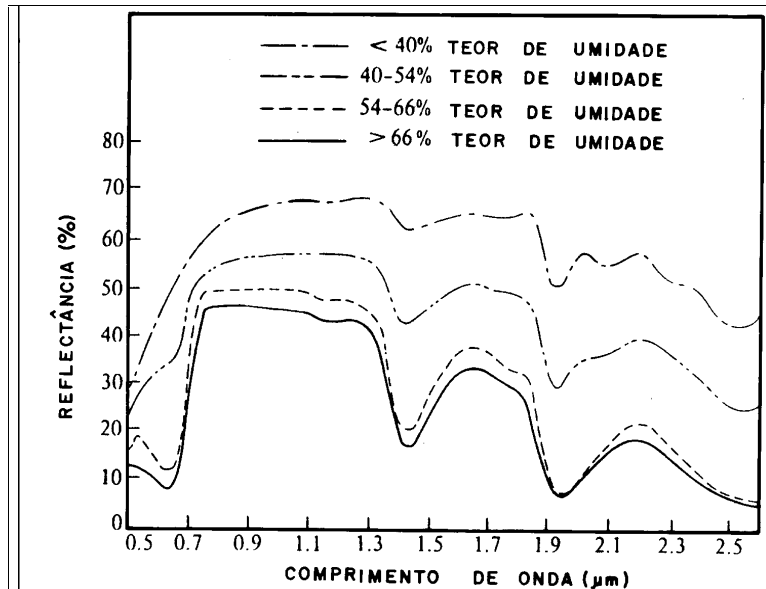


Fig. 2.5 - Efeito do teor de umidade na curva de reflectância de uma folha.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p. 239.

Existem duas abordagens possíveis para o estudo da vegetação, a partir de dados radiométricos: de **folhas isoladas** e de **dosséis**. Pelo fato da folha ser o principal componente dentro do dossel, sob ponto de vista do processo de interação mencionado, algumas considerações para folhas também são válidas para os dosséis. Silva e Ponzoni (1995) apresentaram algumas considerações sobre a comparação entre a reflectância espectral de folhas isoladas e a reflectância espectral de dosséis. De um modo geral, a reflectância espectral de folhas isoladas é superior àquela dos dosséis dos quais estas fazem parte. Os autores atribuíram este fato à presença de sombras no interior do dossel. Já Szekiolda (1988) mencionou que a reflectância de um dossel é maior no infravermelho próximo que de uma folha isolada, devido ao efeito aditivo da reflectância e transmitância entre as folhas. De fato, estes resultados aparentemente controversos revelam a complexidade do processo de interação entre a REM e a vegetação, no qual cada caso deve ser estudado isolada e cuidadosamente. Segundo Kumar (1972), as variações na reflectância de um dossel dependerão da quantidade de folhas dentro do mesmo, de suas orientações espaciais e da

própria arquitetura do dossel, das condições geométricas de iluminação e de visada e das características espectrais dos elementos que o compõe.

No estudo do comportamento espectral de dosséis são exploradas principalmente as relações entre alguns parâmetros biofísicos e a reflectância espectral. Dentre os parâmetros biofísicos mais explorados estão o IAF e a biomassa, expressa por peso seco de material vegetal ou por volume de material lenhoso. Detalhes sobre estas relações serão apresentados posteriormente.

2.2.3 - Solos

As curvas de reflectância espectral dos solos são menos complexas que as da vegetação, em termos de aparência, e a característica mais marcante são os valores crescentes de reflectância com o aumento do comprimento de onda. O solo é uma mistura complexa de materiais, com várias características físico-químicas, que afetam suas características espectrais. Diferentes tipos de solos possuem suas curvas típicas com formatos semelhantes, mas com diferenças na amplitude, devido às suas propriedades, tais como: conteúdo de água, quantidade de matéria orgânica e de óxido de ferro, granulometria e textura (Hoffer, 1978; Lillesand e Kiefer, 1987). Estes fatores são muito variáveis e estão bastante interrelacionados, tornando sua interpretação complexa (Lillesand e Kiefer, 1987).

A textura do solo e, conseqüentemente, sua nomenclatura são determinados pelas proporções de argila, silte e areia presentes nos mesmos. Os solos argilosos são compostos por partículas muito pequenas, fato que os torna mais compactos, resultando em poucos espaços livres. Já nos solos arenosos, onde as partículas são maiores, ocorrem grandes espaços de ar entre as mesmas, permitindo um maior movimento de ar ou de água. A água presente no solo encontra-se localizada nestes espaços entre as partículas e também recobrimdo, com uma fina camada, cada uma delas. Nos solos argilosos, pelos espaços serem menores, a água não é drenada, nem evaporada tão rapidamente quanto nos arenosos. Esta relação entre conteúdo de água e tamanho das partículas têm influência na resposta espectral dos solos. Assim, quanto maior o conteúdo de água, menor a reflectância, principalmente nas bandas de absorção pela água, e quanto mais fina a textura, maior reflectância (Lillesand e Kiefer, 1987).

A curva de solo apresenta poucas bandas de absorção (Lillesand e Kiefer, 1987), sendo três de absorção pela água em $1,4\mu\text{m}$, $1,9\mu\text{m}$ e $2,7\mu\text{m}$ (as mesmas da vegetação), quase invisíveis em solos secos, e duas bandas de absorção por hidroxilas em $1,4\mu\text{m}$ e $2,2\mu\text{m}$, presentes nos solos argilosos (Richards, 1986). Os solos arenosos, quando secos, não apresentam bandas de absorção de

água. No entanto, quando úmidos, apresentam todas as citadas inicialmente. Já as curvas dos solos argilosos e silteosos mostram que, mesmo quando estão muito secos, possuem todas as bandas de absorção de água, devido ao pequeno tamanho de suas partículas. Ou seja, estas bandas sofrem menos alterações com a variação do conteúdo de água, quanto mais argilosos forem os solos (Figura 2.6) (Lillesand e Kiefer, 1987).

Na porção do visível, o aumento da quantidade de água proporciona uma diminuição na reflectância, que explica o fato dos solos escurecerem ao serem molhados. Nas regiões do infravermelho próximo e médio, conforme explicação do parágrafo anterior, a diminuição da reflectância com o aumento do conteúdo de água deve-se às bandas de absorção (Lillesand e Kiefer, 1987).

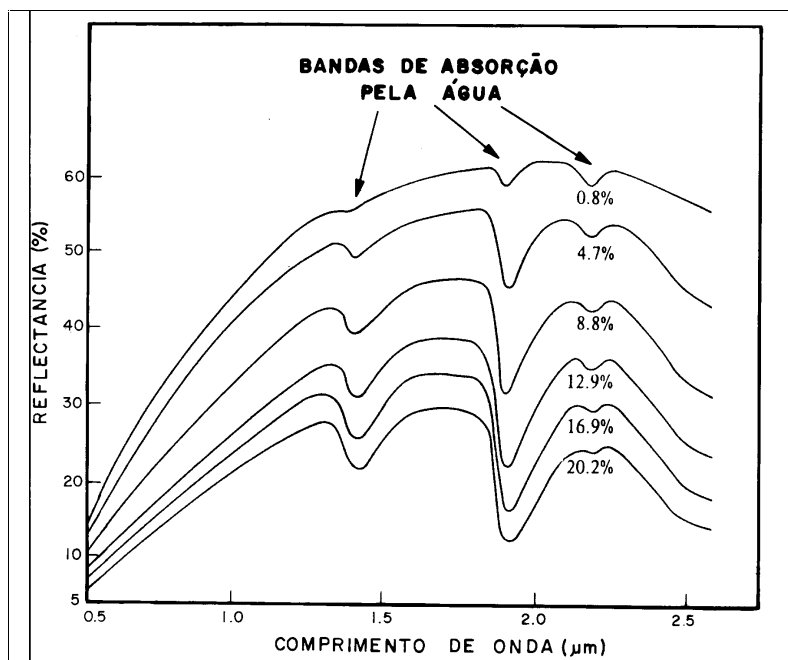


Fig. 2.6 - Efeito do teor de umidade na curva de reflectância de um solo silteoso.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p. 247.

A matéria orgânica é outro fator influente na reflectância dos solos e seu nível indica a forma e a quantidade de nitrogênio existente, informação importante para os agricultores. Os níveis de matéria orgânica podem variar de 0,5 a 5%, sendo que seu aumento proporciona uma coloração marrom mais escura, resultando em uma diminuição nos valores de reflectância na região do visível. A presença de óxido de ferro geralmente está relacionada com a coloração vermelha de alguns solos e seu aumento causa uma diminuição da reflectância no visível (Hoffer, 1978).

No entanto, todos estes fatores estão fortemente correlacionados, podendo dificultar a interpretação dos dados. Por exemplo, a relação matéria orgânica/reflectância existe quando os níveis de matéria orgânica estão acima de 1,5%. Abaixo desta porcentagem, há forte influência do óxido de ferro. Acima de 1,5%, dois solos com a mesma quantidade de matéria orgânica terão a mesma reflectância, se as concentrações de silte forem iguais. Do contrário, o solo com mais silte terá maior reflectância (Hoffer, 1978).

2.2.4 - Água

Assim como o solo, a curva de reflectância da água é mais simples que a de vegetação, apesar de seu comportamento espectral também envolver complexas interações energia/matéria. A reflectância espectral da água é influenciada pela ondulação de sua superfície, pelo material em suspensão e do fundo e pela concentração de clorofila (Hoffer, 1978; Lillesand e Kiefer, 1987).

A identificação de corpos d'água a partir de dados de SR pode ser realizada mais facilmente nas regiões do infravermelho próximo e do infravermelho médio, uma vez que a água absorve a REM incidente nestes intervalos do EEM, resultando em valores quase nulos de reflectância (Hoffer, 1978; Richards, 1986; Lillesand e Kiefer, 1987). Este fato contribui significativamente para a sua diferenciação dos solos e da vegetação, que possuem altos valores de reflectância nestas regiões do EEM.

Na região do EEM correspondente ao visível, o comportamento espectral da água é mais complexo. Os valores de reflectância são baixos (menos de 10%) e são influenciados pelos fatores citados anteriormente (Richards, 1986). Quanto mais turva for a água, em decorrência da presença de materiais em suspensão, maiores serão seus valores de reflectância (Figura 2.7) (Hoffer, 1978). Já o aumento na concentração de clorofila diminui a reflectância na região do azul e aumenta na região do verde, podendo-se monitorar a presença e estimar a concentração de algas. Esta informação é importante por indicar a produção primária do corpo d'água em questão e seu nível de eutrofização (Hoffer, 1978; Lillesand e Kiefer, 1987).

Os níveis de absorção na região do visível também são baixos, sendo que a transmitância predomina, principalmente nas regiões do azul e do verde. A absorção e a transmissão não são função apenas da água em si, mas dos tipos e dos tamanhos dos materiais existentes. Abaixo de 0,6 μm , a água limpa possui baixa absorção, baixo espalhamento e alta transmitância. Quanto mais turva for a água, menores serão os valores de transmitância (Hoffer, 1978).

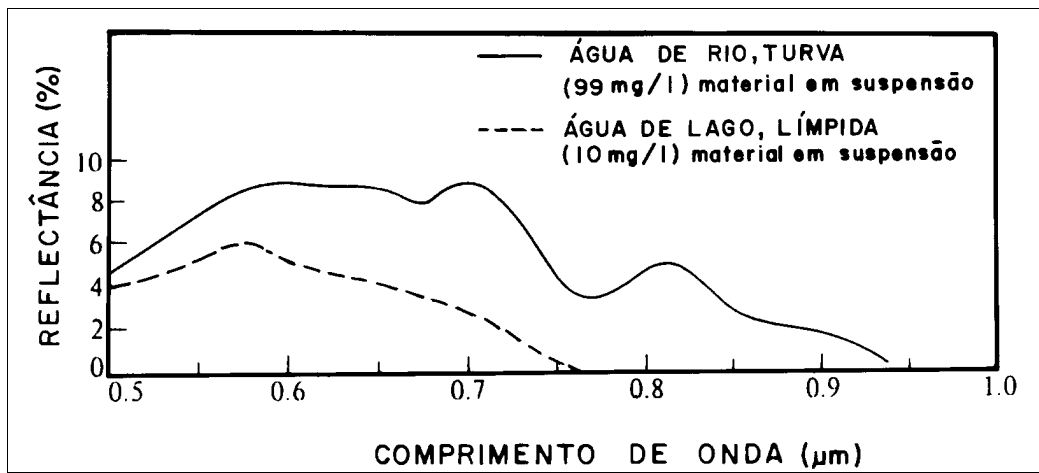


Fig. 2.7 - Curvas de reflectância de uma água turva e de uma água límpida.

FONTE: Adaptada de Swain e Davis (1978), p. 257.

Vale ressaltar que algumas características importantes da água não podem ser observadas a partir de alterações nos seus valores de reflectância, como o pH e a concentração de sal e de oxigênio dissolvido (Lillesand e Kiefer, 1987).

O gráfico da Figura 2.8 mostra as três curvas típicas de reflectância destas feições básicas da superfície terrestre: vegetação verde e saudável, solo seco e descoberto e água límpida. As curvas são bastante diferentes, podendo-se observar regiões do EEM nas quais estes três alvos apresentam respostas bastante diferentes, de acordo com suas diferentes interações com a REM, o que permite sua diferenciação (Richards, 1986). No entanto, não é necessário que o sensor colete dados continuamente ao longo de todo o EEM. Podem ser selecionadas bandas mais representativas para a distinção de diferentes alvos, através das propriedades espectrais descritas acima, as quais estão relacionadas com suas composições (Szekiela, 1988).

As curvas típicas, também chamadas assinaturas espectrais, são importantes para mostrar os pontos fundamentais a serem estudados nas propriedades de reflectância de um determinado alvo. Diferentemente, as curvas de reflectância obtidas através de instrumentos de SR indicam as condições do alvo no momento da medida, podendo variar para cima ou para baixo da curva média típica. As curvas espectrais possuem um papel central na detecção, identificação e análise dos materiais terrestres (Lillesand e Kiefer, 1987).

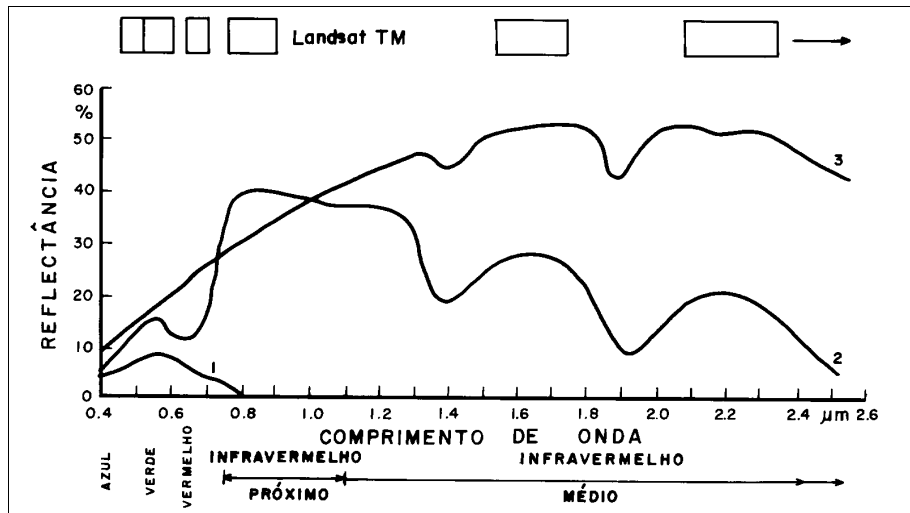


Fig. 2.8 - Assinaturas espectrais da água¹, da vegetação² e do solo³.

FONTE: Adaptada de Richards (1986), p.3.

2.3 - Estimativa de Parâmetros Biofísicos (IAF e Biomassa) Através de Técnicas de SR

Diversos estudos envolvendo as técnicas de SR visam estimar a quantidade de vegetação presente em uma determinada área. Esta quantidade de vegetação pode ser expressa por porcentagem de cobertura (através de fotografias aéreas), pela biomassa foliar (coleta e pesagem de material verde por unidade de área) ou pelo IAF (Lo, 1986). O IAF é um importante parâmetro biofísico da vegetação, que caracteriza a arquitetura do dossel e é definido como sendo a área foliar total projetada por unidade de área de terreno (m^2/m^2), ou seja, é uma grandeza adimensional (Pierce e Running, 1988; Daughtry, 1990; Gower e Norman, 1991; Curran *et al.*, 1992).

Sua relação com a biomassa foliar (Goel, 1989) explica a diversidade de estudos em SR envolvendo estimativas de IAF, as quais permitem uma avaliação das condições fisionômicas e fisiológicas dos dosséis (Asrar *et al.*, 1989) e uma análise quantitativa e qualitativa das trocas energia/matéria ocorridas em dosséis (Pierce e Running, 1988; Gower e Norman, 1991; Curran *et al.*, 1992; Gong *et al.*, 1992). Além disso, o IAF está relacionado com produção primária (Pierce e Running, 1988), com absorção de radiação fotossinteticamente ativa (Fuchs *et al.*, 1984; Baret e Guyot, 1991), com os processos de fotossíntese, evapotranspiração e crescimento (Weiser *et al.*, 1986; Asrar *et al.*, 1989; Goel, 1989) e com DAP e área de câmbio vascular (Marshall e Waring, 1986; Campbell e Norman, 1989; Chen *et al.*, 1991; Gower e Norman, 1991; Lang *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1991). Devido a estas relações, diversos trabalhos têm focado as estimativas de IAF para plantios agrícolas, visando uma melhor compreensão e o aprimoramento das técnicas existentes para o

acompanhamento do crescimento destes plantios e de sua produtividade (Daughtry e Hollinger, 1984; Fuchs *et al.*, 1984; Asrar *et al.*, 1985; Weiser *et al.*, 1986; Asrar *et al.*, 1989; Friedl *et al.*, 1994).

Estimativas estatísticas de parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa foliar e volume de madeira, consistem em um importante uso do SR (Peterson e Running, 1989). Os estudos envolvendo estimativas de volume de madeira via SR e sua correlação com IAF são escassos, restringindo-se muitas vezes a correlações entre volume e as bandas espectrais do sensor TM/Landsat (Ardö, 1992; Olsson, 1994; Gemmel, 1995; Nilson e Olsson, 1995).

Para estudar variações na reflectância de dosséis decorrentes de variações no volume de madeira, são considerados dados de desbastes ou analisadas imagens orbitais próximas à época de realização desta técnica de manejo florestal. Nos desbastes normalmente é retirado de 20 a 50% do talhão florestal (Olsson, 1994), proporcionando uma alteração de biomassa, a princípio, passível de detecção pelos sensores orbitais. Os trabalhos existentes sobre este tema mostram que as correlações entre volume de madeira em florestas de coníferas e as bandas TM/Landsat são altas e negativas, sendo que a banda TM 5 tem se mostrado a mais sensível à variação do volume de madeira (Ardö, 1992; Olsson, 1994; Gemmel, 1995; Nilson e Olsson, 1995). Considerando-se os talhões em grupos de acordo com o volume, até 150 m³/ha e entre 150 e 300 m³/ha, é possível observar que o grupo com menor volume de madeira apresentou maiores correlações em relação ao outro grupo de maior volume (Ardö, 1992; Gemmel, 1995).

Israelsson *et al.* (1994) estudou o potencial do SAR (“Synthetic Aperture Radar”) na estimativa de volume de madeira em áreas de floresta e concluiu que a sensibilidade deste sensor para detectar aumentos no volume de madeira aumenta com o aumento do comprimento de onda, sendo maior na banda P.

O IAF pode ser determinado através de métodos diretos ou indiretos e a escolha do método a ser utilizado deve considerar fatores como as características morfológicas dos elementos a serem medidos, a acurácia exigida, a quantidade de material amostrado, o tempo, material e recursos disponíveis (Daughtry, 1990).

Os **métodos diretos** consistem na obtenção da área foliar diretamente a partir da folha, sendo mais demorados e trabalhosos. Assim, sua aplicação pode ser dificultada dependendo da natureza do trabalho, da área abrangida e do tipo da vegetação em estudo, além de necessitarem de análises estatísticas para avaliar a técnica de amostragem adotada e o nível de precisão das medidas.

No entanto, são os melhores na determinação de parâmetros biofísicos por garantirem uma alta acurácia, sendo geralmente utilizados para calibração de outros métodos (Goel e Norman, 1990).

Com o aprimoramento das técnicas de SR, surgiram os chamados **métodos indiretos**, nos quais o IAF (entre outros parâmetros) é estimado indiretamente a partir de dados de REM interceptada e não interceptada pela vegetação (em campo) ou a partir de valores de radiância (imagens orbitais), de maneira não destrutiva. Os métodos indiretos são mais rápidos, práticos e eficientes, otimizando operacionalmente a estimativa do IAF, reduzindo o tempo e a dificuldade inerentes aos métodos diretos, vindo a ser uma alternativa, uma vez que estes são trabalhosos para dosséis pequenos e inviáveis para dosséis maiores. No entanto, a acurácia nem sempre é satisfatória, além de geralmente necessitarem de uma aparelhagem especial, pois a estimativa dos parâmetros é realizada a partir de medidas radiométricas, aumentando seu custo. Com o uso dos instrumentos adequados, estes valores radiométricos medidos podem ser introduzidos em modelos que fornecem os parâmetros desejados (IAF e **Distribuição Angular de Folhas-DAF**¹, por exemplo). Em campo, o princípio dos métodos indiretos é basicamente o mesmo, variando as metodologias e os instrumentos utilizados, onde medidas radiométricas fornecem dados de clareira do dossel (região da copa não fechada pela folhagem, permitindo uma passagem direta da luz solar, em determinada direção) ou seja, de REM não interceptada pela vegetação, que são inseridos em modelos adequados, os quais invertidos podem estimar o IAF (Welles, 1990).

Dentre os métodos indiretos para estimativa do IAF em campo, existe o baseado na **fotografia hemisférica**, também conhecida como olho-de-peixe (“Fisheye”), descrita detalhadamente por Rich (1990) e o que utiliza o **LAI-2000 “Plant Canopy Analyzer”**. Estes métodos possuem alguns aspectos em comum, como o uso de lentes hemisféricas, do tipo olho-de-peixe; a obtenção de medidas abaixo e acima do dossel e a necessidade de iluminação difusa para coleta dos dados.

A fotografia hemisférica permite quantificar a penetração da radiação solar no dossel através de suas clareiras e assim estimar o IAF, utilizando modelos relativamente simples. Tem sido utilizada para monitorar a dinâmica do dossel, verificar a formação e o fechamento de dosséis ao longo do tempo, monitorar mudanças sazonais nas densidades da folhagem, entre outros (Rich, 1990).

¹ “DAF é definida por uma função densidade de distribuição $f(\theta_1, \psi_1)$, onde θ_1 e ψ_1 são os ângulos de inclinação e azimutal da folha, respectivamente.” A DAF caracteriza o dossel em planófilo, erectófilo, extremófilo, plagiófilo, uniforme e esférico (Ponzoni, 1993).

Entretanto, o LAI-2000 tem sido o instrumento mais usual nas estimativas indiretas de IAF em campo (Gower e Norman, 1991; Gong *et al.*, 1992). O LAI-2000 é um instrumento que fornece alguns parâmetros biofísicos dos dosséis, como o IAF, a DAF e clareiras do dossel (“GAP”), através de medidas radiométricas, de modo rápido e não destrutivo. É constituído por duas unidades: o sensor óptico (LAI-2050) e a unidade de controle (LAI-2070). No sensor óptico, uma lente projeta a radiação no interior do instrumento, sendo depois refletida por um espelho na direção dos detetores de silício, arranjados em forma de anéis concêntricos. Deste modo, a radiação incide em cada um dos anéis em cinco ângulos zenitais diferentes (7° , 23° , 38° , 53° e 68°), obtendo-se uma medida quantitativa da radiação penetrante no dossel, não sendo necessária a coleta de dados em vários horários do dia. As distâncias entre cada anel e o topo do dossel são fornecidas pelo LAI-2000. A unidade de controle possui um microcomputador interno, que coleta as medidas e realiza os cálculos de IAF, com uma memória de 16 Kb para trabalho e uma memória RAM de 64 Kb para armazenamento de dados. Esta unidade permite ainda o uso de dois sensores ópticos. Os dados podem ser visualizados no visor ou serem impressos utilizando um aplicativo que acompanha o instrumento e permite transferir os dados para computadores compatíveis (LI-COR, 1992).

O sensor é posicionado abaixo do dossel e várias medidas internas podem ser obtidas, as quais são armazenadas e utilizadas para o cálculo automático do IAF, através da introdução destas medidas em um modelo de transferência radiativa. A obtenção de várias medidas e o uso da lente olho-de-peixe garantem uma amostragem representativa da folhagem. Além das medidas internas, devem ser obtidas medidas externas para coleta da radiação total incidente e posterior calibração dos dados obtidos. De acordo com explicação anterior sobre métodos indiretos, as informações a respeito da quantidade e orientação dos elementos da folhagem podem ser estimadas a partir de dados de clareira, as quais em grande quantidade podem subestimar os valores de IAF. Ainda com relação ao uso LAI-2000, o mesmo pode ser usado em dosséis de vários tamanhos, de gramíneas até florestas. Para dosséis altos, há três modos de operação: a) com um LAI-2000, coletando-se as medidas externas e internas alternadamente; b) com dois LAI-2000, um só para medidas externas (coletando dados em intervalos de tempo pré-determinados) e outro só para medidas internas e c) com dois sensores e uma unidade de controle, onde a distância máxima entre os sensores é de 10 metros, reduzindo-se erros relativos à iluminação e à calibração (LI-COR, 1992).

O princípio de funcionamento do LAI-2000 baseia-se em quatro premissas:

- 1) A folhagem é opaca;
- 2) Os elementos do dossel são pequenos comparados com a área de visada de cada anel;
- 3) A folhagem é aleatoriamente distribuída;

4) A folhagem é aleatoriamente orientada no sentido azimutal.

Estas premissas nem sempre são válidas, uma vez que a folhagem não é opaca, pois transmite e reflete REM incidente, além de sua orientação e distribuição não serem aleatórias. Muitas espécies apresentam algum grau de heliotropismo, além de possuírem certa orientação ao longo do caule e dos galhos. No entanto, muitos dosséis podem ser considerados aleatórios na sua distribuição e orientação, além da folhagem possuir baixa transmitância e reflectância entre 0,32 e 0,49 μm , faixa de atuação do LAI-2000 (LI-COR, 1992).

Nas últimas décadas, com o lançamento de vários satélites de SR e a conseqüente disponibilidade de dados orbitais na forma de imagens digitais, surgiu mais uma alternativa para a estimativa indireta do IAF, visto que os dados orbitais também medem grandezas radiométricas, neste caso, a radiância espectral. Os dados de SR permitem uma análise espacial e temporal da variação do IAF, por fornecer uma visão sinóptica da superfície terrestre, informações em largas escalas e com repetição constante sobre processos ocorridos na superfície da Terra, tornando-se um instrumento potencial de monitoramento dos recursos naturais (Asrar *et al.*, 1985; Szekiela, 1988; Asrar *et al.*, 1989; Roughgarden *et al.*, 1991; Friedl *et al.*, 1994).

Conforme mencionado no Item 2.2 (Comportamento Espectral de Alvos), para o caso do estudo da vegetação, essa radiância espectral refletida por um dossel é influenciada pelos parâmetros biofísicos que caracterizam sua arquitetura, além de outros relacionados às geometrias de iluminação e de visada e das propriedades espectrais dos elementos da vegetação que o constitui (folhas, galhos, troncos, entre outros.). De maneira geral é esperado que quanto maior o IAF, menor o valor de radiância espectral referente às regiões do visível e do infravermelho médio, devido à maior disponibilidade de pigmentos fotossintetizantes absorvendo REM incidente e quantidade de água, respectivamente, e maior valor na região do infravermelho próximo, devido ao maior espalhamento múltiplo entre folhas. Vários estudos demonstram estas relações (Curran *et al.*, 1992; Friedl *et al.*, 1994), contudo o efeito do aumento do IAF pode ser mascarado pelo efeito de outros parâmetros, tais como DAF, que aumenta ou diminui o sombreamento entre as folhas ou a presença de elementos ambientais, como o orvalho, que exerce influência predominantemente na região do infravermelho médio, normalmente diminuindo os valores da radiância espectral refletida pelo dossel (Ponzoni, 1993).

A detecção de mudanças em florestas em nível global é o primeiro e mais importante passo na compreensão da dinâmica da vegetação terrestre no ciclo global do carbono (Peterson e Running, 1989) e envolve o uso de imagens multitemporais para discriminação de áreas que foram

alteradas entre duas datas de imageamento (Lillesand e Kiefer, 1987). Em estudos multitemporais, onde há comparação pixel a pixel em diferentes datas para o monitoramento de mudanças, as imagens orbitais necessitam da aplicação de correções, que normalizem todas as cenas sob os mesmos parâmetros (Richards, 1986). Inicialmente as imagens podem ser georreferenciadas, o que consiste em um processo de reamostragem dos pixels com relação a uma base cartográfica, onde os mesmos são endereçados em termos de coordenadas geográficas e não apenas em linhas e colunas (Richards, 1986). Em seguida, ou independentemente do processo de georreferenciamento, as imagens podem ser registradas uma em relação a outra, de modo que os pixels em uma mesma linha e coluna entre diferentes imagens representem os mesmos elementos de resolução no terreno. Dois aspectos são importantes para um registro imagem-imagem: distribuição uniforme dos pontos de controle na cena e a ordem do polinômio utilizado. A qualidade do registro pode ser avaliada através de uma composição colorida das imagens registradas, as quais devem se mostrar perfeitamente sobrepostas (Richards, 1986; Lillesand e Kiefer, 1987).

2.3.1 - Adequação Radiométrica

Após estas adequações geométricas, as imagens digitais devem ser também adequadas do ponto de vista radiométrico, que incluem correções que visam minimizar as diferenças entre os valores medidos de radiância, decorrentes de possíveis alterações das sensibilidades radiométricas dos detetores ao longo do tempo, de diferenças nas calibrações dos sensores e de efeitos atmosféricos e de iluminação diferenciados entre imagens de diferentes datas. Estas correções serão aqui denominadas de **adequação radiométrica**, consistindo em um passo importante quando o estudo é multitemporal por permitir uma normalização de todas as datas de passagem para condições padrões (Hill e Sturm, 1991).

A calibração dos dados orbitais é um fator importante no processo de obtenção de medidas radiométricas, pois consiste no estabelecimento de uma relação entre a REM incidente no sensor e o sinal de saída. Este sinal de saída geralmente está em “volts” e é uma função da radiância espectral do alvo e da responsividade espectral do detetor (Asrar, 1989), sendo representado por 256 níveis de brilho, correspondentes à radiância média do pixel. A calibração dos detetores do sensor TM/Landsat é obtida através de lâmpadas de calibração internas e de um corpo negro, que funcionam como um padrão/referência de radiância. Após cada varredura completa do espelho, os detetores focalizam este padrão, sendo calibrados (Szekiela, 1988). Diferenças nesta calibração, decorrentes da utilização de diferentes sensores ou do desgaste dos detetores ao longo do tempo, implicam em diferenças radiométricas entre imagens multitemporais, sendo necessária a realização de uma adequação radiométrica.

Para a realização desta adequação radiométrica é preciso lembrar que as imagens orbitais brutas são espacialmente compostas por pixels e radiometricamente discretizadas em 256 níveis de brilho, relacionados através de um modelo linear, com a intensidade média de radiância refletida/emitida pelo pixel. Estes valores, no entanto, não podem ser diretamente comparados quando oriundos de diferentes sensores/satélites, pelo fato destes apresentarem diferenças nas suas calibrações (Robinove, 1982; Lillesand e Kiefer, 1987).

Com relação a este problema, Robinove (1982) descreveu as vantagens da **conversão radiométrica** de dados orbitais originalmente em valores digitais, para valores que representem qualidades físicas do alvo, como radiância ou reflectância, como primeiro passo visando a adequação radiométrica. Segundo o autor, vários pesquisadores utilizam os valores digitais para os mais diversos fins (mapeamentos, classificações, mosaicos, razões de bandas) por apresentarem maior facilidade no processamento computacional. No entanto, este procedimento pode proporcionar resultados e conclusões incorretos e/ou imprecisos quando da análise de imagens multitemporais, visto que os valores digitais variam com as diferentes calibrações dos sensores em cada satélite. Quando apenas uma imagem é utilizada, o uso de valores digitais não compromete a confiabilidade dos dados, pois os dados são internamente consistentes. O autor demonstrou em seu artigo que podem ocorrer diferenças entre valores de reflectância relativos ao mesmo valor digital, porém oriundos de diferentes satélites e de diferentes calibrações, reforçando a necessidade desta transformação. Além disso, valores de radiância ou de reflectância são mais compreensíveis ao usuário do que os valores digitais e representam valores físicos reais.

Outro aspecto dessa conversão radiométrica está relacionado com as diferenças entre os ângulos de elevação solar em imagens multitemporais, que apresentam variações sazonais e de uma imagem para outra, podendo gerar distorções de interpretação. Este aspecto foi discutido em diversos trabalhos, dentre eles Colwell (1974), Asrar *et al.* (1985); Jackson *et al.* (1990), Moran *et al.* (1990) e Epiphanyo e Huete (1995). A transformação dos valores de radiância para valores de reflectância considera as diferenças entre os ângulos de elevação solar e corrige as imagens para este fator, através de uma normalização, que não considera a topografia e a atmosfera.

Portanto, Robinove (1982) recomenda esta transformação dos dados em cinco situações: a) razão de bandas; b) mosaico de duas ou mais cenas com ângulos solares diferentes; c) mosaico de duas ou mais cenas, de dois ou mais sensores orbitais; d) depois de uma mudança na calibração de um dos sensores orbitais; e) detecção de mudanças entre duas ou mais cenas, com diferentes ângulos solares ou diferentes calibrações.

A transformação para radiância pode ser realizada através da fórmula:

$$L = \left(\frac{VD_i}{VD_{max}} \right) \cdot (L_{maxi} - L_{mini}) + L_{mini} \quad (2.4)$$

onde:

i = banda;

VD_i = valor digital do pixel, na banda i ;

VD_{max} = valor digital máximo gravado;

L_{maxi} = radiância máxima registrada pelo detetor, na banda i ;

L_{mini} = radiância mínima registrada pelo detetor, na banda i .

O valor de L_{min} é a radiância espectral correspondente ao nível de cinza 0 e o valor de L_{max} é a radiância espectral mínima exigida para gerar o maior nível de cinza, no caso de imagens Landsat, 255, sendo esta a radiância que satura o canal (Lillesand e Kiefer, 1987).

A transformação para reflectância é dada pela fórmula:

$$R = \frac{L \cdot \pi \cdot D^2}{E_i \cdot \cos \alpha} \quad (2.5)$$

onde:

L = radiância;

D = distância Sol-Terra;

E = irradiância no topo da atmosfera ;

i = banda;

α = ângulo zenital solar.

O autor ressalta a necessidade da aplicação de uma correção atmosférica, de modo a permitir uma análise ainda mais próxima da realidade, considerando apenas os fenômenos relativos à Terra e não a todo o sistema Terra-atmosfera.

Epiphanyo e Formaggio (1988) reforçaram a importância da aplicação desta metodologia, demonstrando ainda a possibilidade da utilização destes três valores na análise de dados de SR: valores digitais corrigidos atmosféricamente, valores de radiância e de reflectância. Estas três grandezas podem ser interconvertidas através de equações adequadas e a escolha dependerá basicamente dos objetivos do trabalho. Para o estudo do comportamento espectral de alvos, por

exemplo, a melhor opção são os valores de reflectância. Estes autores também concordam com a necessidade da correção atmosférica, anteriormente à transformação dos dados, e do ângulo de elevação solar, ressaltando ainda a importância da consideração da distância Sol-Terra, no caso de estudos multitemporais, na transformação dos dados.

Guyot e Gu (1994) realizaram um trabalho onde também demonstraram a necessidade desta transformação antes da interpretação de dados multiespectrais e multisensores. Estes autores utilizaram dados do Landsat e do SPOT, com diferentes calibrações e bandas espectrais, para obtenção de valores de **NDVI** (“**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex”) de uma mesma área, em uma mesma data. Assim como no trabalho de Robinove (1982), concluíram que os valores de NDVI calculados a partir de valores digitais apresentam erros, da mesma natureza que os descritos por aquele autor, onde um mesmo valor de NDVI obtido por valores digitais pode corresponder a diferentes valores de NDVI obtidos em campo. Com relação à utilização de dados multisensores, demonstraram que valores de NDVI do Landsat e do SPOT não são equivalentes, não podendo ser diretamente comparados. Além do fator calibração envolvido, as bandas espectrais relativas ao vermelho e ao infravermelho dos dois satélites não possuem a mesma largura, nem o mesmo comprimento de onda central, resultando em diferenças nos valores de NDVI. A transformação radiométrica também foi utilizada e recomendada por Moran *et al.* (1990).

A segunda etapa da adequação radiométrica é relativa aos problemas decorrentes às diferenças atmosféricas e de iluminação entre dados multitemporais, que acarretam erros em uma análise quantitativa, devido aos diferentes valores radiométricos entre cenas de diferentes datas. O problema da correção atmosférica para imagens multitemporais têm sido resolvido com aplicação de modelos de transferência radiativa, que necessitam dos parâmetros de calibração dos sensores e das propriedades atmosféricas, nem sempre disponíveis. Assim, Hall *et al.* (1991) descreveram uma técnica denominada **retificação radiométrica**, aplicada em imagens orbitais multitemporais e/ou multisensores, as quais geralmente apresentam diferenças nas respostas radiométricas devido às diferenças nas condições de iluminação, atmosféricas, de calibração e de sensibilidade dos sensores. As imagens são retificadas com relação a uma imagem referência e devem aparecer como se tivessem sido obtidas pelo mesmo sensor e nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação desta imagem referência. Desta forma, as variações radiométricas entre as diferentes passagens do satélite serão devidas apenas a alterações na natureza dos alvos analisados.

O princípio consiste na seleção de conjuntos de pontos de controle, claros e escuros, que correspondem a alvos com baixa ou nenhuma variação em suas reflectâncias médias, as quais são utilizadas para a calibração do modelo linear de retificação. A aplicação do modelo normaliza as

respostas radiométricas das imagens, nas diferentes bandas, através de transformações lineares. Esta metodologia não requer o uso de parâmetros de calibração dos sensores e das propriedades atmosféricas, sendo útil quando estes não estão disponíveis e/ou não são confiáveis. Caso estas informações estejam disponíveis, pode-se corrigir atmosféricamente a imagem referência e retificar as demais em relação a esta. Entretanto, é fundamental a existência de alvos estáveis nas imagens a serem retificadas, os quais servirão de parâmetros para calibração do modelo. Esta metodologia não corrige as imagens em termos absolutos, apenas relativos e os autores ressaltam que esta técnica é bem sucedida nas regiões do visível e do infravermelho próximo, não o sendo para a região do infravermelho médio.

Os pontos de controle são relativos a áreas não-vegetadas e pseudo-estáveis, correspondentes aos extremos do espaço bidimensional de **Kauth-Thomas “Greenness-Brightness”**. A partir das médias de reflectância destes conjuntos de controle são determinados os coeficientes da equação linear, para cada banda. Desta forma, o modelo linear de retificação é dado pela seguinte equação:

$$T = m_i \cdot x_i + b_i \quad (2.6)$$

onde:

i = banda considerada;

$$m_i = \frac{(Br_i - Dr_i)}{(Bs_i - Ds_i)}$$

$$b_i = \frac{(Dr_i \cdot Bs_i - Ds_i \cdot Br_i)}{(Bs_i - Ds_i)}$$

Dr_i = média de reflectância do grupo de controle escuro;

Br_i = média de reflectância do grupo de controle claro;

Ds_i = média de reflectância do grupo escuro a ser retificado;

Bs_i = média de reflectância do grupo claro a ser retificado.

2.3.2 - Transformação de Imagens Orbitais

As adequações geométrica e radiométrica proporcionam às imagens multitemporais maior uniformidade, permitindo maior confiabilidade na extração de informações sobre a vegetação a partir de seus valores radiométricos. Vários trabalhos foram realizados nos últimos anos com o objetivo de estimar a biomassa foliar através de correlações com o IAF, sendo este estimado através de dados orbitais. Entretanto, apesar das relações anteriormente descritas entre IAF e as regiões do

EEM, estas regiões não são exploradas separadamente. As reflectâncias médias relativas a cada uma das bandas dos sensores podem ser utilizadas conjuntamente e uma abordagem é o uso de índices de vegetação, os quais estão correlacionados com o IAF. Outras abordagens são os modelos de transferência de radiação e a inversão de funções que descrevem a frequência de clareiras dentro do dossel (Asrar *et al.*, 1989).

Atualmente existem diversas transformações aplicáveis às imagens digitais, com o objetivo de extrair informações relativas à vegetação, dentre elas os **índices de vegetação** e o **modelo de mistura espectral**, ambos abordados neste trabalho.

2.3.2.1 - Índices de Vegetação

Os índices de vegetação são um tipo de operação aritmética, que consiste na razão de valores digitais, de voltagem, de reflectância ou de radiância de duas ou mais bandas, referentes à mesma cena, para formar uma nova imagem, denominada **imagem-índice de vegetação**. Esta operação aritmética é a mais conhecida e utilizada atualmente, por ser de simples implementação e interpretação e por fornecer informações satisfatórias a respeito da vegetação (Shimabukuro, 1995).

Os principais objetivos de uma operação aritmética são a redução da dimensionalidade dos dados, a geração de índices de vegetação, a redução dos efeitos multiplicativos e aditivos presentes nas imagens (sombra, solo e atmosfera) e o monitoramento de mudanças ocorridas numa área durante um período de tempo (Shimabukuro, 1995), além da redução do efeito da topografia (Richards, 1986).

Os índices foram desenvolvidos inicialmente com a finalidade de acompanhar o desenvolvimento de culturas agrícolas, porém tiveram seu uso estendido também para o mapeamento da vegetação e para sua avaliação com relação a desfolhamentos, colheitas e cortes rasos (Szekielda, 1988). Diversos estudos têm demonstrado correlações significativas entre os índices e parâmetros da vegetação, como o IAF (Lo, 1986; Running *et al.*, 1989); funções fisiológicas dos dosséis, como capacidade fotossintética e fAPAR (“fraction of absorbed photosynthetically active radiation”), produtividade e estresses (Myneni *et al.*, 1995). Isto explica a diversidade de estudos envolvendo esta técnica, onde são abordadas e testadas as correlações acima citadas, entre outras, para várias situações, espécies vegetais e sensores.

O princípio dos índices consiste na exploração do comportamento espectral da vegetação na região do vermelho, que apresenta baixa reflectância, e na região do infravermelho próximo, que apresenta alta reflectância (Shimabukuro *et al.*, 1995). Com o aumento quantitativo da

vegetação, a reflectância na região do vermelho tende a diminuir, enquanto no infravermelho próximo, tende a aumentar. Os índices de vegetação exploram este dinamismo, caracterizado por contrastes nos valores de reflectância destas duas bandas (Jackson e Huete, 1991; Myneni *et al.*, 1995).

A escolha das bandas a serem utilizadas dependerá dos objetivos do trabalho, do objeto de estudo e da experiência do usuário (Shimabukuro, 1995). No entanto, as bandas que tem se mostrado mais valiosas e assim mais utilizadas, são as relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo (Huete, 1988; Baret e Guyot, 1991; Myneni *et al.*, 1995). A maioria dos índices utilizam estas duas regiões do EEM, mudando apenas os valores e as operações aritméticas realizadas no numerador e no denominador. Considerando-se que os índices sejam realizados utilizando valores de reflectância, que variam de 0 a 1, os possíveis valores resultantes da razão estarão compreendidos no intervalo 0 a ∞ (Shimabukuro, 1995). Estes valores podem ser discretizados dentro do intervalo 0 a 255, de modo que apresentem a mesma amplitude das imagens em valores de nível de cinza ou dentro do intervalo 0 a 1 ou 0 a 100, de modo que representem frações ou porcentagens da resposta da vegetação de um determinado pixel.

Devido à sua extensa aplicabilidade e simples implementação, vários índices de vegetação foram criados e modificados ao longo dos últimos anos. Restringindo-se apenas aos mais conhecidos, podemos citar: **NDVI**, já comentado brevemente, **SR** (“Simple Ratio”), **PVI** (“Perpendicular Vegetation Index”) (Huete, 1989), **SAVI** (“Soil-Adjusted Vegetation Index”), **MNDVI** (“Modified NDVI”), **TSAVI** (“Transformed SAVI”), **TVI** (“Transformed Vegetation Index”), **ARVI** (“Atmospherically Resistant Vegetation Index”) e **GEMI** (“Global Environment Monitoring Index”) (Shimabukuro, 1995). À medida que os estudos em vegetação progridem, que os conhecimentos sobre a interferência do solo e da atmosfera avançam e que as propriedades espectrais da vegetação vão sendo melhor compreendidas, mais índices vão sendo desenvolvidos. Cada um deles tem uma particularidade, i.e., realçam ou consideram um determinado fator de interesse, podendo-se escolher o índice que melhor se ajuste aos objetivos do estudo realizado. Ultimamente grande atenção tem sido destinada ao desenvolvimento e ao aperfeiçoamento de índices de vegetação com a finalidade de amenizar ou eliminar os efeitos de atmosfera e de solo, que mascaram a resposta da vegetação, dentre eles, o SAVI e o ARVI (Huete, 1988; Myneni e Asrar, 1994; Myneni *et al.*, 1995; Shimabukuro, 1995).

Apesar da existência de diversos índices de vegetação, o mais conhecido e utilizado nos estudos de caracterização e monitoramento da vegetação é o **NDVI** (Guyot e Gu, 1994; Myneni e Asrar, 1994), obtido pela seguinte equação:

$$NDVI = \left(\frac{IVP - VM}{IVP + VM} \right) \quad (2.7)$$

onde:

IVP = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo;

VM = reflectância na banda referente ao vermelho.

O NDVI foi desenvolvido por Rouse *et al.* (1974) citado por Baret *et al.* (1995) e utilizado por Deering (1978) citado por Jackson e Huete (1991), que constatou que vegetação esparsa podia ser realçada utilizando esta equação normalizada, indicando, portanto, que o NDVI é mais sensível para vegetações esparsas. O NDVI pode ser obtido a partir de dados de sensores que possuam bandas nestas duas regiões do EEM. Atualmente, grande parte dos satélites está equipada de sensores com bandas na região do vermelho e do infravermelho próximo, possibilitando a obtenção de índices de vegetação, como por exemplo, **Landsat 5**, **SPOT** (“Système Probatoire d’Observation de la Terre”), **CBERS** (“China-Brazil Earth Resources Satellite”), **MODIS** (“Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer”) e **NOAA** (“National Oceanic and Atmospheric Administration”). A escolha do sensor dependerá basicamente dos objetivos do estudo. O sensor AVHRR/NOAA, por exemplo, possui resolução espacial menor e resolução temporal maior, em relação ao Landsat 5. Isto implica em índices de vegetação diários e relativos a grandes áreas, permitindo um acompanhamento freqüente das mesmas, além de aumentar a possibilidade de obtenção de imagens sem nuvens (Figueiredo, 1990). No entanto, um pixel do NOAA abrange uma área no terreno de 1,1 x 1,1 km, agravando consideravelmente o problema de mistura de respostas espectrais de alvos diferentes, quando comparado ao Landsat 5, cuja área no terreno corresponde a 30 x 30 metros.

Conforme mencionado anteriormente, os índices podem ser calculados a partir de dados de voltagem, de valores digitais, de radiância ou de reflectância. Todos estão corretos, entretanto, diferentes valores de índices de vegetação podem serão encontrados para as mesmas condições da superfície terrestre. Igualmente problemática é a comparação de índices de vegetação de diferentes sensores, pois os FOV’s podem ser diferentes e as bandas relativas ao vermelho e ao infravermelho próximo podem possuir diferenças em suas larguras, além dos filtros e dos detetores serem únicos para cada sensor, acarretando em respostas radiométricas diferentes (Jackson e Huete, 1991).

Várias aplicações têm sido propostas utilizando informações de NDVI, visando otimizar os dados disponíveis neste formato para extração de informações a respeito da vegetação.

Sader e Winne (1992) propuseram a utilização de composições coloridas RGB-NDVI para o monitoramento de mudanças ocorridas em áreas de florestas, onde podem ser usadas três datas distintas ou apenas duas e a sua diferença. Outra aplicação citada por Lillesand e Kiefer (1987) é a razão de duas bandas de épocas diferentes, que podem indicar mudanças temporais, tendendo a 1 quando não houverem mudanças e a valores baixos ou altos quando houverem. Roughgarden *et al.* (1991) mencionaram que correlações altas entre NDVI e produção primária, fotossíntese e transpiração, permitem a geração de mapas globais de NDVI representando a atividade da vegetação com confiança satisfatória, além de permitir estimativas quantitativas do CO₂.

Nos últimos anos, grande atenção tem sido dedicada ao desenvolvimento de teoria e de instrumentos para estimativas rápidas e indiretas de IAF para florestas, uma vez que as estimativas diretas deste parâmetro para este tipo de dossel são muito trabalhosas e por vezes impossíveis. (Gower e Norman, 1991; Curran *et al.*, 1992). Visando atingir este objetivo, vários estudos têm relacionado os índices de vegetação, obtidos através de dados multiespectrais, com o IAF (Gower e Norman, 1991; Gong *et al.*, 1992). Entretanto, há limitações no uso destas transformações na estimativa indireta do IAF, sendo que a principal delas é a saturação destes índices para valores de IAF entre 2 e 6. Esta saturação é representada pelo comportamento assintótico da curva para valores crescentes de IAF, dependendo do índice utilizado, do dossel analisado e das condições experimentais. Assim, a correlação NDVI x IAF pode ser expressa por uma equação exponencial (Baret e Guyot, 1991). Estes autores ressaltam que é problemática a estimativa de IAF a partir de índices de vegetação para IAF's acima de 3 (Figura 2.9).

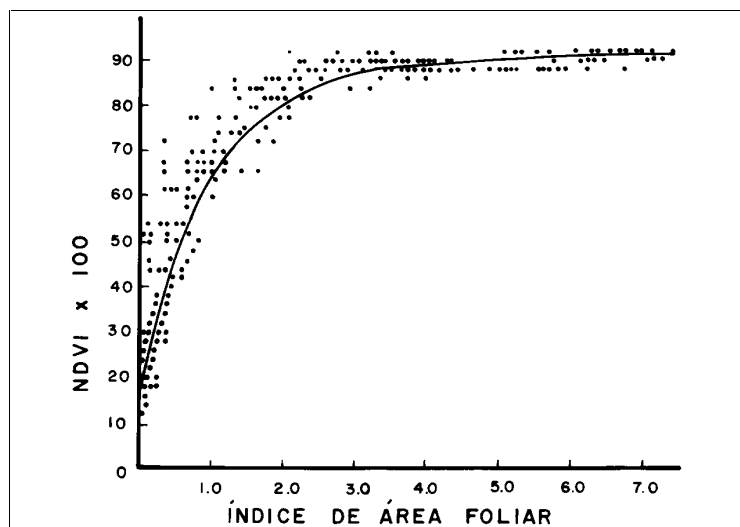


Fig. 2.9 - Comportamento do NDVI em função do IAF.

FONTE: Adaptada de Asrar (1989), p. 262.

Outra limitação grave associada ao uso dos índices de vegetação são as contribuições de outros fatores na resposta da vegetação. O fluxo radiante proveniente da superfície terrestre contém informações das propriedades bio-físico-químicas de todos os alvos nela presentes, como solo, água, vegetação, sombra, entre outros (Colwell, 1974). Porém, o objetivo principal dos índices de vegetação consiste na extração de informações apenas sobre as características dos dosséis, como o IAF, minimizando o efeito de fatores externos, aos quais os índices também são sensíveis (Baret e Guyot, 1991; Jackson e Huete, 1991).

Estes fatores têm sido relatados em diversos estudos como sendo relativos às propriedades do solo e à atmosfera (Huete, 1988; Baret e Guyot, 1991; Jackson e Huete, 1991; Curran *et al.*, 1992), à arquitetura do dossel, aos ângulos solar e de visada (Figueiredo, 1990; Curran *et al.*, 1992) e às características dos sensores (Jackson e Huete, 1991). Em estudos multitemporais, há ainda a interferência da calibração dos sensores, da geometria de iluminação e de visada, da distância Sol-Terra, das condições atmosféricas e da evolução temporal do alvo, além dos anteriormente mencionados (Guyot e Gu, 1994).

Huete *et al.* (1985) estudou a influência de quatro tipos de solo na resposta espectral de dosséis de algodão, com diferentes graus de cobertura, constatando que a interferência deste fator está presente não só em dosséis pouco densos, como também naqueles com quase 75% de cobertura vegetal. A influência do solo também foi analisada no trabalho de Huete (1987).

Com relação a este problema de interferência do solo na resposta da vegetação, foi desenvolvido o **SAVI**, um índice de vegetação com o objetivo de minimizar o efeito do solo na resposta da vegetação. Os índices de vegetação baseiam-se na existência de uma linha de solo, no espaço bidimensional vermelho x infravermelho próximo, que se afasta da origem para níveis de brilho do solo maiores. Os solos mais escuros resultam em valores de índices de vegetação mais altos, sendo que esta sensibilidade é maior quando a densidade de vegetação é intermediária (50%). Quando a densidade é muito baixa (abaixo de 30%), não há vegetação suficiente para causar um efeito de mistura de respostas e a curva de vegetação aproxima-se à do solo (Huete, 1989). Se a densidade é muito alta, não há sinais significantes de solo provenientes do dossel. Partindo destes fatos, foi acrescentado ao NDVI um fator “L”, variando de 0 a 1 dependendo do grau de cobertura da vegetação, originando o SAVI, que a princípio minimizou com sucesso a influência do solo em dois tipos de culturas (dicotiledôneas e monocotiledôneas) (Huete, 1988). Assim, o SAVI é dado pela seguinte equação:

$$SAVI = \left(\frac{IVP - VM}{IVP + VM + L} \right) \cdot (1 + L) \quad (2.8)$$

onde:

IVP = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo;

VM = reflectância na banda referente ao vermelho;

L = fator de cobertura do solo.

Como foi visto no Item 2.2, o próprio solo sofre variações devido à mineralogia, conteúdo de água, acúmulo de matéria orgânica, cor e textura, podendo variar sua resposta espectral e conseqüentemente sua contribuição na resposta da vegetação. Por isso, é muito difícil modelar as propriedades de um dossel, visto que a resposta deste é sensível não só à variação da vegetação, mas também à do solo, sendo necessários estudos das suas propriedades espectrais para entender sua influência na resposta da vegetação (Huete, 1989). Uma alternativa para este problema é o modelo de mistura espectral, devido ao seu caráter de decomposição do pixel nas respostas dos seus componentes. Este modelo é discutido adiante.

Rondeaux *et al.* (1996) realizaram um estudo onde analisaram quatro índices de vegetação em função da densidade da vegetação, para diferentes geometrias e solos. Os resultados comprovaram as informações fornecidas por Baret e Guyot (1991), mostrando que o NDVI satura para valores de IAF acima de 3. Para IAF's entre 0,5 e 3, a grande amplitude dos valores de NDVI pode implicar em erros ao tentar recuperar o grau de densidade da vegetação, representado pelo IAF, a partir dos valores de NDVI. E para IAF's abaixo de 0,1, a resposta da vegetação é equivalente à curva do solo. Ou seja, o NDVI fornece uma informação pobre sobre a vegetação quando informações sobre o solo são desconhecidas. Os autores também testaram o SAVI, o TSAVI e o MSAVI, que mostraram melhor desempenho, embora também existam algumas limitações. A relação NDVI / IAF é muito dependente do solo, uma vez que há uma grande amplitude de valores NDVI para uma mesma densidade de vegetação (Huete, 1988).

Outro estudo comparativo foi realizado por Baret *et al.* (1995), que compararam seis tipos de índices e constataram que o NDVI foi o mais pobre de informações. O SAVI e seus derivados (TSAVI e MSAVI) apresentaram os melhores resultados, sendo que o GEMI e o PVI foram intermediários, porém satisfatórios. Todos os índices estudados, exceto o NDVI, forneceram boas correções para os efeitos do solo, que é o principal fator de variação do IAF.

2.3.2.2 - Modelo de Mistura Espectral

O modelo de mistura espectral é um tipo de transformação aplicada às imagens orbitais, que gera como produto as chamadas **imagens-proporção**, **imagens-fração** ou “**end-members**”. Segundo levantamento realizado por Shimabukuro (1995), os primeiros estudos referentes ao modelo de mistura são da Universidade de Michigan, no início da década de 70, e da Colorado State University, em meados desta mesma década. O princípio deste modelo consiste no fato do pixel de uma imagem ser suficientemente grande para incluir dois ou mais tipos de alvos, decorrente da não-uniformidade da maioria das cenas naturais, ou seja, os alvos são menores do que a área no terreno abrangida pelo sensor (Shimabukuro e Smith, 1991). Isto causa um problema de mistura de respostas espectrais de diferentes alvos, podendo incorrer em erros de sub ou superestimativa da área ocupada por um determinado alvo existente dentro do pixel (Shimabukuro, 1995).

Este problema pode ser resolvido através de duas abordagens: técnicas de classificação ou modelagem da relação entre os tipos e proporções dos componentes e as suas respostas espectrais. Esta última abordagem tem sido adotada por pesquisadores em todo mundo, onde modelos de mistura têm sido aplicados e analisados em diversos tipos de estudo sobre o problema (Adams *et al.*, 1989a; Adams *et al.*, 1989b; Shimabukuro e Smith, 1991; Hall *et al.*, 1995; Shimabukuro e Smith, 1995).

A radiância detectada pelo sensor orbital é uma soma integrada das radiâncias de todos os alvos presentes no pixel, acrescida da contribuição atmosférica. Nos modelos lineares de mistura, a resposta de cada pixel é considerada uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente existente na mistura (vegetação, água, solo, sombra, rochas), a qual pode ser representada por uma relação linear. Desta forma, cada pixel da imagem possui um valor digital, que contém a informação sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente e o modelo de mistura espectral pode ser representado pelo seguinte conjunto finito de equações (Shimabukuro e Smith, 1991):

$$\begin{aligned} r_1 &= s_{11} \cdot a_1 + s_{12} \cdot a_2 + \dots + s_{1n} \cdot a_n + e_1 \\ &\vdots \\ r_m &= s_{m1} \cdot a_1 + s_{m2} \cdot a_2 + \dots + s_{mn} \cdot a_n + e_m \end{aligned}$$

ou simplesmente:

$$r_i = \sum (s_{ij} \cdot a_j) + e_i \quad (2.9)$$

onde:

r_i = reflectância espectral média na banda i , de um pixel com um ou mais componentes;

s_{ij} = reflectância espectral do componente j , na banda i ;

a_j = proporção do componente j dentro do pixel;

e_i = erro na banda i .

sendo que:

$$\sum (a_j) = 1 \quad \text{e} \quad 0 \leq a_j \leq 1$$

$j = 1, 2, \dots, n$ (número de componentes considerados no problema)

$i = 1, 2, \dots, m$ (número de bandas do sensor)

Considerando que o número de componentes a serem separados (n) seja menor que o número de bandas utilizadas (m), o sistema de equações pode ser resolvido através de diversas técnicas: mínimos quadrados com restrição (CLS/INPE), mínimos quadrados ponderado (WLS/INPE), regressão linear ou principais componentes (University of Washington) (Shimabukuro e Smith, 1991; Shimabukuro e Smith, 1995).

Cada imagem-proporção gerada a partir da aplicação do modelo é representante de cada um dos componentes escolhidos para serem separados e contém informações a respeito deste componente dentro do pixel original. Assim, cada pixel da imagem-proporção assume um valor digital, entre 0 a 255, correspondente à proporção daquele componente no pixel da imagem original (Shimabukuro e Smith, 1991). Por exemplo, escolhendo-se dois componentes a serem separados dentro pixel, vegetação e solo, a aplicação do modelo gerará duas imagens-proporção: a imagem-vegetação, onde está representada apenas a vegetação, sendo que os valores digitais representam a proporção de vegetação dentro do pixel da imagem original e a imagem-solo, representando apenas o solo.

Os parâmetros adotados para calibração do modelo são os **pixels puros**, que são pixels da imagem original compostos por apenas um tipo de alvo. A identificação e escolha destes pixels pode ser realizada diretamente na imagem, a partir da análise do diagrama de dispersão dos seus pixels ou a partir do resgate de curvas espectrais dos pixels. Este procedimento de escolha pode ser baseado apenas na experiência do usuário ou também em dados de verdade terrestre.

O trabalho de Shimabukuro e Smith (1991), realizado em uma área de plantação de Eucalyptus, considerou três componentes de mistura (Eucalyptus, solo e sombra) e foram analisados dois métodos de solução do sistema de equações lineares, o CLS e o WLS, considerando-se o tempo de processamento e o desempenho computacional. Os autores concluíram que ambos os algoritmos resolveram o modelo linear de mistura, sendo que o WLS foi matematicamente mais preciso e o CLS foi mais rápido. As imagens-sombra mostraram-se relacionadas à estrutura do dossel, sendo sensíveis a diferentes idades de Eucalyptus, onde plantios mais jovens apresentaram menos sombra que os mais velhos, aparecendo mais escuros nas imagens-sombra.

Shimabukuro e Smith (1995) realizaram outro trabalho semelhante, desta vez em áreas de plantios de Eucalyptus e Pinus, utilizando apenas o método CLS para resolução do modelo linear de mistura espectral. Foram escolhidos os mesmos componentes do trabalho anterior e os pixels puros foram definidos diretamente a partir das imagens orbitais, sendo que o de vegetação correspondeu a áreas de Eucalyptus; o de solo, a áreas de solo exposto e o de sombra, a corpos d'água limpos. Para analisar os resultados, foram geradas imagens-diferença provenientes de imagens-proporção em duas datas distintas, para cada componente. Foi ainda aplicada uma adaptação da metodologia descrita por Sader e Winne (1992), gerando composições coloridas de imagens-proporção em três datas distintas.

Os autores chegaram a algumas conclusões importantes. As composições coloridas das imagens-proporção permitiram a distinção entre áreas vegetadas e não-vegetadas e entre plantios de Eucalyptus e de Pinus, onde estes últimos apresentaram maior proporção de sombra. As imagens-vegetação foram sensíveis às idades de Eucalyptus (mais jovens, maior proporção de vegetação) e às espécies de Pinus (Pinus elliottii possui maior proporção de vegetação). As imagens-diferença de vegetação mostraram-se sensíveis às variações de biomassa foliar. E novamente foi concluída a sensibilidade das imagens-sombra à estrutura do dossel, podendo-se distinguir plantios de Eucalyptus e de Pinus; diferentes idades de Eucalyptus (mais jovens, menor proporção de sombra) e diferentes espécies de Pinus (Pinus elliottii possui menor proporção de sombra).

Hall *et al.* (1995) utilizaram o modelo linear de mistura em conjunto com modelos geométricos para estimar parâmetros estruturais em plantios de coníferas. Os gráficos deste trabalho mostram que a proporção de sombra aumenta à medida que a proporção de copa iluminada aumenta, até um determinado ponto de saturação, onde a proporção de sombra começa decrescer. Este comportamento está associado às proporções dos pixels correspondentes a dossel iluminado e aos ângulos zenitais. Para todos os ângulos zenitais este comportamento está presente, no entanto, o

ponto de saturação diminui à medida que o ângulo aumenta. Ainda neste trabalho, foi demonstrado que as proporções de sombra aumentam com o aumento da biomassa.

Os trabalhos mencionados envolveram uso de imagens orbitais do Landsat e os algoritmos de Mínimos Quadrados, mas o modelo de mistura espectral tem sido aplicado a dados de outros satélites, como o NOAA (Holben e Shimabukuro, 1993); utilizando outros algoritmos, como o de Componentes Principais (Adams *et al.*, 1989b) e para estudos em outros campos da ciência, como a geologia.

Nos trabalhos envolvendo estudos de vegetação, é possível notar que a imagem-sombra é especialmente considerada, pelo fato da sombra ser um componente constante nas cenas naturais, constituindo um importante componente a ser separado e analisado (Shimabukuro e Smith, 1995).

Alguns trabalhos utilizando as metodologias descritas acima podem ser citados. Pereira e Batista (1985) utilizaram índices de vegetação e dados de radiometria de campo para correlacionar com dados de biomassa foliar fresca. Zerbini e Santos (1993) aplicaram as imagens transformadas citadas neste trabalho para estimar biomassa foliar em floresta tropical, a partir de dados TM/Landsat e dados de biomassa obtidos em campo. Os resultados mostraram que os dados de mistura foram mais eficientes que os valores de NDVI para as áreas de floresta, porém ambos os processamentos são de fácil implementação e garantem uma boa distinção das feições.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Área de Estudo

A escolha da área de estudo observou três requisitos, considerados prioritários para alcançar os objetivos apresentados. Foram eles:

- 1) área de floresta implantada na qual tivessem sido aplicados desbastes seletivos ou sistemáticos;
- 2) disponibilidade de informações sobre as datas de realização destes desbastes, bem como sobre os volumes anteriores aos desbastes e daqueles referentes à madeira retirada;
- 3) localização em terreno plano ou pouco dissecado.

A opção por uma área de floresta implantada foi relacionada com as dificuldades já mencionadas no Capítulo 1 de se trabalhar com florestas heterogêneas e pela possibilidade de fornecer uma metodologia mais eficiente na quantificação do volume de madeira retirado em desbastes realizados em empresas reflorestadoras.

A localização dos plantios em terreno plano ou pouco dissecado visou diminuir a contribuição de sombras na resposta radiométrica da vegetação nas imagens orbitais. De acordo com o exposto no Item 2.3.2, a sombra é um fator limitante no uso de índices de vegetação e na interpretação de dados orbitais na estimativa de parâmetros biofísicos. Devido aos indivíduos dentro de um talhão florestal serem plantados na mesma época, e assim possuírem uma altura média semelhante e um topo de dossel mais uniforme, a ocorrência de terreno plano diminui ainda mais a formação de sombras.

A área escolhida foi a Fazenda Monte Alegre, de propriedade da DURATEX FLORESTAL S.A., localizada no município de Agudos/SP, imediatamente a nordeste da cidade de Agudos. Encontra-se delimitada pelos paralelos 22^o17' e 22^o35' de latitude sul e pelos meridianos 48^o49' e 48^o58' de longitude oeste, aproximadamente. A área total da Fazenda Monte Alegre é de 13.580,79 ha, correspondente a 135,81 km² e sua altitude média é de 628 m. Esta fazenda está organizada em cinco distritos: Areia Branca (DAB), Bom Sucesso (DBS), Cachoeira dos Macacos (DCM), Monte Alegre (DMA) e Sertãozinho (DSZ). A localização da área de estudo e dos municípios vizinhos no contexto estadual podem ser visualizados na Figura 3.1.

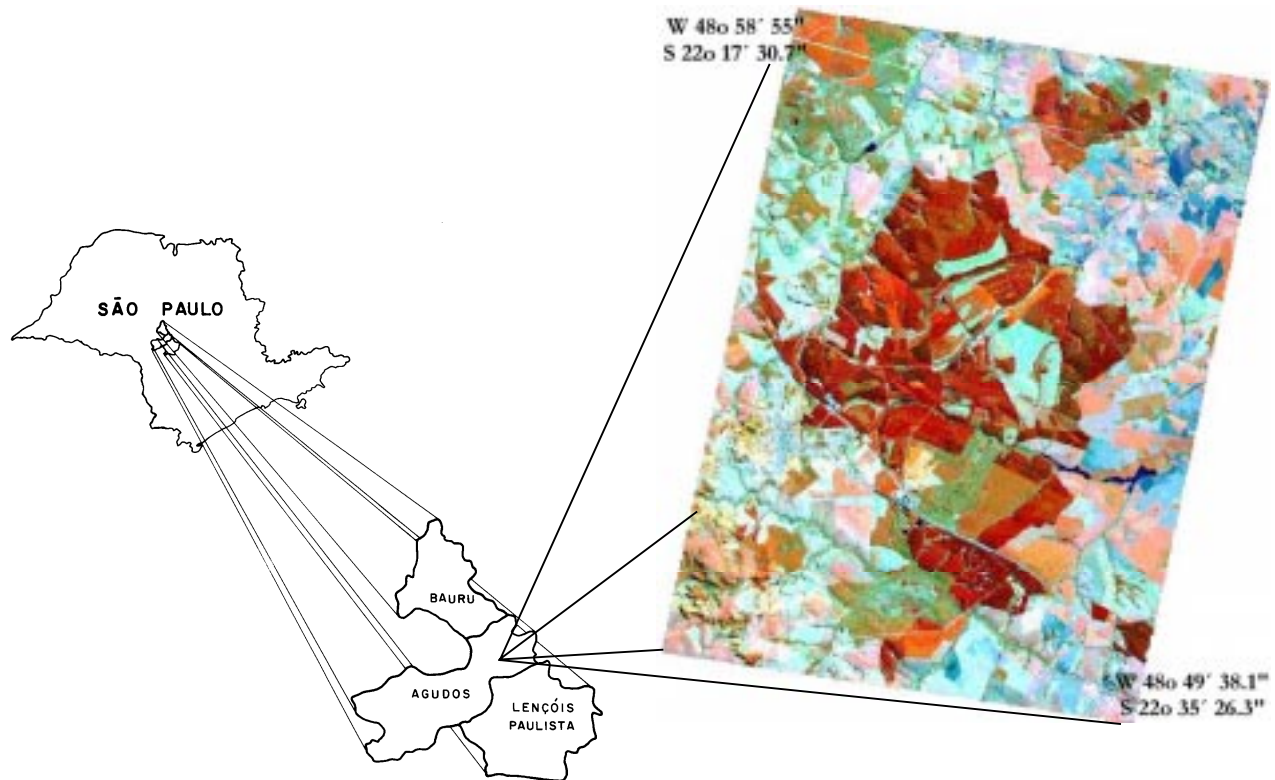


Fig. 3.1- Localização da área de estudo.

A região apresenta como cobertura vegetal nativa a floresta tropical latifoliada e o cerrado (ESALQ, 1971). No entanto, restam apenas pequenas ilhas de mata nativa, sendo que os cerrados, juntamente com os campos, as áreas de agricultura e as pastagens são responsáveis pela maior cobertura das terras.

Segundo ESALQ (1971), os dados climáticos para a região de Agudos não são suficientemente completos, sendo utilizados os parâmetros climáticos de Bauru, fornecidos pela Seção de Climatologia do Instituto Agrônomo de Campinas. O clima, segundo a classificação de Köeppen, é CWa. O grupo C abrange os climas mesotérmicos; a subdivisão CW, é definida como tropical de altitude, com inverno seco e verão com chuvas e a categoria CWa caracteriza-se por verões quentes (IBGE, 1963). A temperatura média anual é de 21,1^o C, sendo a média de inverno 18,6^o C, com frio mais intenso nos meses de junho e julho e a média de verão 23,3^o C, sendo janeiro o mês mais quente. A precipitação anual média é de 1215 mm/ano e a taxa de evapotranspiração potencial é de 1015 mm/ano.

Ainda segundo ESALQ (1971), em termos geológicos, ocorrem na área de estudo formações do Grupo Bauru. Estes sedimentos do Cretáceo superior foram depositados em ambientes fluviais, predominando a fração areia de quartzo, com variadas proporções de argila e

carbonatos. Ocorrem também materiais cenozóicos provenientes dos produtos da intemperização do Bauru superior. Os solos da fazenda são, predominantemente, classificados como latossolo vermelho-escuro de textura média.

O relevo é suavemente ondulado, sendo drenado pelos Ribeirões Grande, dos Patos e Pederneiras e pelos Córregos da Estiva e Areia Branca. A drenagem, orientada para o Rio Tietê, é pouco encaixada, gerando vales amplos e abertos, com encostas de declividade inferior a 10%. O tipo da drenagem é característico dos solos da região, os latossolos, sendo subparalela, com poucas ramificações e apresentando feições alveolares nas cabeceiras de drenagem. À medida que ocorrem solos podzólicos, a drenagem passa a exibir padrão arborescente, denso, muito inscrito e não apresentam os feições alveolares nas cabeceiras. Na região leste, os maiores cursos d'água apresentam drenagem controlada por estruturas rochosas ESALQ (1971).

A Fazenda Monte Alegre é constituída, em sua maioria, por plantios de Pinus spp., possuindo apenas alguns talhões de Eucalyptus spp. As cinco espécies de Pinus existentes na Fazenda e abrangidas neste trabalho, são: Pinus caribea var. bahamensis (PCB), Pinus caribea var. caribea (PCC), Pinus caribea var. hondurensis (PCH), Pinus elliotii var. elliotii (PEE) e Pinus oocarpa var. oocarpa (POO).

Na Tabela 3.1 estão listados os talhões analisados neste estudo, o distrito da fazenda ao qual pertenciam, as espécies, área do talhão, idade, DAP, altura média, área basal, espaçamento e desbaste atual (dados de 31 de dezembro de 1996).

TABELA 3.1 - CARACTERÍSTICAS DENDROMÉTRICAS DOS TALHÕES

TALHÃO	DISTRITO	ESPÉCIE	ÁREA ¹	IDADE ²	DAP ³	ALTURA ³	ÁREA BASAL ³	ESPAÇAMENTO ³	DESBASTE
100	DBS	PCC	13.2	10.7	19.0	17.6	27.9	2 x 2,5	2
101	DBS	PCC	7.1	10.7	19.0	17.6	28.9	2,5 x 2	2
102	DBS	PEE	10.7	10.4	18.0	12.5	30.8	3 x 2	1
103a	DBS	PEE	25.1	11.0	17.3	12.4	29.7	3 x 2	1
104a	DBS	PEE	35.9	11.6	18.9	13.4	28.9	3 x 2	2
105	DBS	PCH	15.3	11.0	19.4	18.8	38.5	2,5 x 2	1
107	DBS	PCH	29.9	11.0	19.2	17.8	38.9	2,5 x 2	1
108	DBS	PCH	15.9	11.0	20.0	19.0	43.2	2,5 x 2	1
110a	DBS	POO	18.7	10.8	17.4	18.4	37.0	2,5 x 2	1
112d	DBS	PCB	15.1	10.9	19.0	17.2	30.5	2,5 x 2	2
114a	DBS	POO	29.2	10.9	18.6	19.3	40.3	2,5 x 2	1
116	DBS	PCB	29.4	10.9	19.1	17.2	31.5	2,70 x 1,85	2
117	DBS	PCH	25.6	10.9	20.2	19.3	32.3	2,5 x 2	2
11c	DBS	PCH	...	...	...	...	...	2,5 x 2	2
27a	DBS	PEE	24.3	13.3	19.2	15.3	29.5	3 x 2	2
27aab	DAB	PCB	...	...	...	...	...	2,5 x 2	3
29b	DBS	PEE	14.7	13.3	19.2	14.5	30.2	3 x 2	1
2c	DMA	PCH	17.7	11.8	22.8	20.8	44.3	2 x 2,5	2
30c	DBS	PCH	29.7	13.2	22.4	23.4	28.1	2,5 x 2	3
31	DBS	PCH	16.8	14.1	25.9	23.9	30.5	2,5 x 2	3
36a	DSZ	PCH	20.9	14.8	24.8	25.7	29.8	2 x 2,5	3
37	DBS	PCB	41.4	12.1	19.0	18.5	29.4	2,5 x 2	3
37sz	DSZ	PCH	4.1	12.9	22.1	22.3	45.2	2,5 x 2	2
38	DBS	PCH	39.9	12.0	23.1	22.1	42.5	2,5 x 2	2
39	DBS	PCH	20.3	11.7	21.7	20.4	48.1	2,5 x 2	2
3b	DMA	PCH	4.2	11.7	21.6	21.9	37.5	2 x 2,5	2
40b	DBS	POO	2.0	10.7	19.0	19.9	38.4	2,5 x 2	2
41a	DBS	POO	12.8	10.7	18.9	19.9	34.6	2,5 x 2	2
42a	DSZ	PCH	6.0	11.1	22.8	20.3	44.8	3 x 2	2
44b	DBS	PCH	4.5	12.0	23.0	22.2	41.1	3 x 2	2
45c	DBS	POO	10.6	10.4	17.8	17.3	29.5	2,5 x 2	2
46a	DBS	PCB	3.4	10.4	17.0	16.6	24.5	2,5 x 2	2
46b	DBS	PCB	21.9	10.4	18.3	17.3	27.7	2,5 x 2	2
46c	DBS	POO	8.7	10.4	19.2	19.2	32.2	2,5 x 2	2
48	DBS	POO	9.9	10.7	18.5	19.7	28.9	2,5 x 2	2
49	DBS	POO	22.8	10.6	18.2	18.9	31.0	2,5 x 2	2
4a	DMA	PCH	28.8	11.7	21.9	21.0	38.4	2 x 2,5	2
50	DBS	PCC	20.9	10.5	20.1	17.9	31.6	2,5 x 2	2
51	DBS	PCC	17.6	10.6	19.1	17.6	27.1	2,5 x 2	2
52	DBS	PCH	16.4	14.0	23.6	24.3	32.2	2 x 2,5	3
55	DMA	PEE	27.0	9.5	16.5	10.6	22.5	3 x 2	1
56a	DBS	PCH	2.2	14.5	25.2	27.1	37.7	2,5 x 2	3
58a	DMA	PEE	11.7	9.6	16.7	10.6	24.5	3 x 2	1
58c	DBS	PCH	4.5	10.9	20.5	19.2	26.9	2,5 x 2	2
61	DBS	PEE	13.3	13.0	19.6	15.2	40.3	3 x 2	2
62c	DMA	PEE	10.8	9.6	16.0	11.0	27.7	3 x 2	1
70a	DBS	PEE	18.5	13.3	18.6	15.0	30.9	3 x 2	2
76	DBS	PEE	14.8	11.1	17.9	12.1	28.8	3 x 2	2
7a	DSZ	PCH	20.0	15.1	26.5	25.0	31.1	2,5 x 2	3
81	DBS	PCC	26.5	10.3	19.0	16.9	32.4	2,5 x 2	2
84	DBS	PCH	12.0	10.1	19.2	16.6	37.2	2,5 x 2	1
85a	DBS	PCH	24.1	10.1	18.2	16.8	34.4	2,5 x 2	1
86	DBS	PCC	11.9	10.2	22.1	18.4	33.1	2,5 x 2	2
88	DBS	PCH	...	...	...	...	...	2,5 x 2	3
8a	DBS	PCB	9.9	11.7	21.5	18.4	39.3	2,5 x 2	2
8c	DBS	PCC	15.6	11.7	20.4	19.3	34.4	2,5 x 2	2
8d	DBS	PCH	8.2	11.7	18.9	17.5	30.0	2,5 x 2	2
95b	DBS	PCB	...	...	...	...	...	...	3
98	DBS	PEE	49.3	10.6	17.6	11.3	29.4	3 x 2	1
99a	DBS	PCC	9.7	10.6	18.6	17.0	27.5	2,5 x 2	2
99e	DBS	PCC	5.0	10.7	19.4	17.7	27.4	2,5 x 2	2

3.2 - Cartas Topográficas e Imagens Orbitais

A Fazenda Monte Alegre encontra-se quase totalmente abrangida pela carta topográfica AGUDOS (SF 22-Z-B-II-3), com pequena parte da extremidade sul localizada na carta LENÇÓIS PAULISTA (SF 22-Z-B-V-1), ambas na escala 1:50.000. As cartas foram definidas com auxílio de uma imagem orbital da região, disponível no ATUS/INPE-S.J.Campos, dos mapas das fazendas e de suas coordenadas limites. As cartas foram utilizadas para definição do módulo da imagem (descrito adiante) e para definição do Banco de Dados (BD). Ambas as cartas foram obtidas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, do Rio de Janeiro/RJ.

Os dados orbitais consistiram em uma série temporal (1992 a 1994) de imagens do sensor “Thematic Mapper” (TM) do satélite Landsat 5, órbita/ponto 221/76, quadrante B, nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. As imagens orbitais foram utilizadas no formato digital, corrigidas com nível 4 e gravadas em fitas Exabyte 8mm, pelo INPE/Cachoeira Paulista (SP). Pelo fato da área de estudo localizar-se muito próximo à extremidade superior direita da imagem, foi solicitado um deslocamento de menos dois segundos (-2”) na mesma, que proporcionou maior segurança no recorte da área, no processamento e na análise.

A escolha das datas de passagem foi realizada a partir das tabelas fornecidas pela empresa, que continham informações sobre as datas de realização dos desbastes, entre outras. Foram escolhidas duas datas de passagem para cada data de desbaste: uma anterior e outra posterior à realização dos desbastes. Para garantir uma amostragem satisfatória, utilizando o menor número de imagens orbitais possível, foram selecionadas as datas de desbastes que apresentavam maior número de talhões desbastados. Assim, foi adotado o critério de descartar as datas nas quais haviam sido desbastados apenas de um a três talhões, aproveitando-se aquelas nas quais foram desbastados acima de quatro talhões. Uma exceção foi feita quando, após a escolha das datas de passagem, percebeu-se que as datas 17 de abril de 1993 e 7 de agosto de 1993 poderiam ser aproveitadas como imagens anterior e posterior, respectivamente, dos dados de desbastes ocorridos em julho de 1993. Com os dados de desbastes de agosto de 1992, houve perda de um talhão quando do processamento dos dados, totalizando apenas três talhões analisados nesta data. Apesar de terem sido escolhidas 9 datas de desbastes, foram selecionadas apenas 9 datas de passagem do Landsat, e não 18 como seria esperado, por haver repetição no uso de algumas delas, como mostra a Tabela 3.2. Estas datas de passagem foram obtidas através de um programa de **pesquisa de imagens**, da Divisão de Geração de Imagens (DGI/INPE), que gera uma listagem das datas que atendem às exigências dos usuários.

TABELA 3.2 - DATAS DE OCORRÊNCIA DOS DESBASTES, TALHÕES DESBASTADOS E DATAS DE PASSAGEM DO SATÉLITE LANDSAT 5/TM, ÓRBITA/PONTO 221/76B(-2)”*

DATAS DOS DESBASTES	IMAGEM ANTERIOR	IMAGEM POSTERIOR	TALHÕES
---------------------	-----------------	------------------	---------

<i>Agosto-1992</i>	19-julho-1992	21-setembro-1992 ¹	três
<i>Fevereiro/Março-1993</i>	21-setembro-1992 ¹	17-abril-1993 ²	quatro
<i>Maio/Junho-1993</i>	17-abril-1993 ²	6-julho-1993	sete
<i>Julho-1993</i>	17-abril-1993 ²	7-agosto-1993 ³	dois
<i>Setembro/Outubro-1993</i>	7-agosto-1993 ³	11-novembro-1993 ⁴	quatro
<i>Janeiro a Abril-1994</i>	11-novembro-1993 ⁴	6-maio-1994 ⁵	oito
<i>Julho-1994</i>	6-maio-1994 ⁵	25-julho-1994 ⁶	oito
<i>Maio/Junho-1994</i>	6-maio-1994 ⁵	9-julho-1994	oito

* índices iguais indicam as datas repetidas

Além dos períodos de ocorrência dos desbastes, outros fatores foram levados em consideração na seleção das datas de passagem, os quais encontram-se listados a seguir, juntamente com o critério adotado para definição dos limites que asseguraram uma boa qualidade visual das imagens:

- 1) Nível de visibilidade: todas as datas de passagem apresentaram nível de visibilidade 6 ou 7 (Tabela 3.3);
- 2) Cobertura de nuvens: foram escolhidas passagens com cobertura de nuvens entre 10 e 30%, exceção feita para três datas: duas com 40% e outra com 50% de cobertura, que após análise visual dos “quick-looks”, mostraram-se livres de nuvens sobre a área de estudo e com nível de visibilidade satisfatório (6 ou 7) (Tabela 3.3);
- 3) Distância temporal do mês de desbaste: as imagens foram referentes a no máximo dois meses imediatamente anteriores e posteriores à realização dos desbastes, de modo que não houvessem diferenças radiométricas muito grandes entre as datas, devido às diferentes inclinações do Sol ao longo do ano e ao crescimento dos talhões. No entanto, aproveitando a disponibilidade de imagens e de informações relativas aos desbastes, puderam ser aproveitados alguns talhões nos quais a diferença entre as datas de passagem anterior/posterior e as datas de desbaste variou de três a seis meses. Visto que antes do desbaste as variações de biomassa nos talhões não são muito grandes, a tolerância foi maior, não ultrapassando, porém, os seis meses. Já depois do desbaste, quando há uma saída considerável de biomassa do talhão, sendo esta a situação de interesse do trabalho, apenas em um talhão as datas se distanciavam mais que dois meses.

TABELA 3.3 - COBERTURA DE NUVENS E NÍVEIS DE VISIBILIDADE DAS DATAS DE PASSAGEM SELECIONADAS

DATAS DE PASSAGEM	COBERTURA	VISIBILIDADE
-------------------	-----------	--------------

<i>19-julho-1992</i>	20%	7
<i>21-setembro-1992</i>	30%	7
<i>17-abril-1993</i>	30%	6
<i>6-julho-1993</i>	10%	7
<i>7-agosto-1993</i>	10%	7
<i>11-novembro-1993</i>	40%	7
<i>6-maio-1994</i>	50%	6
<i>9-julho-1994</i>	10%	7
<i>25-julho-1994</i>	40%	7

3.3 - Fluxograma de Atividades

O fluxograma a seguir mostra a seqüência das atividades desenvolvidas, ressaltando que os procedimentos relativos às imagens orbitais foram igualmente aplicados em todas as datas de passagem.

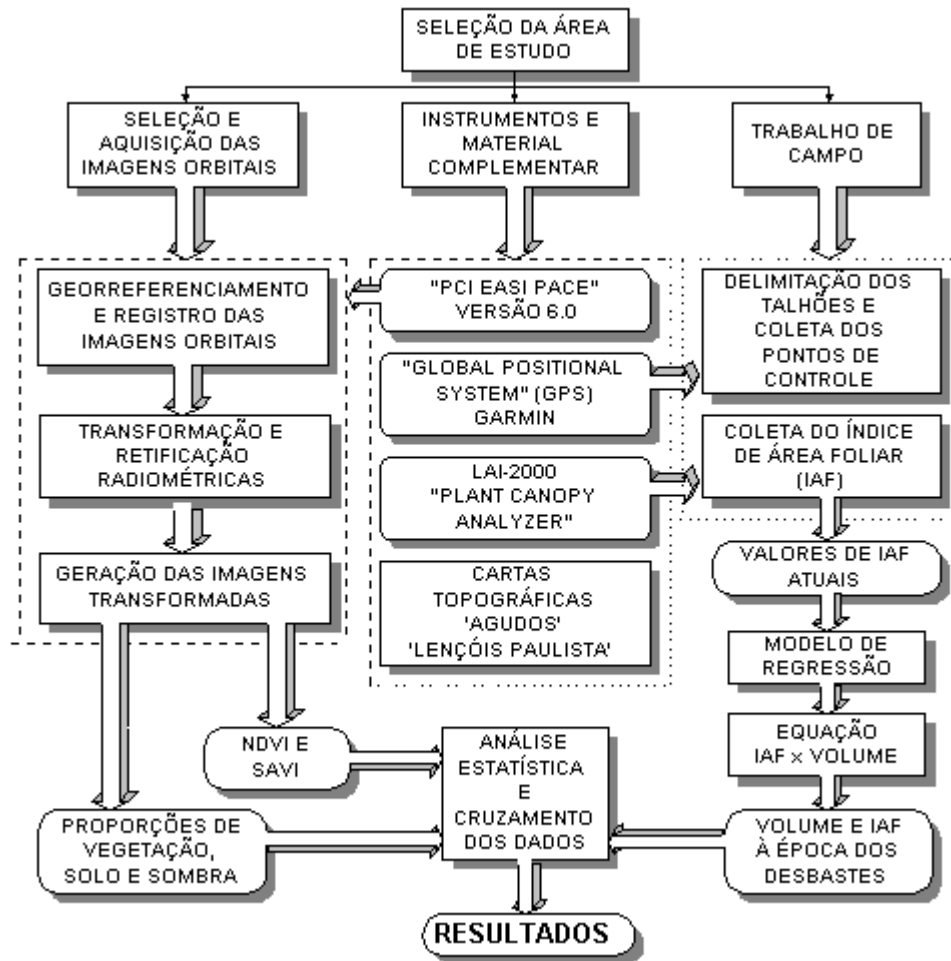


Fig. 3.2 - Fluxograma de atividades.

3.4 - Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi realizado na Fazenda Monte Alegre, em junho de 1996, num período de oito dias, englobando duas atividades independentes:

- 1) coleta de valores amostrais de IAF;
- 2) coleta das coordenadas geodésicas dos vértices dos talhões desbastados e dos pontos de controle a serem utilizados no georreferenciamento.

3.4.1 - Índice de Área Foliar (IAF)

O objetivo principal desta atividade foi estabelecer uma relação entre IAF e VOLUME, utilizando os valores de IAF coletados em campo e os volumes **atuais** (em junho de 1996), provenientes do mesmo grupo de talhões.

Para a coleta e registro dos valores de IAF foi utilizado o equipamento **LAI-2000 “Plant Canopy Analyzer”**, da LI-COR. De acordo com sugestões fornecidas pelo manual deste instrumento, foi realizada uma sequência de 6 medidas dentro de um talhão escolhido aleatoriamente, com o objetivo de definir o número de repetições internas ao talhão necessárias para uma amostragem satisfatória e confiável para o cálculo do IAF. A partir do valor de IAF obtido e do desvio padrão, foi calculada a razão (desvio padrão/IAF) e o resultado, segundo tabela do próprio manual, indicou 8 como o número mínimo de repetições internas. No entanto, para uma amostragem mais confiável, decidiu-se por triplicar este valor, sendo realizadas entre 24 e 30 medidas internas em cada talhão, para o cálculo do IAF.

Apenas um LAI-2000 foi utilizado para obter os valores de IAF, sendo necessário coletar as medidas externas e internas ao talhão com o mesmo instrumento. Para isso, foram identificadas, com auxílio do mapa da fazenda, áreas suficientemente abertas para a coleta da medida externa e que fossem próximas dos talhões onde seriam obtidas as medidas internas, para que a iluminação não mudasse muito durante o período de tempo empregado no trajeto entre um local e outro.

O procedimento em campo consistiu na realização de uma medida externa, na área aberta, seguida das medidas internas nos talhões. Estabeleceu-se um esquema de três transectos, com 8 a 10 medidas cada um, em três diferentes locais dentro do talhão, procurando distanciá-los o máximo possível. As medidas internas foram tomadas ao longo dos transectos, a cada metro, aproximadamente, com o sensor sempre na mesma direção (Figura 3.3). Foi adotada a recomendação para plantios comerciais e florestais, de tomada de medidas em quatro posições ao longo das linhas

de plantio: uma dentro, outra $\frac{1}{4}$ fora, uma totalmente fora e a última $\frac{3}{4}$ fora da linha de plantio, para evitar que as mesmas plantas dominem a resposta. Finalmente, realizava-se outra medida externa, na mesma área aberta. As duas medidas externas de referência apresentaram diferenças devido às mudanças nas condições de iluminação. Para o cálculo do IAF, o próprio equipamento realizou uma interpolação destas duas medidas. Tanto para medidas externas, quanto para as internas, foi utilizada uma máscara de 45° para cobertura da lente do sensor óptico, com o objetivo de atenuar a influência do corpo do operador. Foram amostrados 37 talhões e em todos foi adotado este mesmo procedimento. Os talhões amostrados em campo não foram necessariamente os mesmos dos quais se dispunha dos dados de desbastes e que foram utilizados na seleção das imagens orbitais, por se tratar de um processo independente da extração de valores radiométricos.

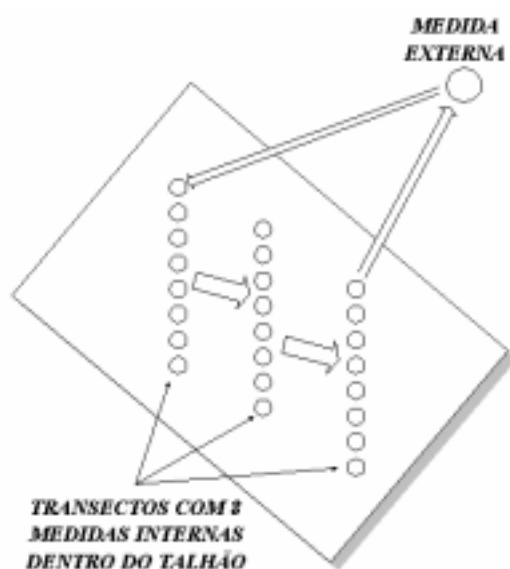


Fig. 3.3 - Esquema ilustrativo dos transectos dentro do talhão.

Segundo o manual do LAI-2000, recomenda-se seu uso com o céu nublado, i.e., com radiação difusa, para que haja pouco espalhamento da REM pela folhagem. Em dias claros, o espalhamento é maior, aumentando a radiação embaixo do dossel e subestimando o IAF. Caso seja inevitável esta condição, uma das sugestões fornecidas pelo manual é a utilização do equipamento no início do dia ou no final da tarde, quando o ângulo de elevação solar é baixo. Durante o trabalho de campo, o céu ficou nublado apenas durante um dia e meio. Nos demais, ocorreu céu limpo ou chuva. Nos dias de céu limpo, seguiu-se as sugestões do manual e as medidas foram realizadas até no máximo às 9 horas da manhã e a partir das 16 horas da tarde.

Os valores de IAF coletados e arquivados pelo LAI-2000 foram visualizados diretamente no visor do aparelho e transcritos para uma planilha, ao final de cada dia de trabalho. A primeira providência foi relacionar estes valores de IAF com os volumes, denominados **atuais**, dos mesmos talhões amostrados em campo, para estabelecimento de uma relação entre estas variáveis. Os volumes atuais foram estimados, para a mesma época do campo (junho de 1996), a partir dos volumes posteriores aos desbastes, das suas datas de realização e dos dados de **Incremento Médio Anual (IMA)**, todos fornecidos pela empresa. Através de regressão linear, foi obtida uma equação que relacionou as duas variáveis (VOL x IAF), a partir da qual poderiam ser resgatados os IAF's de cada talhão à época do desbaste (antes e depois), fornecendo como entrada os dados de volume disponíveis (Figura 3.4).

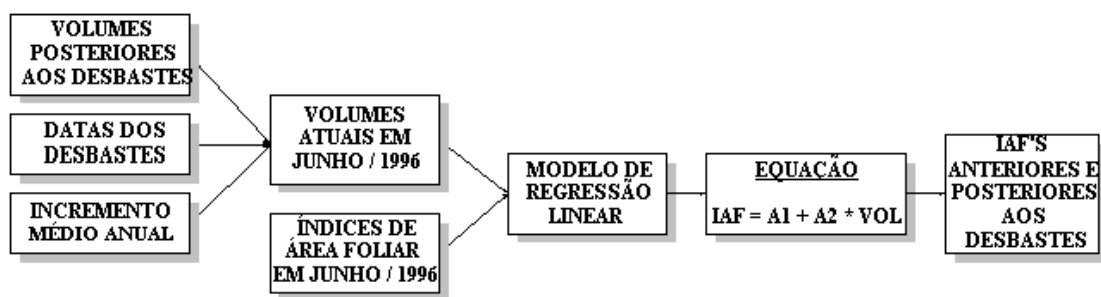


Fig. 3.4 - Obtenção dos IAF's via modelo.

3.4.2 - Coordenadas Geodésicas

Esta etapa consistiu na obtenção das coordenadas geodésicas dos vértices de todos os talhões que haviam sido desbastados, com o objetivo de recuperar seus contornos sobre as imagens orbitais. Uma vez conhecidos os posicionamentos de cada talhão, foi possível a extração de dados das imagens transformadas, incluindo o contorno de seus limites, minimizando a contaminação de bordadura. Ainda nesta etapa, também foram coletadas as coordenadas geodésicas dos pontos de controle, para posterior georreferenciamento das imagens.

Foi utilizado um aparelho de **“Global Positional System” (GPS)**, da marca GARMIN, do tipo diferencial, que permite uma precisão de até 1,40 metros. Este GPS funciona através de dois aparelhos: o **base**, que permanece fixo em um ponto, de coordenadas geodésicas conhecidas (de preferência um marco geodésico), coletando pontos a intervalos constantes, para posterior processamento diferencial; e o **“rover”**, através do qual o usuário coleta os pontos de interesse. Pelo fato do GPS Base ter que ficar em um ponto fixo ao longo de todo o dia, enquanto são realizadas as medições, este ponto deveria ser um local seguro, devido ao alto custo do aparelho.

No entanto, não havia um marco geodésico dentro da fazenda, apenas na cidade de Agudos. A solução adotada e recomendada pelo manual quando na ausência de um marco geodésico, foi deixar o GPS coletando pontos durante um dia inteiro num local escolhido para ser o **ponto de coordenadas conhecidas**, neste caso, o telhado do alojamento da Fazenda Monte Alegre. Ao final de um dia, dezenas de pontos haviam sido coletados, os quais foram considerados tanto como dados **base**, quanto como dados **“rover”** no processamento para o cálculo da coordenada geodésica. Este procedimento forneceu, com uma precisão de 1,40 metros, a coordenada geodésica do telhado do alojamento, que foi considerada como um ‘marco geodésico’ para o processamento posterior dos dados.

Os talhões apresentavam, na sua maioria, formatos geométricos, permitindo que seus contornos pudessem ser recuperados apenas a partir das quinas dos mesmos. Assim, foram coletados pontos nessas quinas, a cada segundo, durante três minutos, totalizando 180 pontos, em média, para o cálculo da coordenada geodésica de cada quina.

Para as coordenadas geodésicas dos pontos de controle, que serviram para o georreferenciamento das imagens orbitais, o GPS coletou pontos durante cinco minutos, totalizando 300 pontos, em média, para garantir uma maior precisão. O objetivo foi coletar 11 pontos de controle para a utilização de um polinômio de 3^o grau no georreferenciamento. Estes pontos foram escolhidos a partir do mapa da fazenda, consistindo em pontos estáveis ao longo do tempo, geralmente em cruzamentos importantes da fazenda, visíveis nas imagens e de fácil localização em campo. Estes pontos estavam espalhados por toda extensão da área de estudo, permitindo o melhor georreferenciamento possível.

Através de um “software” específico do instrumento, os dados puderam ser transferidos do GPS para um microcomputador e deste para disquetes, ao final de cada dia de trabalho. Este mesmo “software” permitiu a visualização espacial dos pontos coletados e da média adquirida. Após o trabalho de campo, os arquivos foram abertos num editor de texto comum e as coordenadas foram resgatadas, para posterior localização nas imagens.

3.5 - Processamento dos Dados Orbitais

O primeiro passo da etapa orbital consistiu na obtenção de um módulo da imagem original, contendo a área de estudo, visando diminuir o volume de dados e, conseqüentemente, o tempo de processamento das etapas seguintes. O módulo foi definido e recortado, apresentando um tamanho de 810 colunas x 994 linhas. Apesar dos módulos incluírem a área de estudo e possuírem o

mesmo tamanho, estavam um pouco deslocados no espaço devido às distorções geométricas durante a captação do sinal pelo sensor. Em seguida, foi realizada a conversão das imagens do formato **grib** (*.grb) para o formato **sitim** (*.i), de modo a permitir o processamento no “**PCI Easi Pace**”, versão 6.0 (dez/1995), onde foram realizadas todas as etapas seguintes.

3.5.1 - Georreferenciamento e Registro das Imagens Orbitais

Uma das datas de passagem (7 de agosto de 1993) foi georreferenciada, através de um modelo matemático polinomial de 1^o grau do PCI, utilizando os dez pontos de controle coletados em campo. Como não havia preferência para a data a ser georreferenciada, foi escolhida a de 7 de agosto de 1993 por ser a primeira quando da listagem dos arquivos das imagens. O georreferenciamento permitiu a localização e a visualização dos contornos dos talhões, a partir de suas coordenadas geodésicas, também obtidas em campo. Em seguida foi realizado um registro imagem-imagem das onze datas restantes, em relação à data georreferenciada, através de interpolação pelo vizinho mais próximo, utilizando um polinômio de 1^o grau.

3.5.2 - Adequação Radiométrica

Pelo fato deste trabalho envolver dados multitemporais e de acordo com as limitações e os problemas expostos no Item 2.3.1, todas as imagens passaram por um processo de adequação radiométrica, que englobou dois processos: a conversão de valores digitais para valores de reflectância, utilizando as relações propostas por Markham e Barker (1986) e a retificação radiométrica, segundo a metodologia apresentada por Hall *et al.* (1991).

A conversão radiométrica consistiu, inicialmente, na conversão dos valores digitais das imagens brutas em valores de radiância, utilizando a seguinte equação, descrita em detalhes no Item 2.3.1, para cada uma das bandas:

$$L_i = \left(\frac{VD_i}{255} \right) \cdot (L_{maxi} - L_{mini}) + L_{mini} \quad (3.1)$$

onde:

i = banda;

VD_i = valor digital do pixel, na banda i.

Os valores de L_{máx} e L_{mín} de calibração do TM/Landsat 5 encontram-se listados na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 - VALORES DE $L_{MÁX}$ E $L_{MÍN}$ (EM $W/m^2 sr$) UTILIZADOS NA CONVERSÃO PARA RADIÂNCIA

BANDA TM	$L_{MÁX}$ ($W/m^2 sr$)	$L_{MÍN}$ ($W/m^2 sr$)
<i>1</i>	15,21	-0,15
<i>2</i>	29,68	-0,28
<i>3</i>	20,43	-0,12
<i>4</i>	20,62	-0,15
<i>5</i>	2,719	-0,037
<i>7</i>	1,438	-0,015

Finalmente, os valores de radiância foram convertidos em valores de reflectância, a partir dos valores de irradiância solar (E) para cada banda do TM/Landsat 5 (Tabela 3.5), utilizando a seguinte equação, também descrita mais detalhadamente no Item 2.3.1:

$$R_i = \left[\frac{(L_i \cdot \pi \cdot D^2)}{(E_i \cdot \cos zen)} \right] \cdot 255 \quad (3.2)$$

onde:

i = banda;

D = distância Sol-Terra $\cong 1$

zen = ângulo zenital solar do horário da data de passagem, calculado pelo programa a partir do ângulo de elevação solar fornecido, em radianos.

TABELA 3.5 - VALORES DE IRRADIÂNCIA (EM W/sr) UTILIZADOS NA CONVERSÃO PARA REFLECTÂNCIA

BANDA TM	IRRADIÂNCIA (W/sr)
<i>1</i>	195,7
<i>2</i>	182,9
<i>3</i>	155,7
<i>4</i>	104,7
<i>5</i>	21,93
<i>7</i>	7,452

Estas duas transformações foram realizadas através do programa **reflete**, que exige como parâmetros de entrada os ângulos de elevação solar em radianos das datas de passagem, os quais encontram-se listados na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 - ÂNGULOS DE ELEVAÇÃO SOLAR (EM GRAUS) DAS DATAS DE PASSAGEM

DATAS DE PASSAGEM	ÂNGULO DE ELEVAÇÃO SOLAR
<i>19-julho-1992</i>	30 ^o
<i>21-setembro-1992</i>	46 ^o
<i>17-abril-1993</i>	38 ^o
<i>6-julho-1993</i>	29 ^o
<i>7-agosto-1993</i>	33 ^o
<i>11-novembro-1993</i>	55 ^o
<i>6-maio-1994</i>	34 ^o
<i>9-julho-1994</i>	28 ^o
<i>25-julho-1994</i>	30 ^o

Os valores de reflectância foram multiplicados por 255, de modo que apresentassem a mesma amplitude dos valores digitais das imagens brutas.

O segundo passo da adequação radiométrica foi a retificação radiométrica, que consistiu numa normalização de todas as imagens pela imagem com melhor qualidade visual. Todas as imagens foram analisadas visualmente através de composições coloridas nas bandas 3 (B), 4 (R) e 5 (G) e a data escolhida para ser a imagem referência foi a de 9 de julho de 1994. Isto permitiu que as imagens multitemporais utilizadas apresentassem uma resposta radiométrica tal como se tivessem sido obtidas pelo mesmo sensor, nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação da imagem referência. Portanto, assumiu-se que as diferenças radiométricas existentes entre elas foram devido apenas às diferenças no alvo, ao longo do tempo.

Inicialmente foram escolhidos os conjuntos de pontos de controle claros e escuros, correspondentes aos extremos do espaço bidimensional **“Greenness-Brightness”** de Kauth-Thomas (Kauth e Thomas, 1976). Estes pontos são relativos a áreas não-vegetadas, com insignificante ou nenhuma mudança ao longo do tempo e portanto com pouca ou nenhuma diferença em seus valores de reflectância. Para a área de estudo em questão, os pontos de controle claros corresponderam a áreas de solo exposto e os pontos de controle escuros, a corpos d’água limpos. No entanto, isto não é válido para qualquer cena, podendo haver alterações quanto à natureza dos alvos claros e escuros de uma cena para outra. Para esta escolha foram geradas as imagens **“Greenness”** (GR) e **“Brightness”** (BR) para cada data de passagem, através da aplicação de um modelo específico, para posterior extração dos pontos de controle. Existia um conjunto de pontos claros e escuros para a imagem GR, assim como para a imagem BR, para cada data de passagem. Estes pontos foram determinados através de fatiamentos realizados nas imagens GR e BR, sendo que para os pontos claros, foram escolhidos os intervalos de valores reflectância mais altos e para os escuros, os mais baixos. A máscara gerada para o conjunto de pontos claros da imagem GR,

de uma determinada data de passagem, foi cruzada com a máscara de pontos claros da imagem BR, desta mesma data de passagem. Este cruzamento deu origem a uma nova máscara, referente aos pontos claros da referida data de passagem. O mesmo foi realizado para os pontos escuros, gerando uma máscara dos pontos escuros daquela data de passagem. Por fim, estas máscaras foram sobrepostas às imagens-reflectância e foram extraídas suas médias (Figura 3.5). Este procedimento foi adotado na íntegra para todas as datas de passagem. As médias correspondentes à imagem de 9 de julho de 1994 serviram de referência para a retificação das demais datas. O modelo exige como dado de entrada as médias da imagem a ser retificada e as médias da referência. O método consiste em aproximar ou igualar as médias dos pontos de controle claros e escuros de cada data de passagem com as médias da imagem referência, através das equações apresentadas no Item 2.3.1.

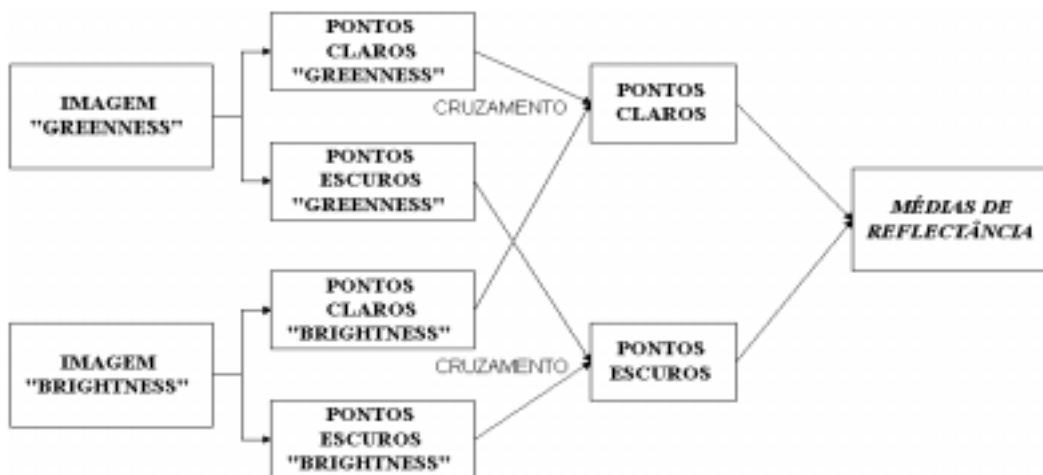


Fig. 3.5 - Esquema da determinação dos conjuntos de pontos de controle claros e escuros para cada data de passagem.

Para avaliar a qualidade da retificação, foram adotados três critérios: a) análise visual das imagens retificadas; b) sobreposição dos diagramas de dispersão dos pontos de controle (banda 3 x banda 4) de todas as datas de passagem e c) comparação das médias de reflectância dos pontos de controle claros e escuros, de cada data de passagem, antes e depois da retificação, com as médias da imagem referência. A análise visual das imagens consistiu em comparar visualmente as imagens retificadas com a imagem referência e foi realizada de três formas: banda a banda, com e sem contraste e por composição colorida das bandas 3 (B), 4 (R) e 5 (G). Na etapa de sobreposição dos diagramas de dispersão procurou-se observar a ocorrência de possíveis deslocamentos entre as nuvens de pontos, correspondentes às várias passagens, decorrentes da não-igualdade das médias. Por fim, as médias retificadas foram comparadas com as médias da imagem referência, aceitando-se

como resultado satisfatório a ocorrência de médias depois da retificação com diferenças abaixo de um (1) com relação às médias da referência.

Pelo fato deste trabalho consistir em um estudo comparativo, através da análise de imagens multitemporais para detecção de alterações, ou seja, uma análise apenas em termos relativos e não absolutos, não foi realizada qualquer correção atmosférica nas imagens.

3.5.3 - Geração das Imagens-Índice de Vegetação

Após a correção e a retificação radiométricas das imagens, as mesmas estavam adequadamente corrigidas para a geração das imagens-índice de vegetação (através da equação para obtenção do NDVI e do SAVI) e imagens-proporção (através da aplicação do modelo de mistura espectral).

Foram geradas dois tipos de imagens-índice de vegetação: as imagens-NDVI e as imagens-SAVI, a partir da aplicação dos modelos específicos para estes índices, conforme as equações abaixo.

$$\text{NDVI} = \left[\frac{(\text{IVP} - \text{VM})}{(\text{IVP} + \text{VM})} \right] \cdot 127 + 128 \quad (3.3)$$

$$\text{SAVI} = \left\{ \left[\frac{(\text{IVP} - \text{VM})}{(\text{IVP} + \text{VM} + 0,5)} \right] \cdot 1,5 \right\} \cdot 127 + 128 \quad (3.4)$$

onde:

IVP = valor de reflectância na banda do infravermelho próximo;

VM = valor de reflectância na banda do vermelho.

Em ambas as equações foi aplicado um ganho de 127 e um “offset” de 128, de modo que as imagens apresentassem uma maior amplitude dos valores, facilitando sua discriminação visual e análise.

Na equação do SAVI, o valor 0,5 refere-se ao valor da constante “L”, em função da cobertura do solo. De acordo com Huete (1988), utiliza-se $L = 0$ para uma alta densidade de vegetação e pouca exposição do solo e $L = 1$, para densidades de vegetação mais baixas e uma exposição do solo maior. Ainda segundo este autor, valores ótimos de “L” variam de acordo com a densidade de vegetação, sendo que atualmente existem três valores de “L” considerados como ótimos fatores de ajuste: $L = 1$ (densidades muito baixas), $L = 0,5$ (densidades médias de vegetação)

e $L = 0,25$ (densidades muito altas). Assim, foi adotado o valor de $L = 0,5$ por ser indicado por Huete (1988) na redução da interferência do solo. O valor 1,5 da fórmula do SAVI é referente à constante “L” + 1, integrante da fórmula.

Ao final deste processo foram geradas vinte imagens-índice de vegetação: dez imagens-NDVI e dez imagens-SAVI.

3.5.4 - Geração das Imagens-Proporção

Para geração das imagens-proporção, foram considerados três componentes dentro do pixel: **vegetação** (VEG), que neste trabalho consiste apenas em Pinus spp., **solo** (SOLO) e **sombra/água** (SOMB). O primeiro passo foi escolher os pixels puros, representativos destes três componentes, seguido da definição de seus valores de reflectância para cada banda, para finalmente aplicar o modelo de mistura espectral.

A escolha dos pixels puros de VEG e de SOLO foi realizada em três etapas: análise do diagrama de dispersão das bandas do vermelho e do infravermelho próximo, análise visual dos alvos nas imagens e análise das curvas de reflectância em todas as imagens. A partir do diagrama foi possível selecionar os intervalos de reflectância referentes aos alvos de vegetação e de solo. O conhecimento da verdade terrestre da área de estudo, ainda que pequeno, ajudou na escolha inicial destes componentes puros a partir das imagens. Em seguida à análise visual, foram analisadas as curvas de reflectância dos pixels escolhidos, para verificar se apresentavam uma forma típica do objeto analisado.

Foi escolhido o algoritmo de Componentes Principais para resolução do sistema de equações do modelo de mistura, utilizando-se as seis bandas espectrais descritas no Item 3.2.

3.5.5 - Composição das Máscaras dos Talhões

Com o objetivo de extrair as médias de índice de vegetação e de proporção de componentes de cada talhão, a partir das imagens transformadas, foram geradas máscaras para cada um dos talhões. As coordenadas geodésicas coletadas em campo foram listadas em um arquivo, repetindo-se a primeira coordenada de cada talhão ao final das demais, de modo que ficasse caracterizado um polígono. Este arquivo foi executado pelo PCI, gerando um conjunto de polígonos fechados representando os talhões, os quais foram plotados sobre as imagens. Em seguida as máscaras foram criadas dentro dos limites destes polígonos, assegurando que as médias fossem provenientes apenas dos talhões.

3.6 - Tratamento Estatístico dos Dados

O primeiro passo no tratamento dos dados foi a extração das médias de NDVI, de SAVI e das proporções de VEG, de SOLO e de SOMB, para cada um dos talhões, antes e depois dos desbastes, com o objetivo de comparar os valores nestas duas situações. Para obter estas médias, as máscaras geradas para cada talhão foram sobrepostas às imagens à época dos desbaste e os valores obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas. Portanto, para a análise estatística dos dados dispunha-se das seguintes variáveis:

- 1) Volumes anteriores e posteriores;
- 2) NDVI's anteriores e posteriores;
- 3) SAVI's anteriores e posteriores;
- 4) Proporção de vegetação anteriores e posteriores;
- 5) Proporção de solo anteriores e posteriores;
- 6) Proporção de sombra/água anteriores e posteriores.

O objetivo principal do trabalho foi avaliar a sensibilidade das imagens-índice de vegetação e das imagens-proporção para detectar variações no volume de madeira, a partir de variações no valor de IAF, representado pelas imagens transformadas. Para esta avaliação, o procedimento adotado consistiu em três etapas:

- 1) Análise de variância dos dados obtidos, considerando-se dois tratamentos, anterior (44 amostras) e posteriormente (44 amostras) aos desbastes, com o objetivo de detectar diferenças significativas entre as médias destas duas ocasiões;
- 2) Identificação dos talhões, segundo a dinâmica dos valores de NDVI/SAVI e de VEG, sem distinção entre situação anterior e posterior aos desbastes (88 amostras), nos gráficos de dispersão NDVI x VOL e VEG x VOL, com o objetivo de identificar o ponto de saturação do NDVI e de VEG;
- 3) Análise dos gráficos de dispersão e das matrizes de correlação das variáveis, também sem distinção entre situação anterior e posterior aos desbastes (88 amostras), com o objetivo de observar seus comportamentos.

Inicialmente foram aplicadas sete ANOVAS, para cada uma das variáveis mencionadas anteriormente, a fim de identificar diferenças significativas entre as médias anteriores e posteriores aos desbastes, que indicariam sobre a sensibilidade das imagens à saída de volume. Um exemplo da ANOVA aplicada pode ser visualizada a seguir:

	GRAUS DE LIBERDADE (GL)	SOMA DOS QUADRADOS (SQ)	QUADRADOS MÉDIOS (QM)	F
TRATAM.	1	$1/N [(\sum x_a)^2 + (\sum x_p)^2] - c$	SQT / GLT	QMT/QMR
RESÍDUO	2N - 2	SQ Total - SQ	SQR / GLR	
TOTAL	2N - 1	$\sum (x^2) - c$		

Fig. 3.6 - Exemplo da ANOVA aplicada às variáveis.

Um pré-requisito para a aplicação de ANOVAS para testar diferenças estatísticas entre médias, é a realização do **teste de igualdade de variâncias**. Este teste foi aplicado para cada variável, com o objetivo de detectar diferenças estatísticas entre as variâncias antes e depois do desbaste. Consiste na razão da maior variância pela menor variância, dos dois tratamentos testados, neste caso, as situações anterior e posterior ao desbaste, de acordo com a equação:

$$\frac{\text{Variância Maior}}{\text{Variância Menor}} = F \text{ máximo} \quad (3.5)$$

Valores de “F máximo” significativos neste teste de igualdades indicam diferenças entre as variâncias, sendo realizado, então, um **teste de médias para duas amostras de variâncias diferentes**, segundo, Sokal e Rohlf (1969), em substituição à aplicação das ANOVAS. Este teste consiste na seguinte equação:

$$\frac{(\text{Média Anterior} - \text{Média Posterior})}{\sqrt{\frac{(\text{Variância Anterior} + \text{Variância Posterior})}{n}}} = T \quad (3.6)$$

onde:

n = número de talhões por tratamento.

Para valores de “T” significativos, as médias anteriores foram consideradas diferentes das posteriores.

A partir dos resultados obtidos pelas ANOVAS e pelos testes de médias, foi possível inferir sobre a sensibilidade das imagens transformadas à saída de volume de madeira.

A segunda etapa incluiu a geração de gráficos e matrizes de correlação dos valores médios de todas as variáveis (Tabela 3.7), com o objetivo de verificar seus comportamentos, possíveis correlações das variáveis entre si e o grau de correlação entre os dados de inventário, os de campo e os valores das imagens orbitais. Nesta etapa, os talhões foram agrupados segundo a dinâmica dos valores de NDVI e este agrupamento serviu de base para a identificação de um

possível ponto de saturação, caracterizado pelo valor de volume/IAF, a partir do qual a tendência dos valores de NDVI mostraria-se contrária à esperada, ou seja, aumentariam com a diminuição dos volumes de madeira. O mesmo procedimento foi adotado com os valores de VEG, finalizando a terceira etapa e conseqüentemente, a análise estatística dos resultados.

TABELA 3.7 - GRÁFICOS E MATRIZES DE CORRELAÇÃO GERADOS

1. VOLUME x NDVI
2. VOLUME x SAVI
3. VOLUME x VEG
4. VOLUME x SOLO
5. VOLUME x SOMB
6. NDVI x SAVI
7. NDVI x VEG
8. VEG x SOLO
9. VEG x SOMB

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Trabalho de Campo

4.1.1 - Índices de Área Foliar

Os valores de IAF obtidos em campo (junho de 1996) para os 37 talhões situaram-se entre 1,79 e 3,50, conforme pode ser observado na Tabela 4.1. Valores de IAF igualmente baixos também foram encontrados por Curran *et al.* (1992) e Gong *et al.* (1992), para *Pinus elliottii* (2,52 a 4,07) e *Pinus ponderosa* (0,87 a 2,72), respectivamente. Gower e Norman (1991) utilizaram o LAI-2000 para estimativas indiretas de IAF em plantios de coníferas e compararam estes valores com os obtidos através de método diretos. Concluíram que o LAI-2000 subestima em 35 a 40% os valores de IAF relativos a coníferas, o que explica os baixos valores de IAF encontrados em campo, apesar da alta densidade de vegetação nos talhões estudados. Segundo os autores, o arranjo das acículas em grupos e eventuais sobreposições podem explicar a subestimativa do IAF.

TABELA 4.1 - VALORES DE IAF OBTIDOS EM CAMPO

TALHÃO	IAF	DESVI	TALHÃO	IAF	DESVIO	TALHÃO	IAF	DESVIO	TALHÃO	IAF	DESVI
<i>8a</i>	2,34	0,06	<i>46a</i>	2,39	0,13	<i>81</i>	2,82	0,05	<i>114a</i>	3,35	0,05
<i>8d</i>	2,62	0,04	<i>46b</i>	1,99	0,06	<i>86</i>	2,41	0,08	<i>116</i>	2,98	0,05
<i>30c</i>	2,83	0,08	<i>46c</i>	2,16	0,15	<i>88</i>	2,26	0,11	<i>117</i>	2,97	0,06
<i>31</i>	2,54	0,09	<i>48</i>	3,37	0,08	<i>99a</i>	2,36	0,05	<i>2c</i>	3,4	0,07
<i>37</i>	1,79	0,06	<i>49</i>	2,67	0,07	<i>99e</i>	2,25	0,06	<i>55</i>	2,57	0,1
<i>38</i>	3,09	0,05	<i>50</i>	2,84	0,12	<i>100</i>	2,48	0,05	<i>58a</i>	2,31	0,1
<i>40b</i>	3,43	0,05	<i>51</i>	1,89	0,06	<i>101</i>	2,36	0,06	<i>62c</i>	2,15	0,08
<i>41a</i>	2,66	0,07	<i>52</i>	3,11	0,07	<i>102</i>	3,27	0,1	<i>36a</i>	1,86	0,09
<i>44b</i>	3,2	0,07	<i>56a</i>	2,39	0,06	<i>104a</i>	3,5	0,08	<i>76</i>	3,09	0,08
<i>112d</i>	2,25	0,04									

Gower e Norman (1991) sugerem a multiplicação dos valores encontrados via LAI-2000 por um fator de correção, de modo a estimar os verdadeiros valores de IAF. Para coníferas, este fator equívale a 1,5 e a multiplicação dos dados obtidos em campo por esta constante deslocaria o intervalo de IAF para 2,7 a 5,3; mais condizentes com a realidade. Portanto, para o estabelecimento da relação VOL x IAF, descrito mais adiante, este procedimento não foi adotado, utilizando-se os próprios valores encontrados com o LAI-2000, pois a ocorrência de IAF's baixos não inviabilizou a obtenção da equação. Entretanto, durante a análise estatística das imagens-índice e das imagens-proporção, foram considerados os valores multiplicados por 1,5 por estarem mais próximos de seus valores reais.

Ainda com relação aos dados de campo, nota-se pela Tabela 4.1 que os desvios não foram muito altos (0,04 a 0,15), que segundo Gower e Norman (1991) é devido ao fato do LAI-2000 utilizar uma lente do tipo “olho-de-peixe”, que garante boa amostragem (Item 2.3). Todos os dados relativos ao trabalho de campo podem ser conferidos no Apêndice A.

De acordo com o procedimento descrito no Item 3.4.1, os dados de IAF adquiridos em campo e os volumes atuais foram utilizados em um modelo de regressão linear, para estabelecer uma equação que descrevesse uma relação entre ambos. A equação obtida e a plotagem dos pontos indicaram uma correlação positiva entre IAF e volume, de acordo com a Figura 4.1:

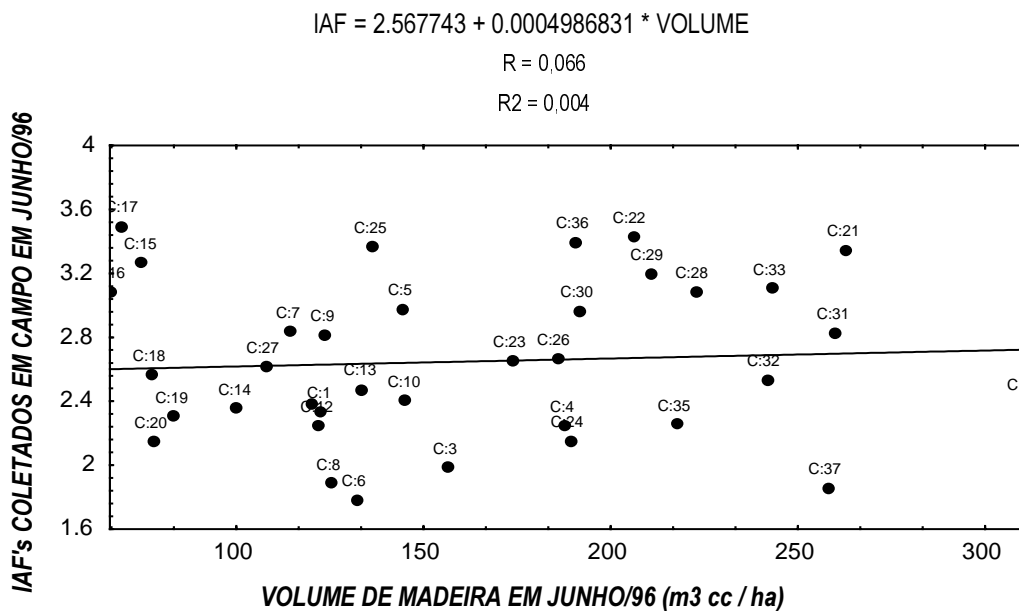


Fig. 4.1 - Equação e diagrama de dispersão de VOL x IAF.

Entretanto, o valor de $R = 0,066$ indicou uma baixa correlação entre estas variáveis e o valor de $R^2 = 0,004$ mostra que não houve um bom ajuste da equação aos pontos. Informações obtidas da literatura consultada relatam a existência de uma forte correlação entre área foliar e área de câmbio vascular (“sapwood”) e/ou DAP, permitindo estimativas de área foliar a partir da entrada de dados de área de câmbio vascular e/ou DAP em equações alométricas (Marshall e Waring, 1986; Campbell e Norman, 1989; Chen *et al.*, 1991; Gower e Norman, 1991; Lang *et al.*, 1991; Smith *et al.*, 1991). Uma vez que a área de câmbio vascular está relacionada com o DAP e este com o volume de madeira, admite-se que o volume de madeira também está relacionado com o IAF. Isto pode ser confirmado pelo trabalho de Kuplich *et al.* (1996), que apresenta uma forte correlação entre dados de biomassa foliar e volume de madeira, ambos medidos em campo. Foi com base nesta premissa que os objetivos deste trabalho foram traçados, iniciando-se com o estabelecimento de uma equação que

relacionasse volume de madeira com IAF. Entretanto, uma vez que os valores de IAF situaram-se acima do ponto de saturação, não foi possível a detecção desta relação.

Vale salientar também que não estavam disponíveis maiores informações quanto à metodologia empregada na estimativa dos volumes fornecidos pela empresa (Apêndice B). Isto pode ter se constituído em uma fonte de imprecisão para o ajuste da equação, visto que eram desconhecidas as precisões, tanto dos volumes posteriores aos desbastes, quanto dos dados de IMA, ambos fornecidos pela empresa e utilizados no modelo (Apêndice C). Ainda, a impossibilidade da aplicação de métodos diretos para a estimativa dos valores de IAF, devido às inerentes dificuldades logísticas/operacionais e de disponibilidade de tempo para realização do trabalho, restringiu as opções a aceitar as estimativas apresentadas pelo LAI-2000, que pode ter contribuído com imprecisões inerentes ao equipamento. Outra alternativa também descartada, seria coletar dados de IAF antes e depois dos desbastes, os quais seriam relacionados com os dados de volume na mesma época. Porém, analisando a Tabela 3.2, onde estão listadas as datas de passagem utilizadas, percebe-se que esse procedimento levaria quatro anos para ser concluído.

Uma vez que o valor de R para a equação IAF x VOL foi muito baixo, decidiu-se por não resgatar os valores de IAF à época dos desbastes, trabalhando apenas com os dados de volume fornecidos pela empresa.

4.1.2 - Coordenadas Geodésicas

O número de pontos coletados pelo GPS para o cálculo de cada coordenada geodésica variou e à medida que este número aumentava, o desvio padrão diminuía. Para a maioria das coordenadas dos vértices dos talhões, os desvios situaram-se entre 10 e 25m. Nos piores casos (foram poucos), onde menos de 100 pontos foram adquiridos, o desvio padrão aumentou, não ultrapassando muito o tamanho de um pixel (30m). As coordenadas dos pontos de controle apresentaram desvios padrão entre 8 e 20m, com exceção de uma, cujo desvio foi 25m, devido a um número muito baixo de pontos adquiridos. Estes desvios foram considerados satisfatórios e a localização dos talhões juntamente com o georreferenciamento foram realizados com êxito.

4.2 - Processamento dos Dados Orbitais

4.2.1 - Georreferenciamento e Registro

A primeira fase da etapa orbital consistiu no georreferenciamento a partir de pontos de controle e no registro imagem-imagem das datas de passagem. Foi realizada uma avaliação da

qualidade destes processamentos e concluiu-se que ambos apresentaram resultados satisfatórios. Esta avaliação, para o georreferenciamento, consistiu numa análise visual da plotagem dos polígonos dos talhões sobre as imagens (Figura 4.2) e no resgate das coordenadas de seus vértices. Uma vez que estas coordenadas foram obtidas com boa precisão via GPS, como foi apresentado no Item anterior, o resgate destes pontos na tela apresentaram coordenadas muito próximas às obtidas com o GPS (diferença de segundos), assegurando o bom georreferenciamento.

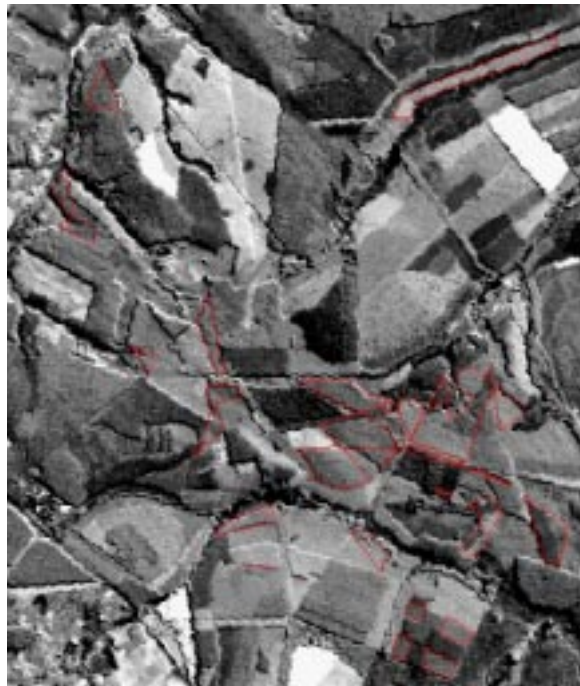


Fig. 4.2 - Plotagem dos polígonos dos talhões sobre a área de estudo.

Para avaliação do registro imagem-imagem foi realizada uma análise visual da sobreposição de todas as datas de passagem, conferindo se a localização de um mesmo elemento de resolução no terreno coincidiu em todas as datas. A exatidão obtida para o registro foi sub-pixel, considerada satisfatória.

O bom resultado destes dois processamentos permitiu uma aquisição confiável de valores radiométricos das áreas de interesse, provenientes das imagens. A seguir serão apresentados e discutidos os resultados alcançados após aplicação das metodologias propostas, na ordem em que foram realizadas cada uma das etapas.

4.2.2 - Adequação Radiométrica

A) Conversão para Reflectância

Conforme mencionado no Item 3.5.2, os valores digitais das imagens foram convertidos em valores de reflectância. Estes valores médios de reflectância extraídos de 44 talhões amostrados, estão apresentados no Apêndice D.

B) Retificação Radiométrica

Conforme mencionado no Item 3.5.2, foi realizada uma avaliação da qualidade da retificação, inicialmente a partir de uma análise visual das imagens retificadas. O método mais adequado para realizar uma comparação visual é utilizando-se as bandas originais sem contraste, pois qualquer tipo de realce altera o histograma original da imagem. No entanto, as bandas apresentaram-se muito escuras nesta situação, o que dificultou a comparação. Contudo foi possível observar que, aparentemente, as bandas das imagens retificadas estavam semelhantes com as da imagem referência (9 de julho de 1994).

Ao aplicar o contraste, diversas situações puderam ser observadas. As imagens de 7 de agosto de 1993 e de 13 de outubro de 1994 apresentaram uma grande semelhança em todas as bandas com a imagem referência. Nas demais datas de passagem, entretanto, houveram muitas diferenças e ocorreram algumas tendências nos resultados após a retificação. As bandas da região do visível (TM 1, TM 2 e TM 3) não ficaram boas, geralmente mais escuras que a referência e algumas vezes mais claras, quase brancas. A banda TM 4 (infravermelho próximo) apresentou resultados melhores, mas alguns ainda ruins. As bandas TM 5 e TM 7 (infravermelho médio) foram as mais semelhantes com a referência após a retificação.

Com relação às composições coloridas, algumas ficaram muito semelhantes com a imagem referência, outras ficaram menos semelhantes que antes da aplicação da retificação. No entanto, uma análise visual, satisfatória ou não, é insuficiente para inferir sobre o resultado de um processamento. Além disso, a metodologia consistiu em aproximar as médias de dois conjuntos de pontos, indicando que a melhor maneira para avaliar a qualidade de seus resultados é uma intercomparação dessas médias, a qual foi proposta no Capítulo 3.

Apesar do insucesso da análise visual, a comparação das médias demonstrou que os resultados da retificação foram bastante satisfatórios, uma vez que os valores médios de reflectância dos pontos de controle, claros e escuros, de todas as datas de passagem, diferiram dos da referência em décimos. Na Tabela 4.2 estão listadas as médias de reflectância dos pontos de controle, claros e escuros, da imagem referência (9 de julho de 1994), utilizadas para a retificação das demais datas de

passagem. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram as médias antes e depois da retificação, com suas respectivas diferenças para as médias da referência, apresentadas na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 - MÉDIAS DOS PONTOS CLAROS E ESCUROS DA IMAGEM REFERÊNCIA

BANDAS	PONTOS ESCUROS	PONTOS CLAROS
<i>TM 1</i>	18,505	30,833
<i>TM 2</i>	14,657	40,500
<i>TM 3</i>	11,462	44
<i>TM 4</i>	3,453	50,333
<i>TM 5</i>	0,316	78,833
<i>TM 7</i>	0,028	84,500

Obs.: médias de reflectância multiplicadas por 255.

Esta equiparação das médias foi possível de ser visualizada quando da sobreposição dos gráficos de dispersão (banda 3 x banda 4) de todas as datas de passagem, as quais apresentaram poucos deslocamentos.

TABELA 4.3 - MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DOS PONTOS DE CONTROLE CLAROS E ESCUROS ANTES DA RETIFICAÇÃO E A DIFERENÇA DAS MÉDIAS DA IMAGEM REFERÊNCIA

	PONTOS DE CONTROLE ESCUROS		PONTOS DE CONTROLE CLAROS	
	MÉDIAS	DIFERENÇA	MÉDIAS	DIFERENÇA
	<i>19-julho-1992</i>			
TM 1	20,207	1,702	27,364	-3,469
TM 2	17,272	2,615	40,636	0,136
TM 3	13,686	2,224	49,091	5,091
TM 4	10,330	6,877	54,636	4,303
TM 5	1,535	1,219	77,182	-1,651
TM 7	0,079	0,051	63,545	-20,955
	<i>21-setembro-1992</i>			
TM 1	19,660	1,155	32,167	1,334
TM 2	17,107	2,450	44,667	4,167
TM 3	13,617	2,155	53,500	9,500
TM 4	9,188	5,735	58,944	8,611
TM 5	2,476	2,160	92,167	13,334
TM 7	0,353	0,325	87,222	2,722
	<i>17-abril-1993</i>			
TM 1	18,892	0,387	31,111	0,278
TM 2	16,473	1,816	50,889	10,389
TM 3	14,454	2,992	62,000	18,000
TM 4	9,835	6,382	68,333	18,000
TM 5	1,131	0,815	80,111	1,278
TM 7	0,051	0,023	63,444	-21,056
	<i>6-julho-1993</i>			
TM 1	20,442	1,937	25,000	-5,833
TM 2	16,082	1,425	43,000	2,500
TM 3	12,463	1,001	51,600	7,600
TM 4	6,651	3,198	54,500	4,167
TM 5	0,178	-0,138	77,600	-1,233
TM 7	0,004	-0,024	61,600	-22,900
	<i>7-agosto-1993</i>			
TM 1	21,031	2,526	24,889	-5,944
TM 2	16,372	1,715	32,556	-7,944
TM 3	13,105	1,643	43,889	-0,111
TM 4	7,776	4,323	52,222	1,889
TM 5	0,707	0,391	70,556	-8,277
TM 7	0,037	0,009	116,222	31,722
	<i>11-novembro-1993</i>			
TM 1	21,039	2,534	34,083	3,250
TM 2	19,151	4,494	46,833	6,333
TM 3	16,062	4,600	57,167	13,167
TM 4	14,907	11,454	70,500	20,167
TM 5	7,198	6,882	99,000	20,167
TM 7	2,616	2,588	77,667	-6,833
	<i>6-maio-1994</i>			
TM 1	19,027	0,522	28,167	-2,666
TM 2	15,501	0,844	54,167	13,667
TM 3	11,728	0,266	57,833	13,833
TM 4	7,086	3,633	70,000	19,667
TM 5	0,512	0,196	62,000	-16,833
TM 7	0,048	0,020	84,667	0,167
	<i>25-julho-1994</i>			
TM 1	19,041	0,536	45,500	14,667
TM 2	15,299	0,642	43,000	2,500
TM 3	11,860	0,398	50,500	6,500
TM 4	4,245	0,792	55,833	5,500
TM 5	0,209	-0,107	70,333	-8,500
TM 7	0,021	-0,007	59,167	-25,333

Obs.: médias de reflectância multiplicadas por 255.

TABELA 4.4 - MÉDIAS DE REFLECTÂNCIA DOS PONTOS DE CONTROLE CLAROS E ESCUROS APÓS A RETIFICAÇÃO E A DIFERENÇA DAS MÉDIAS DA IMAGEM REFERÊNCIA

	PONTOS DE CONTROLE ESCUROS		PONTOS DE CONTROLE CLAROS	
	MÉDIAS	DIFERENÇA	MÉDIAS	DIFERENÇA
	19-julho-1992			
TM 1	18,079	-0,426	30,182	-0,651
TM 2	14,266	-0,391	40,091	-0,409
TM 3	10,695	-0,767	43,545	-0,455
TM 4	3,223	-0,230	49,909	-0,424
TM 5	0,444	0,128	78,182	-0,651
TM 7	0,086	0,058	84,000	-0,500
	21-setembro-1992			
TM 1	17,660	-0,845	30,167	-0,666
TM 2	14,107	-0,550	40,167	-0,333
TM 3	10,792	-0,670	43,500	-0,500
TM 4	3,185	-0,268	49,833	-0,500
TM 5	0,503	0,187	78,222	-0,611
TM 7	0,184	0,156	84,056	-0,444
	17-abril-1993			
TM 1	17,892	-0,613	30,111	-0,722
TM 2	14,144	-0,513	40,111	-0,389
TM 3	11,017	-0,445	43,556	-0,444
TM 4	2,804	-0,649	49,778	-0,555
TM 5	0,606	0,290	78,111	-0,722
TM 7	0,054	0,026	84,111	-0,389
	6-julho-1993			
TM 1	18,257	-0,248	30,400	-0,433
TM 2	14,082	-0,575	39,800	-0,700
TM 3	10,911	-0,551	43,600	-0,400
TM 4	2,651	-0,802	49,600	-0,733
TM 5	0,178	-0,138	78,400	-0,433
TM 7	0,004	-0,024	84,000	-0,500
	7-agosto-1993			
TM 1	18,092	-0,413	30,222	-0,611
TM 2	14,318	-0,339	39,889	-0,611
TM 3	11,105	-0,357	43,556	-0,444
TM 4	2,766	-0,687	49,889	-0,444
TM 5	0,379	0,063	78,222	-0,611
TM 7	0,013	-0,015	84,111	-0,389
	11-novembro-1993			
TM 1	18,039	-0,466	30,333	-0,500
TM 2	14,151	-0,506	40,000	-0,500
TM 3	10,899	-0,563	43,417	-0,583
TM 4	2,930	-0,523	49,833	-0,500
TM 5	0,504	0,188	78,167	-0,666
TM 7	0,357	0,329	83,917	-0,583
	6-maio-1994			
TM 1	18,035	-0,470	30,333	-0,500
TM 2	13,989	-0,668	40,000	-0,500
TM 3	10,858	-0,604	43,667	-0,333
TM 4	2,862	-0,591	49,833	-0,500
TM 5	0,426	0,110	78,167	-0,666
TM 7	0,024	-0,004	83,667	-0,833
	25-julho-1994			
TM 1	18,041	-0,464	30,333	-0,500
TM 2	14,307	-0,350	39,833	-0,667
TM 3	10,925	-0,537	43,167	-0,833
TM 4	3,216	-0,237	50,000	-0,333
TM 5	0,209	-0,107	78,333	-0,500
TM 7	0,022	-0,006	83,833	-0,667

Obs.: médias de reflectância multiplicadas por 255.

4.2.3 - Modelo de Mistura Espectral

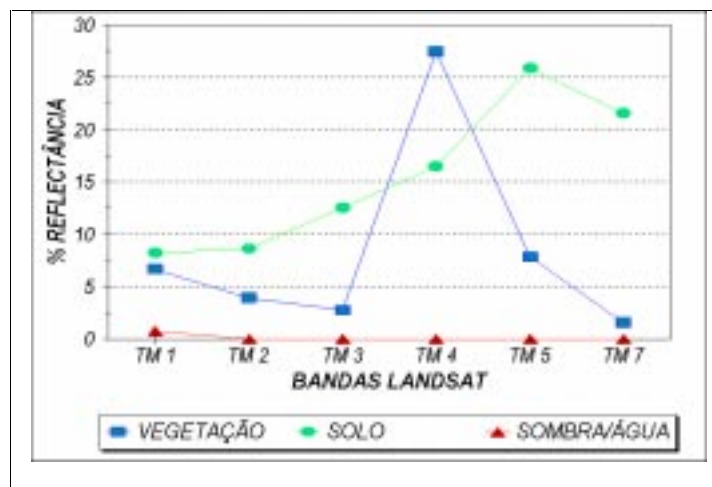
Conforme explicação do Item 3.5.4, para implementar o modelo de mistura espectral e obter as imagens-proporção, o primeiro passo consistiu na escolha dos pixels puros, representativos dos componentes a serem separados dentro do pixel.

Para o componente vegetação procurou-se escolher um pixel puro de *Pinus* spp., que foi a espécie abordada neste trabalho, dentro da área da fazenda da DURATEX FLORESTAL S.A., através do processo descrito no Item 3.5.4. Este mesmo processo foi utilizado para o componente solo. Quanto ao componente referente à sombra/água, definido apenas como sombra, não foi possível fazer a escolha diretamente das imagens, sendo utilizados os valores encontrados por Bernardes (1996). Os valores de sombra/água encontrados a partir das imagens, desequilibraram as proporções após a implementação do modelo, de modo que os valores de solo mostravam-se quase sempre negativos. Este fato revelou que o pixel puro de sombra/água não estava sendo representativo, talvez pelos alvos que deveriam ser relativos à água 'limpa' estarem incluindo corpos d'água com sedimentos, alterando as proporções do modelo.

Os valores médios de reflectância (Tabela 4.5) e as curvas de reflectância (Figura 4.3) dos pixels puros escolhidos podem ser visualizados abaixo. Com relação à curva de reflectância da vegetação, o ponto correspondente à média na banda TM 1 está mais alto devido à influência dos fatores atmosféricos, uma vez que não foi realizada qualquer correção atmosférica nas imagens orbitais.

TABELA 4.5 - VALORES MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA DOS PIXELS PUROS

	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
VEG	6,667	3,922	2,745	27,451	7,843	1,569
SOLO	8,235	8,627	12,549	16,471	25,882	21,569
SOMB	0,784	0	0	0	0	0



4.3 - Análise Estatística das Imagens Transformadas

Cada um dos 44 talhões apresentados na Tabela 4.1 foram considerados como uma unidade amostral, de um experimento inteiramente casualizado.

O primeiro passo desta análise estatística consistiu na avaliação dos volumes e das médias dos índices e das proporções extraídas das imagens transformadas para cada talhão, com o objetivo de verificar o comportamento destas variáveis. A primeira observação referiu-se aos valores extraídos das imagens. Todos os talhões sofreram uma diminuição no volume, no entanto, para um mesmo grupo de talhões, os valores de NDVI e de SAVI aumentaram (16 talhões), diminuindo para o restante (28 talhões); o mesmo ocorrendo com os valores de VEG, porém para outro grupo de talhões (30 talhões aumentaram e 14 diminuíram) (Apêndice E). A princípio, este comportamento foi atribuído à ocorrência de sombras, que devem ter influenciado de maneiras diferentes nos talhões. Os valores de SOLO e de SOMB também alternaram-se, em decorrência da oscilação de VEG, pelo fato de serem proporções de um modelo. Outra observação diz respeito aos valores de SAVI, que foram mais elevados que os de NDVI. Em toda bibliografia consultada não houve referência a este tipo de comportamento. Geralmente os valores de NDVI são mais elevados que os de SAVI, para as mesmas situações experimentais (Baret e Guyot, 1991; Baret *et al.*, 1995; Bernardes, 1996; Rondeaux *et al.*, 1996). Entretanto, segundo Huete (1988), a utilização de um fator aditivo e multiplicativo $L = 0,5$ na equação do SAVI deve fornecer valores superiores aos de NDVI, além do fato destes dois índices possuírem diferenças na sua concepção e no tipo de informação que oferecem (Baret e Guyot, 1991). Foi testada a utilização de um valor de $L = 0,25$, indicado para vegetação muito densa, com o objetivo de observar possíveis alterações nos valores de SAVI. A única mudança observada foi um deslocamento dos valores para níveis mais elevados.

Apesar desta alternância nos valores de NDVI, de SAVI e de VEG, os talhões foram aqui considerados como um único conjunto e foram analisados os valores médios das variáveis, anterior e posteriormente aos desbastes, como mostra a Tabela 4.6:

TABELA 4.6 - VALORES MÉDIOS DOS VOLUMES¹, DOS ÍNDICES² E DAS PROPORÇÕES³

VOL. ANT.	NDVI ANT.	SAVI ANT.	VEG ANT.	SOLO ANT.	SOMB ANT.
157,470	0,599	0,886	45,769	4,045	48,673
VOL. POST.	NDVI POST.	SAVI POST.	VEG POST.	SOLO POST.	SOMB POST.
105,195	0,603	0,890	47,773	4,355	46,358

¹ valores em m³cc/ha.

² valores de 0 a 1.

³ valores percentuais.

A realização de desbastes acarretou uma diminuição no volume de madeira dentro dos talhões. Conforme explicado no Item 3.6, anteriormente às ANOVAS, foi realizado o teste de igualdade de variâncias para as médias anterior e posterior de **volume**. Para este teste foi obtido um valor de F máximo não significativo (1,376), a 5% de probabilidade, onde o valor de F tabelado correspondia a 1,9.

Diante deste resultado, foi aplicada a ANOVA para detectar diferenças estatísticas entre as médias anterior e posterior desta variável. De acordo com a Tabela 4.7, o valor de 'F' encontrado indicou que a média do volume anterior foi estatisticamente diferente daquela do volume posterior. Isto indicou que houve uma diferença significativa entre as médias de volume antes e depois dos desbastes.

TABELA 4.7 - ANOVA APLICADA AO VOLUME

VOLUME				
FV	GL	SQ	QM	F
TRAT	1	60118,864	60118,864	29,225*
RES	86	176911,771	2057,114	
TOTAL	87	237030,634		

* - significativo a 5% de probabilidade

Seguiu-se com a análise dos índices e das proporções com o objetivo de observar se este decréscimo foi detectado pelas imagens transformadas. Analisando os valores médios dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e VEG), percebeu-se que os mesmos apresentaram um pequeno aumento em seus valores, acompanhado de um aumento também de SOLO e de um decréscimo de SOMB (Tabela 4.6). O teste de igualdade de variâncias foi aplicado para as cinco variáveis (**NDVI, SAVI, VEG, SOLO e SOMB**), de acordo com a Tabela 4.8.

TABELA 4.8 - TESTE DE IGUALDADE DE VARIÂNCIAS PARA OS ÍNDICES E AS PROPORÇÕES

IGUALDADE DE VARIÂNCIA	F máx	VARIÁVEL
<i>F máximo = 1,9</i>	1,101 ^{ns}	NDVI
	1,181 ^{ns}	SAVI
	1,996 [*]	VEG
	1,263 ^{ns}	SOLO
	1,278 ^{ns}	SOMB

ns - não significativo a 5% de probabilidade

* - significativo a 5% de probabilidade

Obtendo-se valor de 'F máximo' significativo apenas para **VEG**, foi aplicado o teste de igualdade de médias para esta variável, que apresentou um valor de 'T' não significativo (-1,401), a

5% de probabilidade, onde o valor de T tabelado correspondia a 1,9, indicando que as médias anterior e posterior de VEG eram iguais estatisticamente.

Para as demais variáveis foram aplicadas ANOVAS, que permitiram constatar que não houve diferença estatística entre os valores anteriores e posteriores aos desbastes para cada um destes índices (Tabela 4.9). Isto indicou que as imagens-índice de vegetação e as imagens-proporção não foram sensíveis à variação do volume.

TABELA 4.9 - ANOVAS APLICADAS AOS ÍNDICES E ÀS PROPORÇÕES

NDVI					SOLO				
FV	GL	SQ	QM	F	FV	GL	SQ	QM	F
TRAT	1	0,0005	0,0005	0,168 ^{ns}	TRAT	1	2,120	2,120	0,267 ^{ns}
RES	86	0,235	0,003		RES	86	682,439	7,935	
TOTAL	87	0,235			TOTAL	87	684,559		
SAVI					SOMB				
FV	GL	SQ	QM	F	FV	GL	SQ	QM	F
TRAT	1	0,0004	0,0004	0,069 ^{ns}	TRAT	1	117,854	117,8543	3,908 ^{ns}
RES	86	0,473	0,006		RES	86	2593,712	30,159	
TOTAL	87	0,474			TOTAL	87	2711,566		

ns - não significativo a 5% de probabilidade

Apesar da insensibilidade das imagens-índice de vegetação e das imagens-proporção à saída de madeira, para este conjunto de dados, conforme demonstraram os resultados das ANOVAS, foram estudadas as tendências de comportamento dos índices e das proporções entre si e destas com relação ao volume, a partir dos seus gráficos de dispersão. Inicialmente, conforme proposto no Item 3.6, os talhões foram agrupados de acordo com a dinâmica dos valores de NDVI e de VEG, nos gráficos de NDVI x VOL e de VEG x VOL, respectivamente, com o objetivo de localizar um possível ponto de saturação destes índices, com relação aos valores de volume/IAF.

Observando estes gráficos (Figura 4.4), nota-se que os pontos referentes a cada talhão estão bastante dispersos, não havendo um agrupamento daqueles talhões que apresentaram aumento e diminuição dos índices em torno de algum valor de volume, o que indicaria um ponto de saturação. Este fato pode significar que os dados de volume utilizados e os de IAF correspondentes, situaram-se acima do ponto de saturação, tanto para o NDVI, como para VEG. Este ponto está, provavelmente, abaixo de 50 m³cc/ha. De fato, conforme os resultados encontrados por Baret e Guyot (1991) e Rondeaux *et al.* (1996), o NDVI satura para valores de IAF acima 3. Resgatando-se os valores de IAF correspondentes aos volumes estudados e dispostos nos gráficos da Figura 4.4, através da equação da Figura 4.1, observa-se que para o menor volume (25 m³cc/ha) o IAF correspondente foi de 2,58 e para o maior volume (243 m³cc/ha) o IAF foi de 2,69. Multiplicando-se estes valores pela constante 1,5, sugerida por Gower e Norman (1991), estes valores são deslocados

para o intervalo 3,87 a 4, mostrando que os mesmos se encontram dentro da faixa de saturação do NDVI e de acordo com a Figura 4.4, o mesmo pode ser constatado para os dados de VEG.

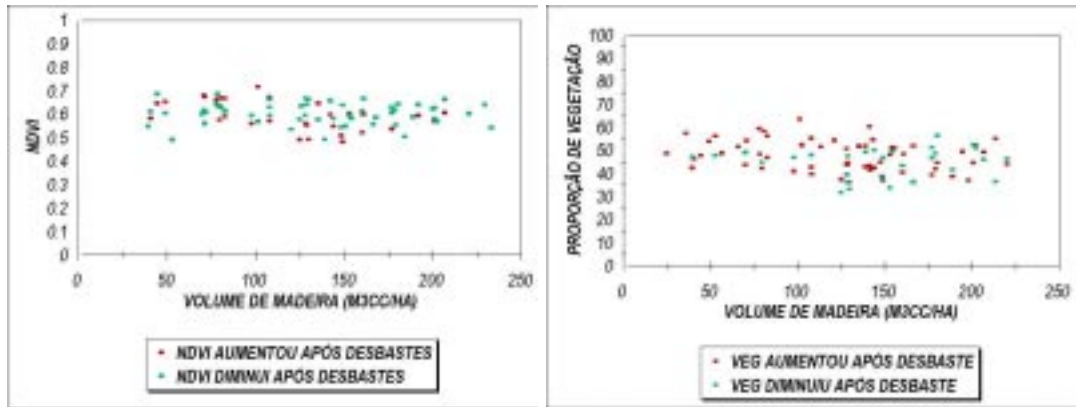


Fig. 4.4 - Gráficos de dispersão NDVI x VOLUME e VEG x VOLUME.

Após a constatação de que os valores de volume e de IAF estavam, provavelmente, acima do ponto de saturação dos índices e das proporções, foram analisadas as relações entre as variáveis. Os gráficos da Figura 4.5 mostram uma correlação positiva entre os três índices de vegetação (NDVI, SAVI e VEG), mais fortemente entre NDVI e SAVI, ressaltando que os pontos de saturação do NDVI e de VEG não foram considerados nas discussões sobre as relações entre estes três índices.

Para prosseguir com as discussões sobre os gráficos da Figura 4.5 e das seguintes, faz-se necessária uma explicação sobre o modelo de mistura espectral. Este modelo funciona com proporções de componentes, conforme explicação anterior, as quais devem somar 100%. Baseia-se no princípio que a partir dos valores iniciais de VEG = 0, SOLO = 100 e SOMB = 0, à medida que VEG aumenta, SOLO diminui e SOMB aumenta, apenas até um ponto de saturação, quando esta última proporção começa a decrescer. A localização deste ponto de saturação varia de acordo com o ângulo de elevação solar ou zenital das imagens orbitais, pois para ângulos zenitais menores, a formação de sombras também é menor. Para o ângulo de elevação solar considerado na retificação das imagens (28°), equivalente a um ângulo zenital de 62° , o ponto de saturação aparece para valores de VEG acima de 20%. À medida que o ângulo zenital diminui, o ponto de saturação desta proporção aumenta. Por exemplo, para $zen=30^{\circ}$, o ponto de saturação aparece para valores de VEG acima de 40% (Hall *et al.*, 1995). Com o aumento progressivo de VEG, o modelo tenta compensar as proporções de alguma forma, no caso, diminuindo os valores de SOMB. Assim, após o ponto de saturação de SOMB, esta proporção apresenta uma correlação negativa com VEG e positiva com SOLO. É importante lembrar que o modelo não reflete fielmente o que ocorre no campo, ou seja, para uma cobertura muito densa de vegetação, espera-se que não haja contribuição do solo. No

entanto, a aplicação do modelo geralmente fornece valores diferentes de zero para esta proporção, ainda que muito baixos.

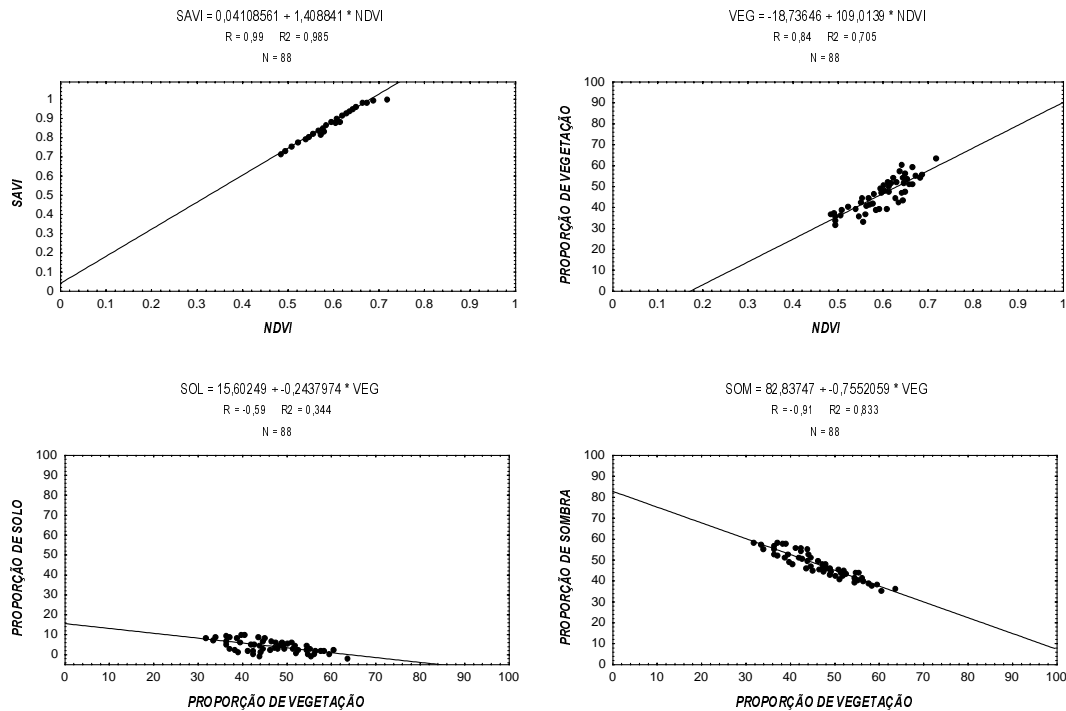


Fig. 4.5 - Gráficos de dispersão dos índices e das proporções entre si.

Seguindo com as análises e discussões, VEG foi relacionada com SOLO e com SOMB (Figura 4.5), encontrando-se para ambos uma correlação negativa. De acordo com a explicação do parágrafo anterior, este comportamento foi coerente, considerando-se que os dados estão acima do ponto de saturação de SOMB. Este resultado foi extrapolado para NDVI e para SAVI, uma vez que ambos estão correlacionados positivamente com VEG. Estas relações entre os índices explicam o comportamento dos valores médios encontrados na Tabela 4.6, onde os três índices de vegetação comportaram-se de maneira semelhante (aumentaram) e SOMB, de maneira inversa àqueles (diminuiu). O SOLO não seguiu a tendência descrita acima, ou seja, com o aumento de VEG, seus valores deveriam ter diminuído, no entanto, aumentaram. Isto pode ser explicado pela pequena diferença entre as médias anterior e posterior de VEG e pelo espalhamento dos pontos em torno da reta VEG x SOLO (Figura 4.5). Observando-se este gráfico, percebe-se que na faixa correspondente ao intervalo entre os valores médios anterior e posterior de VEG, há uma dispersão grande dos pontos numa amplitude pequena de variação no eixo X. Os valores médios de SOLO poderiam tanto ter aumentado, quanto diminuído. O mesmo pode ser concluído para SOMB, de acordo com o gráfico VEG x SOMB (Figura 4.5), embora, coincidentemente, as médias tenham se comportado de acordo com o gráfico. Lembrando que esta explicação pode ter validade uma vez que as ANOVAS

indicaram que as médias anteriores e posteriores de todos os índices e proporções não apresentaram diferenças significativas.

Em seguida foram estudadas as relações dos índices e das proporções com o volume. Os gráficos de dispersão da Figura 4.6 mostram, inicialmente, as relações dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e VEG) com o volume e percebe-se que aqueles aumentaram à medida que o volume diminuiu, embora esta correlação seja fracamente negativa. Este fato, constatado na Tabela 4.6, pode ser explicado pelo posicionamento dos dados acima do ponto de saturação do NDVI e de VEG, conforme discussão anterior. Este posicionamento também explicaria o fato destes índices ora aumentarem e ora diminuírem, quando da diminuição do volume. Ainda analisando os gráficos de dispersão da Figura 4.6, observa-se que os três índices de vegetação apresentaram um comportamento muito semelhante, coerente com a correlação positiva encontrada entre eles, apresentadas pelos gráficos da Figura 4.5.

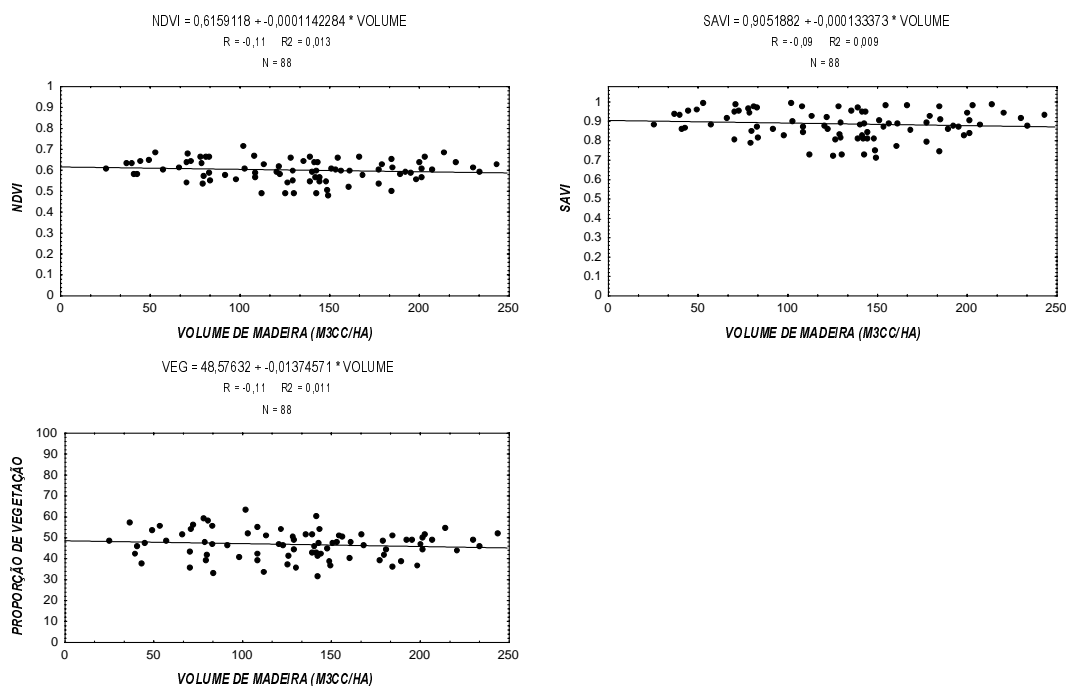


Fig. 4.6 - Gráficos de dispersão dos índices de vegetação com relação ao volume.

Na Figura 4.7 estão dispostos os gráficos de dispersão de SOLO e de SOMB em relação ao volume. A correlação encontrada com as duas proporções foi positiva, coerente com a proximidade dos dados do ponto de saturação de SOMB. De acordo com as discussões e gráficos anteriores, a partir deste ponto, com a diminuição dos valores de volume/IAF, os valores de VEG aumentam, juntamente com os de NDVI e de SAVI, e os de SOLO e de SOMB diminuem. Pela Tabela 4.6, nota-se novamente que SOLO não segue esta tendência, ocorrendo um aumento de suas médias após realização dos desbastes, comportamento este inverso ao demonstrado no gráfico VOL x SOLO abaixo. Porém, novamente há um grande espalhamento dos pontos em torno da reta, podendo ter ocorrido aumento ou diminuição das médias desta proporção, quando da diminuição das médias de volume.

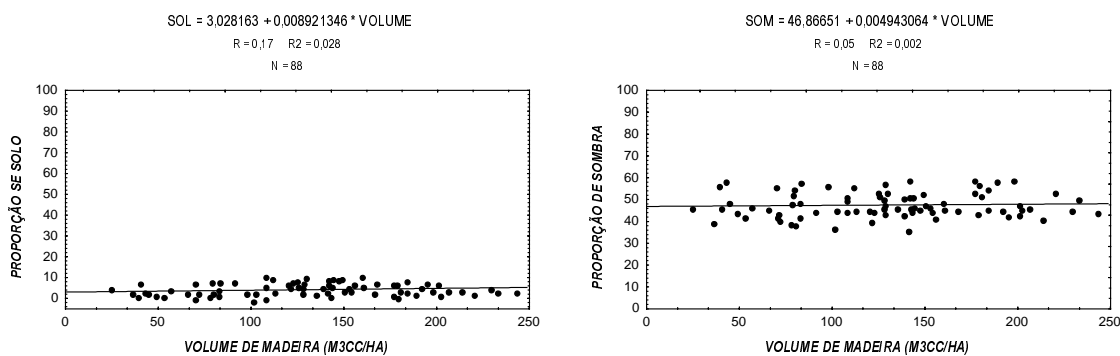


Fig 4.7 - Gráficos de dispersão de SOLO e de SOMB com relação ao volume.

Todos os gráficos de dispersão das Figuras 4.6 e 4.7 mostram que os pontos estão muito dispersos em torno das retas, comportamento representado pelos valores de R^2 . Outro fato a ser observado é a baixa inclinação das retas, indicando uma correlação fraca entre o volume e os índices-de-vegetação e as proporções, representado pelo valor de R .

Lembrando ainda que são realizados cinco desbastes ao longo da vida do talhão, aos 8, 10, 12, 15 e 19 anos. O primeiro é sistemático na 21ª linha, sendo os demais seletivos, onde são retiradas as árvores consideradas ruins comercialmente. Aos 25 anos é realizado o corte raso de todas as árvores. Assim, sendo a maioria dos desbastes seletivos, não há formação de grandes clareiras, que poderiam de alguma forma afetar tanto os valores de IAF coletados em campo, quanto os extraídos das imagens.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi avaliar a sensibilidade de imagens orbitais transformadas, neste caso, imagens-índice de vegetação e imagens-proporção, para detectar alterações no volume de madeira em área de floresta implantada de Pinus spp. Esta análise visou testar uma metodologia para futuros estudos em áreas de florestas naturais, onde há extração seletiva de espécies vegetais para fins comerciais, e ainda para o monitoramento do volume de madeira em áreas de reflorestamento, de maneira mais rápida que os métodos tradicionais. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foi possível a extração de algumas informações e conclusões consideradas úteis à realização de estudos futuros enfocando o mesmo tema e/ou utilizando parcial ou integralmente a metodologia aqui empregada. Estas conclusões são apresentadas a seguir:

1. O GPS GARMIN diferencial, apesar de mais complexo que os GPS simples, é de fácil utilização em campo e processamento, fornecendo coordenadas geodésicas com ótima precisão para fins de delimitação de áreas e definição de pontos de controle para georreferenciamento.

2. O registro imagem-imagem fornece bons resultados, caso a imagem referência tenha sido georreferenciada com precisão e existam bons pontos de controle na cena. Neste estudo, com apenas 8 pontos de controle, foi possível realizar um bom registro.

3. A retificação radiométrica das imagens para normalizar as diferenças decorrentes do uso de imagens multitemporais mostrou-se uma ótima alternativa à correção atmosférica, quando a análise não envolve dados absolutos. A dificuldade maior consiste em uma boa escolha dos pontos de controle claros e escuros, que devem estar presentes na cena analisada e podem variar de uma cena para outra quanto ao tipo de alvo no qual consistem, sendo necessárias várias tentativas até a obtenção de um resultado satisfatório. Uma análise apenas visual do resultado não é recomendada, sendo sugerida a comparação das médias das imagens retificadas com as da imagem referência.

4. A escolha dos pixels puros para calibração do modelo linear de mistura espectral também requer várias tentativas, uma vez que estes componentes puros variam de acordo com a cena e o objeto de estudo. Neste trabalho, o pixel puro de vegetação consistiu em um pixel 100% de Pinus spp. e o pixel puro de solo, em um pixel 100% do tipo de solo presente na fazenda. Uma escolha mal feita destes pixels puros gera erros na calibração do modelo, uma vez que servem de parâmetros para o cálculo das proporções de cada componente dentro de cada pixel da imagem.

5. Foram obtidos baixos valores de IAF com o LAI-2000 em campo, para talhões adultos e densos de Pinus spp., e uma baixa correlação destes com os dados de volumes estimados para a mesma época. Segundo a bibliografia consultada, plantios de Pinus spp. realmente possuem valores de IAF mais baixos que outros tipos de cobertura vegetal, além do LAI-2000 subestimar em 35 a 40% o valor real de IAF. Neste caso, para Pinus spp., é sugerida a multiplicação dos dados coletados por 1,5 para aproximar dos valores reais. Quanta à baixa correlação com volume, supõe-se que seja devido aos valores de IAF estarem situados acima do ponto de saturação e a possíveis imprecisões nas estimativas de volume da empresa e aquelas inerentes ao funcionamento do LAI-2000.

6. Os valores de NDVI e de VEG mostraram-se estagnados diante às variações dos dados de volume, indicando que estes estavam provavelmente acima do ponto de saturação para estes índices. Não foi possível a identificação deste ponto de saturação.

7. Finalmente, respondendo ao objetivo do trabalho, as imagens-índice e as imagens-proporção não foram sensíveis à saída de madeira dos talhões, não sendo possível, através de uma série temporal de imagens orbitais, o monitoramento de alterações de volume, a partir de alterações nos valores de IAF estimados pelos índices. Lembrando que este resultado é válido para o caso de florestas de Pinus spp., nas condições aqui estudadas. Os resultados podem variar para outros tipos de vegetação e outros métodos de determinação das variáveis utilizadas (volume e IAF).

CAPÍTULO 6

RECOMENDAÇÕES

Ao final do trabalho, diante dos resultados alcançados, das conclusões e da experiência adquirida para esta área de estudo, foi possível detectar os pontos principais desta pesquisa e possíveis fatores relacionados e influentes. São fornecidas algumas sugestões para a continuação deste trabalho ou ainda trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, considerando-se a mesma metodologia aqui empregada, porém com algumas variações e observando alguns fatores adicionais.

1. Nas florestas implantadas, os desbastes são aplicados em talhões adultos, os quais, segundo os resultados obtidos, apresentam valores de volume e de IAF acima do ponto de saturação, não sensibilizando os valores de NDVI, de SAVI e de VEG. Este fato impossibilita a realização de um

monitoramento dos volumes retirados e remanescentes por ocasião de desbastes através de dados orbitais. Entretanto, trabalhando-se apenas com plantios jovens, ainda não desbastados, os valores acima mencionados provavelmente não estarão saturados, podendo-se utilizar a mesma metodologia e observar o comportamento das variáveis.

2. Analisar a influência das diferentes intensidades de sub-bosque nos valores radiométricos obtidos em campo e extraídos de imagens orbitais.

3. Considerar mais informações na análise dos dados, tais como: espécie, idade, DAP, clima, tipo de solo e topografia.

4. Utilizar outros índices de vegetação para avaliar qual fornece maior sensibilidade.

5. Realizar medidas diretas de IAF para uma pequena amostra da área a ser estudada e relacionar com os dados obtidos com LAI-2000, com o objetivo de estabelecer o grau de correlação entre ambas.

6. Desconsiderando as idades dos plantios, relacionar volume e IAF estimados de diferentes maneiras, visando avaliar quais das combinações a seguir forneceriam melhores resultados, com maior precisão:

a) dados de volume com dados de IAF, ambos estimados em campo;

b) dados de volume estimados em campo com dados de IAF estimados via equações alométricas;

c) dados de volume inventariados com dados de IAF estimados via equações alométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, J.B.; Smith, M.O.; Gillespie, A.R. **A mixing-model strategy for analyzing and interpreting hyperspectral images**. Seattle, University of Washington, 1989. 35p.

Adams, J.B.; Smith, M.O.; Gillespie, A.R. Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. In: IGARSS'89 (International Geoscience and Remote Sensing Symposium), 12./Symposium Canadien sur la teledetection, 12., **Remote Sensing: an economic tool for the nineties**. Vancouver, IEEE/CRSS/URSI, July 10-14. v.1, p.16-21.

Ardö, J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, 13(9):1779-1786, June, 1992.

- Asrar, G. Introdução. In: _____. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap.1, p.1-13.
- Asrar, G.; Kanemasu, E.T.; Yoshida, M. Estimates of Leaf Area Index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. **Remote Sensing of Environment**, 17(1):1-11, Feb., 1985.
- Asrar, G.; Myneni, R. B.; Kanemasu, E. T. Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap. 7, p.252-296.
- Baret, F.; Guyot, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, 35:161-173, 1991.
- Baret, F.; Clevers, J.G.P.W.; Steven, M.D. The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: a comparison of approaches. **Remote Sensing of Environment**, 54(2):141-151, Nov., 1995.
- Bernardes, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta de Tapajós- Estado do Pará**. (Dissertação de Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1996. 94p.
- Boas, O.V.; Gurgel Garrido, L.M.A.; Garrido, M.A.O. **Confronto entre métodos de desbastes**. São Paulo, Instituto Florestal, 1986. 16p.
- Campbell, G.S.; Norman, J.M. The description and measurement of plant canopy structure. In: Russell, G.; Marshall, B.; Jarvis, P.G. **Plant canopies: their growth, form and function**. Cambridge, Cambridge University Press, 1989.
- Chen, J.M.; Black, T.A.; Adams, R.S. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand **Agricultural and Forest Meteorology**, 56(1-2):129-143, July, 1991.
- Colwell, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 3(3):175-183, 1974.
- Curran, P.J.; Dungan, J.L.; Gholz, H.L. Seasonal LAI in Slash Pine estimated with Landsat TM. **Remote Sensing of Environment**, 39(1):3-13, Jan., 1992.

- Daughtry, C.S.T. Direct measurements of canopy structure. In: Goel, N.S., Norman, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, 5(1):45-60, 1990.
- Daughtry, C.S.T.; Hollinger, S.E. Costs of measuring Leaf Area Index of corn. **Agronomy Journal**, 76(5):836-841, Sept-Oct., 1984.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 1988. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1988, v. 2, p. 400-405.
- Epiphanyo, J.C.N.; Huete, A.R. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, 51(3):351-360, Mar., 1995.
- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ). **Carta de solos da Agro Florestal Monte Alegre**. Piracicaba, 1971.
- Figueiredo, D.C. **Sistema de obtenção de índice de vegetação para América do Sul por processamento digital de imagens NOAA/AVHRR**. São José dos Campos, INPE, 1990. 107p. (INPE 5068-TDL/407).
- Friedl, M.A.; Michaelsen, J.; Davis, F.W.; Walker, H.; Schimel, D.S. Estimating grassland biomass and Leaf Area Index using ground and satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 15(7):1401-1420, May, 1994.
- Fuchs, M.; Asrar, G.; Kanemasu, E.T.; Hipps, L.E. Leaf Area estimates from measurements of photosynthetically active radiation in wheat canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, 32(1):13-22, July, 1984.
- Gemmell, F.M. Effects of forest cover, terrain and scale on timber volume estimation with Thematic Mapper data in a rocky mountain site. **Remote Sensing of Environment**, 51(2):291-305, Feb., 1995.
- Goel, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, 4:1-212, 1988.
- Goel, N.S. Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap. 6., p.205-251.

- Goel, N.S., Norman, J.M. Remote sensing and biophysical measurements of soils and vegetation. In: Goel, N.S., Norman, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, 5(1):1-12, 1990.
- Gong, P.; Pu, R.; Miller, J.R. Correlating Leaf Area Index of Ponderosa Pine with hyperspectral CASI data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 18(4):275-282, Oct., 1992.
- Gower, S.T.; Norman, J.M. Rapid estimation of Leaf Area Index in conifer and broad-leaf plantations. **Ecology**, 72(5):1896-1900, Oct., 1991.
- Guyot, G.; Gu, X.F. Effect of radiometric corrections on NDVI-determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data. **Remote Sensing of Environment**, 49(3):169-180, Sept., 1994.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitime, multisensor images. **Remote Sensing Environment**, 35(1):11-27, Jan., 1991.
- Hall, F.G.; Shimabukuro, Y.E.; Huemmrich, K.F. Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models. **Ecological Applications**, 5(4):993-1013, 1995.
- Hernandez Filho, P.; Shimabukuro, Y.E. **Estabelecimento de metodologia para avaliação de povoamentos florestais artificiais, utilizando-se dados do Landsat**. São José dos Campos, INPE, 1978. 169p. (INPE 1271-TPT/089).
- Hill, J.; Sturm, B. Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. **International Journal of Remote Sensing**, 12(7):1471-1491, July, 1991.
- Hoffer, R.M., Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Swain, P.H.; Davis, S.M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York, McGraw-Hill, 1978. 396p.
- Holben, B.N.; Shimabukuro, Y.E. Linear mixing model applied to AVHRR LAC data. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1993, v.2, p. 102-110.
- Huete, A.R. Soil-dependent spectral response in a developing plant canopy. **Agronomy Journal**, 79(1):61-68, Jan.-Feb., 1987.
- Huete, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25(3):295-309, Aug., 1988.

- Huete, A.R. Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley, 1989. Cap. 4. p.107-141.
- Huete, A.R.; Jackson, R.D.; Post, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, 17(1):37-53, Feb., 1985.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Geografia do Brasil-Grande região sul**. Rio de Janeiro, 1963. 215p. (Biblioteca Geográfica Brasileira, v.4, publicação nº 18).
- Israelsson, H.; Askne, J.; Sylvander, R. Potential of SAR for forest bole volume estimation. **International Journal of Remote Sensing**, 15(14):2809-2826, Sept., 1994.
- Jackson, R.D.; Huete, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, 11:185-200, 1991.
- Jackson, R.D.; Teillet, P.M.; Slater, P.N.; Fedosejevs, G.; Jasinski, M.F.; Aase, J.K.; Moran, M.S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of Environment**, 32(2-3):189-202, May-June, 1990.
- Kauth, R.J.; Thomas, G.S. The tasseled cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Symposium on the Machine Processing of Remotely Sensed Data. **Proceedings**. p.4B41-4B51, 1976.
- Kumar, R. **Radiation from plants-reflection and emission: a review**. Lafayette, Purdue University, 1972. 88p.
- Kuplich, T.M.; Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S.; Dutra, L.V.; Hernandez Filho, P. **Secondary and primary tropical forest biomass estimates in Tapajós area: 1994 field work report**. São José dos Campos, INPE, 1996. No prelo.
- Landgrebe, D.A., The quantitative approach: concept and rationale. In: Swain, P.H.; Davis, S.M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York, McGraw-Hill, 1978. 396p.
- Lang, A.R.G.; McMurtrie, R.E.; Benson, M.L. Validity of surface area indices of Pinus radiata estimated from transmittance of the sun's beam **Agricultural and Forest Meteorology**, 57(1-3):157-170, Dec., 1991.
- LI-COR. **LAI-2000 Plant Canopy Analyzer: operating manual**. Lincoln, LI-COR, 1992.
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 2 ed. New York, John Wiley, 1987. 721p.
- Lo, C.P. **Applied remote sensing**. New York, Longman, 1986. 393p.

- Markham, B.L.; Barker, J.L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and At-Satellite temperatures.** EOSAT Landsat Technical Notes, Aug. 1986. 21p.
- Marshall, J.D.; Waring, R.H. Comparison of methods of estimating Leaf Area Index in old growth Douglas-fir. **Ecology**, 67(4):975-979, Aug., 1986.
- Milton, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, 8(12):1807-1827, Dec., 1987.
- Mirov, N.T. **The genus Pinus.** New York, Ronald Press, 1967. 602p.
- Moran, M.S.; Jackson, R.D.; Hart, G.F.; Slater, P.N.; Bartell, R.J.; Biggan, S.F.; Gellman, D.I.; Santer, R.P. Obtaining surface reflectance factors from atmospheric and view angle corrected SPOT-1 HRV data. **Remote Sensing of Environment**, 32(2-3):203-214, May-June, 1990.
- Myneni, R.B.; Asrar, G. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 47(3):390-402, Mar., 1994.
- Myneni, R.B.; Hall, F.G.; Sellers, P.J.; Marshak, A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 33(2):481-486, Mar., 1995.
- Nilson, T.; Olsson, H. Effect of thinning cutting on boreal forest reflectance: a comparison of simulations and Landsat TM estimates. **International Journal of Remote Sensing**, 16(15):2963-2968, Oct., 1995.
- Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, Edgard Blücher, 1989. 308p.
- Olsson, H. Changes in satellite-measured reflectances caused by thinning cuttings in boreal forest. **Remote Sensing of Environment**, 50(3):221-230, Dec., 1994.
- Pereira, M.D.B.; Batista, G.T. **Correlação de fitomassa verde de campo cerrado com dados espectrais obtidos pelo sistema MSS/Landsat e por radiometria de campo.** São José dos Campos, INPE, 1985. 13p. (INPE 3467-PRE/710).
- Peterson, D.L.; Running, S.W. Applications in forest science and management. In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing.** New York, John Wiley, 1989. Cap. 10, p.429-473.

- Pierce, L.L.; Running, S.W. Rapid estimation of coniferous forest Leaf Area Index using a portable integrating radiometer. **Ecology**, *69*(6):1762-1767, Dec., 1988.
- Ponzoni, F. J. **Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de *Eucalyptus* sp. e de *Aspidosperma* sp.** (Tese de Doutorado)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993. 206p.
- Rich, P.M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. In: Goel, N.S., Norman, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, *5*(1):13-29, 1990.
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.** Berlin, Springer-Verlag, 1986. 281p.
- Robinove, C.J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, *48*(5):781-784, May, 1982.
- Rondeaux, G.; Steven, M.; Baret, F. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. **Remote Sensing of Environment**, *55*(2):95-107, Feb., 1996.
- Rosales, H.V. **Nociones de silvicultura.** Santiago, Instituto Florestal, 1967. 283p.
- Roughgarden, J.; Running, S.W.; Matson, P.A. What does remote sensing do for Ecology? **Ecology**, *72*(6):1918-1922, Dec., 1991.
- Running, S.W.; Ramakrishna, R.N.; Peterson, D.L.; Band, L.E.; Potts, D.F.; Pierce, L.L.; Spanner, M.A. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis coupling satellite data with ecosystem simulation. **Ecology**, *70*(4):1090-1101, Ago., 1989.
- Rushforth, K.D. **Conifers.** New York, Facts on File Publications, 1987. 232p.
- Sader, S.A.; Winne, J.C. RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics. **International Journal of Remote Sensing**, *13*(16):3055-3067, Nov., 1992.
- Sharpe, G.W.; Hendee, C.W.; Allen, S.W. **Introduction to forestry.** 4.ed. New York, McGraw-Hill, 1976. 544p.
- Shimabukuro, Y.E. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto: notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.** São José dos Campos, 3. sem., 1995. Apostila.

- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 29(1):16-20, Jan., 1991.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 21(1):67-74, Mar., 1995.
- Shimabukuro, Y.E.; Novo, E.M.L.M.; Ponzoni, F.J. **Índice de vegetação e imagens-frações derivadas do modelo linear de mistura espectral para monitoramento da região do Pantanal**. 1995. Submetido à Revista PAB, da EMBRAPA. No prelo.
- Silva, E.L.S.; Ponzoni, F.J. Comparação entre a reflectância hemisférica de folhas e a reflectância bidirecional de um dossel. **Revista Árvore**, 19(4):466-478, 1995.
- Simões, J.W.; Brandi, R.M.; Leite, N.B.; Balloni, E.A. **Formação, manejo e exploração de florestas com espécies de rápido crescimento**. Brasília, IBDF, 1981. 131p.
- Slater, P.N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading, Adison-Wesley, 1980. 575p.
- Smith, F.W.; Sampson, D.A.; Long, J.N. Comparison of Leaf Area Index estimates from tree allometrics and measured light interception. **Forest Science**, 37(6):1682-1688, 1991.
- Sokal, R.R.; Rohlf, F.J. **Biometry: the principles and practice of statistics in biological research**. San Francisco, W.H. Freeman, 1969.
- Steffen, C.A.; Moraes, E.C.; Gama, F.F. Radiometria Óptica Espectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 1996. **Anais**. Tutorial 1. São José dos Campos, INPE, 1996. 43p.
- Stoddard, C.H. **Essentials of forestry practice**. 2. ed. New York, Ronald Press, 1968. 362p.
- Swain, P.H.; Davis, S.M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York, McGraw-Hill, 1978. 396p.
- Szekielda, K. **Satellite monitoring of the earth**. New York, John Wiley, 1988. 326p.
- Taylor, C.J. **Introdução à silvicultura tropical**. São Paulo, Edgard Blücher, 1969. 201p.
- Veiga, A.A., **Curso de atualização florestal**. 3. ed., Sec. da Agricultura, Coordenadoria da Pesquisa de Recursos Naturais, Instituto Florestal, Publicação IF, n. 8, v.1, 1976.
- Weiser, R.L.; Asrar, G.; Miller, G.P.; Kanemasu, E.T. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, 20(2):141-152, Oct., 1986.

- Welles, J.M. Some indirect methods of estimating canopy structure. In: Goel, N.S., Norman, J.M. Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews**, 5(1):31-43, 1990.
- Young, R.A. **Introduction to forest science**. New York, John Wiley, 1982. 554p.
- Zerbini, N.J.; Santos, J.R. Estimativa de fitomassa aérea em região de floresta tropical com uso de dados TM/Landsat 5 e HRV/SPOT 1. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1993, v. 2, p. 275-280.

APÊNDICE A

DADOS DE CAMPO

TABELA A.1 - INFORMAÇÕES RELATIVAS AO TRABALHO DE CAMPO E DADOS COLETADOS PELO LAI-2000

TALHÃO	DATA	HORA	IAF	σ IAF	IAF 2 ¹	DAF ²	σ DAF	GAP	AMOSTRAS	DISTRITO ³
<i>2c</i>	27/06/96	14:55:04	3,4	0,07	3,44	54 ⁰	3 ⁰	0,078	24	DMA
<i>8a</i>	30/06/96	07:35:16	2,34	0,06	2,44	61 ⁰	3 ⁰	0,176	25	DBS
<i>8d</i>	30/06/96	07:50:49	2,62	0,04	2,63	52 ⁰	4 ⁰	0,134	25	DBS
<i>30c</i>	27/06/96	14:38:05	2,83	0,08	2,86	54 ⁰	3 ⁰	0,114	24	DBS
<i>31</i>	29/06/96	09:14:07	2,54	0,09	2,59	52 ⁰	5 ⁰	0,129	24	DBS
<i>36a</i>	25/06/96	07:31:14	1,86	0,09	1,87	60 ⁰	4 ⁰	0,274	32	DSZ
<i>37</i>	29/06/96	08:04:36	1,79	0,06	1,82	59 ⁰	2 ⁰	0,263	24	DBS
<i>38</i>	29/06/96	08:32:01	3,09	0,05	3,13	51 ⁰	4 ⁰	0,085	24	DBS
<i>40b</i>	28/06/96	17:38:27	3,43	0,05	3,48	44 ⁰	6 ⁰	0,052	24	DBS
<i>41a</i>	28/06/96	17:22:17	2,66	0,07	2,72	49 ⁰	6 ⁰	0,109	27	DBS
<i>44b</i>	29/06/96	07:49:36	3,2	0,07	3,36	59 ⁰	5 ⁰	0,094	24	DBS
<i>46a</i>	28/06/96	12:12:04	2,39	0,13	2,42	53 ⁰	4 ⁰	0,148	24	DBS
<i>46b</i>	28/06/96	15:44:28	1,99	0,06	2,05	58 ⁰	3 ⁰	0,222	24	DBS
<i>46c</i>	28/06/96	15:59:13	2,16	0,15	2,03	42 ⁰	2 ⁰	0,174	24	DBS

48	28/06/96	16:44:20	3,37	0,08	3,36	48 ⁰	3 ⁰	0,067	24	DBS
49	28/06/96	16:29:23	2,67	0,07	2,69	51 ⁰	4 ⁰	0,118	27	DBS
50	28/06/96	16:15:54	2,84	0,12	2,85	47 ⁰	4 ⁰	0,094	26	DBS
51	28/06/96	17:06:10	1,89	0,06	1,99	63 ⁰	2 ⁰	0,256	24	DBS
52	29/06/96	08:57:43	3,11	0,07	3,08	47 ⁰	4 ⁰	0,079	24	DBS
55	26/06/96	07:40:09	2,57	0,1	2,4	44 ⁰	4 ⁰	0,143	24	DMA
56a	29/06/96	09:32:00	2,39	0,06	2,4	54 ⁰	2 ⁰	0,157	24	DBS
58a	26/06/96	07:21:30	2,31	0,1	2,33	53 ⁰	2 ⁰	0,165	24	DMA
62c	26/06/96	07:00:16	2,15	0,08	2,16	52 ⁰	2 ⁰	0,181	24	DMA
76	28/06/96	11:58:09	3,09	0,08	3,1	51 ⁰	2 ⁰	0,09	30	DBS
81	26/06/96	16:14:49	2,82	0,05	2,88	57 ⁰	3 ⁰	0,122	24	DBS
86	26/06/96	16:32:03	2,41	0,08	2,4	48 ⁰	3 ⁰	0,139	24	DBS
88	26/06/96	15:59:51	2,26	0,11	2,27	52 ⁰	4 ⁰	0,164	26	DBS
99a	30/06/96	08:32:56	2,36	0,05	2,41	57 ⁰	3 ⁰	0,17	24	DBS
99e	30/06/96	08:24:20	2,25	0,06	2,26	56 ⁰	2 ⁰	0,187	24	DBS
100	29/06/96	10:17:52	2,48	0,05	2,5	55 ⁰	3 ⁰	0,145	24	DBS
101	29/06/96	10:32:23	2,36	0,06	2,37	54 ⁰	3 ⁰	0,167	24	DBS
102	30/06/96	08:11:28	3,27	0,1	3,34	54 ⁰	3 ⁰	0,081	24	DBS
104a	25/06/96	16:57:04	3,5	0,08	3,58	56 ⁰	3 ⁰	0,074	24	DBS
112d	29/06/96	17:16:10	2,25	0,04	2,18	49 ⁰	2 ⁰	0,177	24	DBS
114a	29/06/96	17:29:16	3,35	0,05	3,43	58 ⁰	3 ⁰	0,085	25	DBS
116	29/06/96	17:03:15	2,98	0,05	2,99	54 ⁰	3 ⁰	0,104	24	DBS
117	29/06/96	16:45:47	2,97	0,06	3,04	60 ⁰	2 ⁰	0,122	25	DBS

¹ - Valor de IAF calculado pelo próprio LAI-2000, através de outro método.

² - Distribuição Angular de Folhas (ver pág. 24).

³ - Iniciais dos distritos (ver pág. 47).

APÊNDICE B

INVENTÁRIO DA DURATEX FLORESTAL S.A.

TABELA B.1 - DADOS DE VOLUME FORNECIDOS PELA EMPRESA

NÚMERO DO TALHÃO	DATA DO DESBASTE	VOLUMES (em m ³ cc/ha)		VOLUME RETIRADO (%)
		ANTERIOR	POSTERIOR	
29b	FEV 93	79,7	44,5	44,17
84	MAI 94	128,9	77,9	39,57
85a	MAI 94	144	107,9	25,07
98	JAN 94	39,4	24,9	36,80
103a	JAN 94	70	56,6	19,14
105	MAR 94	188,9	141,8	24,93
107	FEV 94	177	141,4	20,11
108	MAR 94	179,1	138,8	22,50
110a	ABR 94	180,3	155,9	13,53
114a	ABR 94	220,4	194,8	11,62
8c	JUL 93	154,1	113,2	26,54
8d	OUT 93	120	83,1	30,75
11c	MAR 93	177	108,1	38,93
27a	FEV 93	108	70,8	34,44
39	MAI 93	202,5	143,2	29,28
40b	JUL 94	200,9	160,9	19,91
41a	JUL 94	200,9	128,9	35,84

44b	JUN 93	199,7	122,3	38,76
45c	JUL 94	191,9	142,3	25,85
46a	JUL 94	125,9	79,2	37,09
46c	JUL 94	167,8	144,3	14,00
48	JUL 94	178,5	91,4	48,80
58c	JUN 94	129,8	40,7	68,64
61	JUN 93	138,9	121,2	12,74
70a	FEV 93	97,7	78,5	19,65
76	JUN 93	52,9	36,2	31,57
81	JUL 94	128,3	82,7	35,54
99a	JUN 94	160,2	80,6	49,69
99e	JUN 94	149	71,2	52,21
100	JUN 94	148,5	82,7	44,31
101	JUN 94	125	49,2	60,64
104a	OUT 93	72,1	42,7	40,78
116	JUN 94	153	101,4	33,73
117	JUL 94	206,8	135,3	34,57
37	JUN 93	128	65,9	48,52
52	AGO 92	233,1	142,2	39,00
95b	AGO 92	229,5	111,9	51,24
2c	JUN 93	166,5	102,4	38,50
3b	JUL 93	184,2	140,1	23,94
4a	SET 93	150,5	69,9	53,55
37sz	MAI 93	213,7	141,2	33,93
42a	OUT 93	184,9	128,9	30,29
7a	AGO 92	243,1	184	24,31
27aab	MAR 94	198,1	147,5	25,54

APÊNDICE C

MODELO DE REGRESSÃO

TABELA C.1 - DADOS UTILIZADOS NA OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO VOL_x IAF

TALHÃO	IMA¹	VOLUME POSTERIOR²	DATA DESBASTE	VOLUME ATUAL²	IAF
2c	29,4	102,4	JUN 93	190,6	3,4
8a	21,3	65,4	OUT 93	122,058	2,34
8d	29,4	29,4	OUT 93	107,604	2,62
30c	29,3	205,8	AGO 94	259,712	2,83
31	29,3	175,7	MAR 94	241,625	2,54
36a	26,3	152,5	JUN 92	257,7	1,86
37	22	65,9	JUN 93	131,9	1,79
38	29,4	144,3	OUT 93	222,504	3,09
40b	23,4	160,9	JUL 94	205,828	3,43
41a	23,4	128,9	JUL 94	173,828	2,66
44b	29,4	122,3	JUN 93	210,5	3,2
46a	21,3	79,2	JUL 94	120,096	2,39
46b	21,3	117,1	AGO 94	156,292	1,99
46c	23,4	144,3	JUL 94	189,228	2,16
48	23,4	91,4	JUL 94	136,328	3,37
49	23,4	142,5	AGO 94	185,556	2,67

<i>50</i>	21,3	76,8	SET 94	114,075	2,84
<i>51</i>	21,3	87,9	SET 94	125,175	1,89
<i>52</i>	26,3	142,2	AGO 92	243,192	3,11
<i>55</i>	10,6	...	...	77	2,57
<i>56a</i>	26,3	210,1	AGO 92	311,092	2,39
<i>58a</i>	10,6	...	...	83	2,31
<i>62c</i>	10,6	...	...	78	2,15
<i>76</i>	10	36,2	JUN 93	66,2	3,09
<i>81</i>	21,3	82,7	JUL 94	123,596	2,82
<i>86</i>	21,3	104,1	JUL 94	144,996	2,41
<i>88</i>	26,3	169,1	AGO 94	217,492	2,26
<i>99a</i>	21,3	80,6	JUN 94	123,2	2,36
<i>99e</i>	25,3	71,2	JUN 94	121,8	2,25
<i>100</i>	25,3	82,7	JUN 94	133,3	2,48
<i>101</i>	25,3	49,2	JUN 94	99,8	2,36
<i>102</i>	10,6	48,6	JAN 94	74,252	3,27
<i>104a</i>	10	42,7	OUT 93	69,3	3,5
<i>112d</i>	21,3	148,4	AGO 94	187,592	2,25
<i>114a</i>	31,3	194,8	ABR 94	262,408	3,35
<i>116</i>	21,3	101,4	JUN 94	144	2,98
<i>117</i>	29,4	135,3	JUL 94	191,748	2,97

¹ - Incremento Médio Anual em m³ cc/ha/ano.

² - Volumes em m³ cc/ha.

APÊNDICE D

VALORES DE REFLECTÂNCIA

TABELA D.1 - VALORES DE REFLECTÂNCIA ANTES DOS DESBASTES

TALHÕES	TM 1	σ	TM 2	σ	TM 3	σ	TM 4	σ	TM 5	σ	TM 7	σ
<i>T 29b</i>	5,811	0,182	3,815	0,298	3,078	0,262	11,527	0,324	2,947	0,262	0,309	0,214
<i>T 84</i>	6,340	0,449	4,700	0,233	3,589	0,269	12,626	0,635	5,669	0,964	0,143	0,254
<i>T 85a</i>	6,125	0,413	4,608	0,258	3,404	0,184	11,843	0,402	4,690	0,459	0,035	0,113
<i>T 98</i>	5,871	0,196	3,595	0,222	2,500	0,241	11,291	0,320	2,520	0,675	0,214	0,596
<i>T 103a</i>	5,846	0,246	3,553	0,200	2,476	0,227	11,532	0,349	2,290	0,611	0,282	0,244
<i>T 105</i>	6,061	0,397	3,699	0,251	2,717	0,245	10,453	0,440	2,707	0,537	0,204	0,371
<i>T 107</i>	5,857	0,193	3,573	0,242	2,540	0,275	10,516	0,329	2,538	0,644	0,141	0,384
<i>T 108</i>	5,905	0,184	3,557	0,184	2,495	0,315	11,115	0,349	2,368	0,376	0,160	0,549
<i>T 110a</i>	6,105	0,664	4,065	0,903	2,828	0,817	12,293	0,585	3,575	0,895	0,615	0,965
<i>T 114a</i>	5,915	0,241	3,789	0,354	2,582	0,355	11,948	0,435	3,371	0,504	0,273	0,342
<i>T 8c</i>	6,230	0,392	4,662	0,187	2,810	0,231	14,138	0,475	4,492	0,625	0,570	0,798
<i>T 8d</i>	4,475	1,062	3,945	0,418	3,460	0,398	13,764	0,898	6,021	0,880	0,423	0,340
<i>T 11c</i>	6,229	0,573	4,115	0,282	3,356	0,206	11,291	0,367	4,196	0,445	0,856	0,705
<i>T 27a</i>	5,857	0,205	3,952	0,391	3,280	0,291	12,147	0,832	4,202	0,981	0,774	0,639
<i>T 39</i>	6,142	0,212	4,591	0,222	2,732	0,123	14,007	0,591	3,909	0,481	0,124	0,253
<i>T 40b</i>	6,431	0,379	4,784	0,165	3,412	0,189	12,549	1,169	5,529	0,703	0,118	0,189
<i>T 41a</i>	6,105	0,398	4,510	0,245	3,347	0,197	14,109	0,860	6,007	0,859	0,120	0,217
<i>T 44b</i>	6,306	0,407	4,611	0,407	2,904	0,527	13,344	0,707	4,303	1,820	1,219	2,729
<i>T 45c</i>	6,031	0,382	4,801	0,239	3,452	0,171	13,690	0,540	5,294	0,635	0,042	0,122
<i>T 46a</i>	6,048	0,403	4,691	0,235	3,409	0,215	11,689	0,415	4,736	0,554	0,045	0,128

<i>T 46c</i>	6,147	0,482	4,680	0,335	3,504	0,192	13,350	1,273	6,240	1,307	0,136	0,277
<i>T 48</i>	6,110	0,382	4,735	0,315	3,462	0,499	13,822	0,716	6,013	1,619	0,227	0,756
<i>T 58c</i>	6,144	0,421	4,604	0,319	3,602	0,377	10,733	0,980	6,187	0,938	0,262	0,377
<i>T 61</i>	6,201	0,260	4,724	0,308	2,874	0,321	14,534	0,960	4,804	2,247	0,968	1,558
<i>T 70a</i>	5,807	0,204	3,715	0,313	3,106	0,245	11,148	0,438	2,820	0,480	0,304	0,242
<i>T 76</i>	6,171	0,230	4,656	0,200	2,782	0,256	15,142	0,496	3,984	0,538	0,240	0,367
<i>T 81</i>	6,168	0,408	4,549	0,220	3,367	0,208	12,174	0,666	4,655	0,444	0,031	0,107
<i>T 99a</i>	6,162	0,406	4,851	0,242	3,721	0,232	11,937	0,318	6,592	0,634	0,304	0,294
<i>T 99e</i>	6,064	0,439	4,658	0,218	3,759	0,196	10,894	0,425	5,892	0,687	0,172	0,249
<i>T 100</i>	6,120	0,422	4,777	0,233	3,636	0,208	11,278	0,416	5,831	0,676	0,174	0,281
<i>T 101</i>	6,152	0,466	4,649	0,280	3,676	0,425	10,842	0,366	5,482	0,703	0,082	0,180
<i>T 104a</i>	4,210	0,880	3,674	0,497	3,322	0,324	15,763	0,442	5,281	0,524	0,185	0,259
<i>T 112d</i>	6,735	0,150	3,715	0,266	3,012	0,302	13,511	0,869	4,160	0,715	0,032	0,135
<i>T 116</i>	6,138	0,429	4,755	0,245	3,271	0,654	13,307	0,373	5,064	1,126	0,051	0,178
<i>T 117</i>	6,106	0,435	4,687	0,202	3,292	0,627	13,525	0,329	4,596	0,437	0,008	0,056
<i>T 37</i>	6,126	0,208	4,657	0,133	2,751	0,081	13,814	0,737	4,166	0,415	0,274	0,369
<i>T 52</i>	6,013	0,466	3,660	0,686	3,137	0,000	12,658	1,579	4,009	1,003	0,174	0,336
<i>T 95b</i>	5,980	0,388	4,608	0,520	3,203	0,149	13,807	0,988	4,869	0,476	0,409	0,455
<i>T 2c</i>	6,135	0,238	4,632	0,154	2,775	0,142	14,171	0,854	4,171	0,789	0,410	0,615
<i>T 3b</i>	6,235	0,251	4,588	0,184	2,824	0,161	13,961	0,483	4,157	0,499	0,333	0,366
<i>T 4a</i>	4,020	0,907	3,686	0,429	3,219	0,332	13,556	0,642	4,924	0,612	0,142	0,247
<i>T 37sz</i>	6,229	0,231	4,706	0,000	2,790	0,169	15,219	0,693	4,932	0,824	0,573	0,535
<i>T 42a</i>	4,491	1,012	3,922	0,496	3,378	0,315	14,409	0,865	5,047	0,670	0,202	0,302
<i>T 7a</i>	6,059	0,449	4,435	0,607	3,209	0,173	14,380	0,714	4,372	0,769	0,218	0,493
<i>T 27aab</i>	6,128	0,212	3,775	0,256	2,839	0,240	10,133	0,296	3,012	0,409	0,309	0,268

TABELA D.2 - VALORES DE REFLECTÂNCIA DEPOIS DOS DESBASTES

TALHÕES	TM 1	σ	TM 2	σ	TM 3	σ	TM 4	σ	TM 5	σ	TM 7	σ
<i>T 29b</i>	6,108	0,220	4,444	0,271	2,745	0,000	13,036	0,449	3,791	0,918	0,404	0,676
<i>T 84</i>	6,352	0,220	4,165	0,226	3,209	0,445	16,096	0,686	4,361	0,602	0,184	0,408
<i>T 85a</i>	6,329	0,230	3,984	0,277	2,835	0,310	14,659	0,689	3,376	0,459	0,012	0,067
<i>T 98</i>	5,968	0,383	4,616	0,228	3,238	0,744	13,493	0,315	4,908	0,639	0,062	0,164
<i>T 103a</i>	5,999	0,418	4,620	0,252	3,284	0,604	13,466	0,317	4,739	0,828	0,073	0,184
<i>T 105</i>	6,246	0,473	4,722	0,189	3,219	0,860	11,696	0,511	5,126	0,564	0,094	0,189
<i>T 107</i>	6,055	0,393	4,645	0,272	3,224	0,770	12,046	0,421	4,772	0,798	0,083	0,550
<i>T 108</i>	5,997	0,369	4,688	0,264	3,467	0,233	12,029	0,390	4,843	0,796	0,050	0,207
<i>T 110a</i>	6,267	0,437	4,868	0,254	3,575	0,234	14,435	0,420	6,358	0,485	0,166	0,236
<i>T 114a</i>	6,135	0,417	4,866	0,252	3,606	0,277	14,051	0,461	6,376	0,761	0,158	0,296
<i>T 8c</i>	4,180	1,040	3,756	0,404	3,246	0,324	14,425	0,591	4,916	0,585	0,138	0,234
<i>T 8d</i>	5,975	0,216	3,591	0,164	2,776	0,233	9,835	0,752	4,598	0,369	0,984	0,410
<i>T 11c</i>	6,269	0,242	4,629	0,180	3,010	0,287	11,877	0,291	5,898	0,556	1,345	0,549
<i>T 27a</i>	6,178	0,213	4,629	0,202	2,786	0,186	14,917	0,783	4,517	0,999	0,530	0,586
<i>T 39</i>	4,975	0,762	3,947	0,252	3,167	0,286	14,838	0,738	3,892	0,664	0,068	0,257
<i>T 40b</i>	6,706	0,124	3,843	0,165	3,333	0,333	13,569	1,127	5,255	0,831	0,431	0,652
<i>T 41a</i>	6,729	0,187	3,837	0,218	3,418	0,259	13,944	0,723	5,753	0,782	0,504	0,638
<i>T 44b</i>	5,670	1,469	4,250	0,664	3,646	0,933	13,863	1,038	5,172	2,726	1,622	3,114
<i>T 45c</i>	6,708	0,170	3,856	0,361	3,298	0,337	13,316	0,736	5,217	0,600	0,262	0,391
<i>T 46a</i>	6,802	0,190	3,725	0,254	3,394	0,292	11,358	0,780	5,234	0,799	0,558	0,712
<i>T 46c</i>	6,778	0,197	3,938	0,378	3,436	0,276	12,788	1,671	5,976	1,146	1,117	1,068
<i>T 48</i>	6,700	0,155	3,912	0,356	3,534	0,359	13,507	0,551	5,955	1,563	0,765	1,304
<i>T 58c</i>	6,391	0,239	4,212	0,233	3,457	0,511	13,246	0,656	5,635	0,617	0,581	0,589
<i>T 61</i>	5,343	0,851	4,449	0,622	3,578	0,603	15,527	1,397	5,294	3,726	0,956	2,233
<i>T 70a</i>	6,111	0,227	4,578	0,400	2,908	0,515	13,219	0,624	3,657	0,821	0,516	0,917
<i>T 76</i>	5,061	0,759	4,371	0,375	3,521	0,268	15,897	0,566	4,714	0,682	0,268	0,561
<i>T 81</i>	6,747	0,176	3,733	0,206	3,273	0,313	12,861	0,408	4,495	0,512	0,046	0,147
<i>T 99a</i>	6,373	0,250	3,973	0,271	3,123	0,362	15,962	0,463	4,976	0,455	0,373	0,491

<i>T 99e</i>	6,342	0,247	3,835	0,322	2,802	0,225	14,720	0,497	4,342	0,641	0,220	0,447
<i>T 100</i>	6,445	0,302	3,989	0,231	2,967	0,351	15,108	0,659	4,179	0,611	0,107	0,295
<i>T 101</i>	6,413	0,424	3,977	0,280	3,007	0,346	14,534	0,431	3,979	0,518	0,090	0,295
<i>T 104a</i>	5,933	0,196	3,500	0,160	2,680	0,247	10,432	0,284	3,089	0,467	0,351	0,336
<i>T 116</i>	6,354	0,282	3,930	0,318	2,735	0,276	16,926	0,817	3,936	1,062	0,128	0,405
<i>T 117</i>	6,707	0,143	3,348	0,773	2,940	0,273	13,923	0,638	4,220	0,504	0,048	0,220
<i>T 37</i>	5,048	0,873	4,143	0,356	3,318	0,289	14,241	1,079	4,366	0,559	0,136	0,311
<i>T 52</i>	5,969	0,254	3,704	0,362	3,181	0,127	9,477	0,409	4,619	0,344	0,937	0,333
<i>T 95b</i>	5,931	0,176	4,003	0,200	3,448	0,200	10,262	0,427	4,994	0,587	1,225	0,406
<i>T 2c</i>	5,214	0,776	4,325	0,369	3,449	0,231	14,382	0,920	4,207	0,687	0,104	0,294
<i>T 3b</i>	3,686	0,767	3,863	0,343	3,275	0,230	13,098	0,589	4,843	0,513	0,098	0,251
<i>T 4a</i>	6,095	0,269	3,936	0,274	3,060	0,255	10,498	0,407	4,421	0,435	0,857	0,435
<i>T 37sz</i>	5,716	0,816	4,721	0,489	3,635	0,305	16,757	0,863	5,068	0,822	0,558	0,745
<i>T 42a</i>	6,060	0,301	3,845	0,236	2,897	0,262	10,335	0,448	3,858	0,565	0,734	0,552
<i>T 7a</i>	5,968	0,193	4,101	0,232	3,493	0,174	10,732	0,411	4,700	0,379	0,873	0,372
<i>T 27aab</i>	6,332	0,421	5,004	0,231	3,744	0,196	13,009	0,434	6,520	0,459	0,262	0,331

TABELA D.3 - VALORES MÉDIOS DE REFLECTÂNCIA POR BANDA

	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
ANTES DOS DESBASTES	5,928	4,318	3,133	12,737	4,511	0,292
DEPOIS DOS	6,031	4,154	3,237	13,380	4,822	0,434

APÊNDICE E

VALORES DOS ÍNDICES E DAS PROPORÇÕES

TABELA E.1 - VALORES UTILIZADOS NA ANÁLISE ESTATÍSTICA

TALHÃ	VOLUME ¹		IAF ²		NDVI ³		SAVI ³		VEG ⁴		SOLO ⁴		SOMB ⁴	
	ANT.	POST.	ANT.	POST.	ANT.	POST.	ANT.	POST.	ANT.	POST.	ANT.	POST.	ANT.	POST.
<i>T 29b</i>	79,700	44,500	2,607	2,590	0,576	0,647	0,851	0,960	42,212	47,818	1,818	2,273	54,455	48,455
<i>T 84</i>	128,900	77,900	2,632	2,607	0,553	0,664	0,822	0,971	44,439	59,500	6,818	0,606	47,167	38,364
<i>T 85a</i>	144,000	107,900	2,640	2,622	0,549	0,672	0,815	0,983	42,450	55,230	5,120	-0,870	50,860	44,080
<i>T 98</i>	39,400	24,900	2,587	2,580	0,634	0,612	0,939	0,884	42,356	48,733	0,267	3,921	55,891	45,772
<i>T 103a</i>	70,000	56,600	2,603	2,596	0,642	0,605	0,952	0,884	43,737	48,788	-0,797	3,771	55,432	46,034
<i>T 105</i>	188,900	141,800	2,662	2,638	0,582	0,570	0,864	0,817	38,808	41,536	1,680	6,152	58,000	50,856
<i>T 107</i>	177,000	141,400	2,656	2,638	0,607	0,577	0,900	0,834	39,342	43,211	0,903	5,034	58,285	50,309
<i>T 108</i>	179,100	138,800	2,657	2,637	0,631	0,548	0,933	0,814	41,879	42,904	-0,013	5,350	56,611	50,191
<i>T 110a</i>	180,300	155,900	2,658	2,645	0,626	0,600	0,929	0,891	44,538	50,904	2,846	6,072	51,038	40,885
<i>T 114a</i>	220,400	194,800	2,678	2,665	0,641	0,589	0,949	0,875	44,039	49,331	1,662	7,032	52,773	42,130
<i>T 8c</i>	154,100	113,200	2,645	2,624	0,663	0,628	0,984	0,933	51,165	51,495	3,216	2,412	44,052	44,608
<i>T 8d</i>	120,000	83,100	2,628	2,609	0,594	0,555	0,883	0,821	47,431	33,235	6,235	7,569	44,863	57,627
<i>T 11c</i>	177,000	108,100	2,656	2,622	0,538	0,591	0,797	0,876	39,364	39,584	6,143	9,935	53,065	49,078
<i>T 27a</i>	108,000	70,800	2,622	2,603	0,570	0,681	0,845	0,993	42,727	54,273	4,974	2,481	50,779	41,779
<i>T 39</i>	202,500	143,200	2,669	2,639	0,668	0,644	0,987	0,955	51,924	54,587	1,163	0,152	45,391	43,859
<i>T 40b</i>	200,900	160,900	2,668	2,648	0,567	0,601	0,841	0,893	44,500	48,400	6,500	5,200	47,400	44,900
<i>T 41a</i>	200,900	128,900	2,668	2,632	0,612	0,602	0,909	0,895	50,091	49,318	5,807	6,045	42,636	43,182
<i>T 44b</i>	199,700	122,300	2,667	2,629	0,640	0,582	0,948	0,867	47,189	46,892	5,000	7,541	46,270	44,027
<i>T 45c</i>	191,900	142,300	2,663	2,639	0,594	0,599	0,882	0,890	49,091	47,742	4,818	4,955	44,545	45,773
<i>T 46a</i>	125,900	79,200	2,631	2,607	0,545	0,536	0,807	0,794	41,731	39,462	5,308	7,423	51,346	51,692
<i>T 46c</i>	167,800	144,300	2,651	2,640	0,579	0,568	0,860	0,845	46,783	43,457	7,109	8,891	44,522	46,152
<i>T 48</i>	178,500	91,400	2,657	2,613	0,596	0,582	0,886	0,865	48,704	46,840	6,506	7,494	43,333	44,086
<i>T 58c</i>	129,800	40,700	2,632	2,588	0,493	0,583	0,731	0,866	36,111	46,259	9,741	6,741	52,593	45,407

T 61	138,900	121,200	2,637	2,628	0,665	0,622	0,976	0,923	51,750	54,328	4,469	4,891	42,375	39,250
T 70a	97,700	78,500	2,616	2,607	0,561	0,637	0,830	0,945	40,955	48,258	1,843	2,337	55,730	47,820
T 76	52,900	36,200	2,594	2,586	0,686	0,635	0,996	0,941	56,137	57,411	0,600	1,789	41,768	39,211
T 81	128,300	82,700	2,632	2,609	0,562	0,590	0,834	0,877	43,821	47,012	4,685	3,383	49,963	48,043
T 99a	160,200	80,600	2,648	2,608	0,522	0,669	0,775	0,979	40,452	58,262	9,821	2,095	48,226	38,167
T 99e	149,000	71,200	2,642	2,603	0,483	0,676	0,717	0,990	37,049	54,268	8,927	1,244	52,390	42,927
T 100	148,500	82,700	2,642	2,609	0,508	0,668	0,754	0,976	38,758	56,141	8,505	0,717	51,222	41,727
T 101	125,000	49,200	2,630	2,592	0,491	0,653	0,724	0,967	37,479	54,000	7,896	0,688	52,917	43,771
T 104a	72,100	42,700	2,604	2,589	0,649	0,587	0,959	0,871	56,313	38,098	2,104	2,534	40,061	57,810
T 116	153,000	101,400	2,644	2,618	0,603	0,717	0,877	0,999	47,990	63,596	4,544	-1,736	46,005	36,544
T 117	206,800	135,300	2,671	2,635	0,607	0,646	0,885	0,959	49,293	51,687	3,320	1,381	45,891	45,456
T 37	128,000	65,900	2,632	2,601	0,663	0,617	0,981	0,917	50,712	51,572	2,242	2,023	45,647	44,905
T 52	233,100	142,200	2,684	2,639	0,594	0,493	0,882	0,729	46,222	31,667	2,611	8,333	49,722	58,500
T 95b	229,500	111,900	2,682	2,624	0,617	0,492	0,918	0,731	49,417	33,833	4,250	9,042	44,833	55,583
T 2c	166,500	102,400	2,651	2,619	0,667	0,609	0,985	0,904	51,902	52,280	2,220	1,788	44,538	44,439
T 3b	184,200	140,100	2,660	2,638	0,658	0,596	0,978	0,885	51,300	46,050	2,400	3,450	45,100	49,150
T 4a	150,500	69,900	2,643	2,603	0,612	0,544	0,909	0,807	47,940	36,126	3,142	6,858	47,366	55,552
T 37sz	213,700	141,200	2,674	2,638	0,687	0,641	0,994	0,953	55,038	60,346	3,115	2,731	40,308	35,538
T 42a	184,900	128,900	2,660	2,632	0,615	0,558	0,915	0,827	51,194	36,258	3,194	5,419	44,065	56,839
T 7a	243,100	184,000	2,689	2,660	0,629	0,504	0,936	0,748	52,493	36,401	2,331	7,768	43,669	54,373
T 27aab	198,100	147,500	2,667	2,641	0,559	0,548	0,828	0,815	37,027	44,907	2,920	8,707	58,507	44,920

¹ valores em m³cc/ha.

² adimensional.

³ valores de 0 a 1

⁴ valores percentuais.