



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.10.23.58-TDI

INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO NA ESTIMATIVA DE PAI EM FLORESTA OMBRÓFILA SUB-MONTANA

Clayton Borges da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Flávio Jorge Ponzoni, aprovada em 01 de julho de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E9KHKH>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.10.23.58-TDI

INFLUÊNCIA DA ILUMINAÇÃO NA ESTIMATIVA DE PAI EM FLORESTA OMBRÓFILA SUB-MONTANA

Clayton Borges da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Flávio Jorge Ponzoni, aprovada em 01 de julho de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E9KHKH>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Clayton Borges.
Si38i Influência da iluminação na estimativa de PAI em Floresta
 Ombrófila Sub-Montana / Clayton Borges da Silva. – São José
 dos Campos : INPE, 2013.
 xvii + 81 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/06.10.23.58-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
Orientador : Dr. Flávio Jorge Ponzoni.

1. influência da iluminação. 2. estimativa de PAI. 3. NDVI.
4. NDMI I.Título.

CDU 528.8.04(815.6)

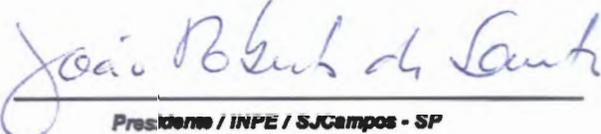


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

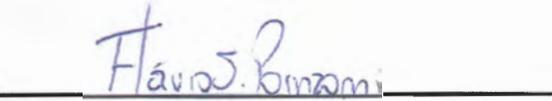
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. João Roberto dos Santos



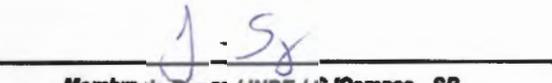
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



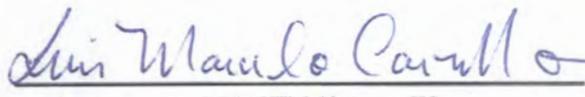
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho



Convidado(a) / UFLA / Lavras - MG

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Clayton Borges da Silva

São José dos Campos, 01 de Julho de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para realização da dissertação, auxílio financeiro nas campanhas de campo e pela participação em eventos científicos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de realizar o mestrado, bem como pelo apoio em infraestrutura e logística oferecidas ao longo do curso.

À prefeitura municipal do São José dos Campos que por meio das Secretaria Municipal de Meio Ambiente autorizou o acesso ao Parque Natural Municipal Augusto Ruschi bem como a todos os funcionários do parque que tão bem nos receberam durante toda a pesquisa.

Ao Dr. Flávio Jorge Ponzoni pela excelente orientação deste trabalho. As muitas discussões e troca de ideias foram fundamentais para o desenvolvimento da dissertação. Os conselhos, a paciência e a confiança a mim atribuída foram elementos propulsores desta dissertação.

Aos amigos: Otávio Montanher, Thiago Batista, Andressa D'Agostini, Luiz Felipe, Adriana Rodrigues, Catarina Marques, Annia Susim, Felipe Fávaro, Igor Peregrino e Jonas Cinquini, que (quase) sem reclamar encararam chuvas, raios, insetos, calor e principalmente acordar de madrugada para auxiliar nos trabalhos de campo.

À família do da república do Samambaia, já citados Igor, Felipe, Luiz, e ainda Pedro Fernandes e Gabriel Moulatlet, sempre dispostos a contribuir com o trabalho. Agradeço ainda ao meu amigo Leonardo de Deus, o motivador inicial deste mestrado no INPE.

A meus pais José e Lídia e irmãos Anderson e Laira que sempre em tempo me apoiaram nessa jornada.

A todos os colegas e professores da pós-graduação pela amizade, convívio e aprendizado compartilhados todo esse tempo.

RESUMO

Dentre os dados oriundos de produtos de sensoriamento remoto mais utilizados em estudos de vegetação encontram-se os chamados Índices de Vegetação, que são calculados a partir de valores de reflectância extraídos de imagens geradas por plataforma aéreas ou orbitais. Costumeiramente os valores resultantes destes índices são relacionados empiricamente ou fisicamente com parâmetros biofísicos da vegetação, principalmente o Índice de Área Foliar (IAF) ou outros de igual interpretação como o Índice de Área de Planta (PAI) sem, contudo, serem levados em consideração aspectos relacionados à topografia e à geometria de aquisição de dados (iluminação e visada). Este trabalho tem como objetivo apresentar através de um exemplo prático, alterações nas relações estabelecidas entre valores de PAI (obtidos em campo a partir da técnica de fotografias hemisféricas) e dois índices de vegetação calculados a partir de imagens do sensor orbital LISS-3. A área de estudo foi um fragmento de Floresta Ombrófila Densa Sub-Montana localizado em região de relevo acidentado. Foram estabelecidas correlações entre PAI e os índices de vegetação NDVI e NDMI em três períodos diferentes no ano de 2012, sejam eles: fevereiro, fim da estação chuvosa; julho, meio da estação seca; e outubro, fim da estação seca. Estes dados permitiram explorar mudanças nas condições de iluminação dos alvos ao longo do período de estudos. Os resultados comprovaram que a mudança do ângulo zenital de iluminação combinada à uma condição de relevo montanhoso exercem influência nas relações estabelecidas entre as duas variáveis em questão. Observou-se também que as características estruturais do dossel, como rugosidade, e altura das árvores influenciam nestas mesmas correlações, sendo que estruturas florestais menos complexas, com dossel mais homogêneo tendem a gerar correlações entre IAF e IVs melhor que em dosséis mais heterogêneos. Por fim, observou-se ainda que mesmo para uma floresta relativamente perene como a Mata Atlântica, as relações entre variáveis biofísicas como o PAI e índices de vegetação aqui explorados, não são absolutamente estáveis ao longo do ano. Devido às influências de múltiplos fatores relacionados às características de aquisição da cena em diferentes datas é possível que sejam geradas diferentes estimativas (NDVI e NDMI) de um mesmo valor de PAI observado em campo. Portanto, estimativas de PAI realizadas por meio destas relações não devem ser assumidas em termos absolutos ao longo do ano, ainda que para uma mesma formação florestal.

ILLUMINANCE EFFECTS ON PAI ESTIMATION FOR A SUBMONTANE RAINFOREST

ABSTRACT

Vegetation indices have been considered as the most relevant remote sensing products explored in vegetation studies. They have been calculated from reflectance values extracted from images generated by both airborne and/or orbital platforms. Usually the resulting vegetation indices are empirically or physically related to vegetation biophysical parameters mainly the Leaf Area Index (LAI) or similar parameters such as the Plant Area Index (PAI), neglecting aspects related to the topography or geometry data acquisition (illumination and observing). This work aims to evaluate through a practical example changes in the relationships established between PAI (estimated from hemispherical photographs) and two vegetation indices calculated from orbital images acquired by LISS-3 sensor. The study area was composed by a forest fragment located in the Atlantic rain forest growing at sharp relief conditions. Correlations were established between PAI and vegetation indices (NDVI and NDMI) in three different periods in the 2012 year: February (end of the rainy season), July (during the dry season), and October (end of the dry season). These data allowed exploring changes in local illumination conditions. The results showed that the solar zenith angle combined with a sharp relief condition influences the relationships between the two variables in question. Additionally it was also observed that the canopy structural characteristics such as roughness and height of trees have also influenced these relationships. The simplest canopy structure seems to generate stronger relationships between PAI and vegetation indices. Finally, even considering an evergreen forest as the forest fragment studied, the relationships between biophysical variables such as PAI and vegetation indices such as NDVI and NDMI are not stable throughout the year. Due to the influences of multiple factors related to the characteristics of the data acquisition at different dates, it is possible that different estimates (NDVI and NDMI) can be generated from the same amount of PAI observed in the field. Therefore, PAI estimates carried out from these relationships should not be taken in absolute terms throughout the year, even for the same forest formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- (A)Projeção angular zenital e azimutal do hemisfério celeste sobre o plano fotográfico. (B) Projeção dos pontos cardeais sobre a fração céu/vegetação resultante de uma FH.....	8
Figura 2.2-Fotografia Hemisférica de um dossel florestal. A metade “A” apresenta o dossel a partir de uma imagem tomada com a câmera em modo automático. “B” apresenta o mesmo dossel no modo manual, com exposição sub exposta, maximizando o contraste entre céu e vegetação.	11
Figura 2.3-Detalhe de uma fração de dossel obtidas em diferentes exposições. As figuras C, D e E permitem observar como a relação entre o céu e a vegetação é alterada pela exposição fotográfica. As figuras são referentes ao canal azul da imagem.....	11
Figura 2.4- Espectros obtidos em laboratório de folhas de vegetação sadia e vegetação senescente nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os tons de cinza indicam as diferentes regiões do espectro eletromagnético, os quatro retângulos negros sinalizam as faixas de operação do sensor indiano LISS-3, o qual foi utilizado neste estudo.....	15
Figura 2.5 – Influencia do relevo na condição de iluminação dos alvos.....	21
Figura 3.1 - Imagem Liss-3 do Parque Natural Municipal Augusto Ruschi e sua localização no município de São José dos Campos.	26
Figura 3.2 - Precipitação acumulada mensal (mm) e temperaturas média, mínima e máxima para a região de estudo no ano de 2012. As setas apontam o período aproximado da execução dos trabalhos de campo.	28
Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet, Estação Taubaté (2012).	28
Figura 3.3 - Posicionamento das parcelas sobre mapas de iluminação calculados para a data e hora de passagem do satélite (esquerda). Esquema da projeção da sombra para as respectivas datas (direita).....	30
Figura 4.1 - Perfis representativos dos dosséis Rugoso(A), Intermediário(B) e Liso(C).	37
Figura 4.2 - Diferença nos valores de PAI estimado em fotografia corretamente focada e desfocada.....	39

Figura 4.3 - Perfil A-B de imagem focada e desfocada a linha pontilhada mostra o limiar de fatiamento em 128 NDs. Através do perfil é possível observar que imagens desfocadas o valor do pixel atinge com menor frequência o limiar de fatiamento em 128.....	40
Figura 4.4 - Valor médio e desvio padrão do IAFestimado a partir das FH nas três etapas de campo.	41
Figura 4.5 - FH de dosséis com diferentes densidades e respectivo PAI calculado para as três etapas de campo.....	43
Figura 4.6- Fator cosseno e índices de vegetação e perfil espectral da vegetação para cada parcela nas três etapas, à direita o perfil estrutural longitudinal da respectiva parcela.	44
Figura 4.7 - Refletância espectral média dos dosséis para os três períodos de estudo...	49
Figura 4.8- Evolução dos valores de PAI e IVs com o desvio padrão para nas três etapas de pesquisa.	52
Figura 4.9- Variação do PAI, NDVI e NDMI para as etapas de julho e outubro em relação à etapa de fevereiro.....	52
Figura 4.10 - Relação entre IVs x PAI para as três etapas do estudo.....	53
Figura 4.11- Relação entre o fator cosseno e os índices de vegetação nas três etapas do estudo.	54
Figura 4.12 - Nuvem de dispersão das regressões entre PAI e IVs para as três etapas de pesquisa.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais características do sensor LISS-3.....	23
Tabela 3.1- Características gerais dos dados referentes às etapas de aquisição de dados.	29
Tabela 3.2 - Parâmetros das bandas do sensor LISS-3.....	32
Tabela 3.3 - Parâmetros de aquisição das imagens LISS-3 nas respectivas datas.....	33
Tabela 4.1- Características estruturais do dossel em cada parcela amostrada.....	38
Tabela 4.2 -Valores dePAI para cada parcela ao longo das três etapas.....	42
Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação entre PAI e Índices de Vegetação para grupos de parcelas sob diferentes condições de iluminação ao longo das etapas de coleta de dados em campo. Em amarelo as amostras bem iluminadas, em cinza claro a amostras Iluminadas, e em cinza escuro as amostras Pouco Iluminadas.	56
Tabela 4.4 - Coeficiente de correlação (R) entre os parâmetros biofísicos estimados e os índices de vegetação PAI, NDVI e NDMI para as três etapas do estudo.	57
Tabela 4.5 – Coeficiente de correlação calculados para as relações entre PAI e índices de vegetação considerando a estrutura dos dosséis florestais.	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

6S	<i>Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum Vector Code</i>
CCD	<i>Charged Coupled device</i>
DAF	<i>Distribuição Angular das Folhas</i>
DAP	<i>Diâmetro à Altura do Peito</i>
FDRB	<i>Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional</i>
FH	<i>Fotografias Hemisféricas</i>
GLA	<i>Gap Light Analyser Resources Analysis Support System</i>
H	<i>Altura total</i>
IAF	<i>Índice de Área Foliar</i>
PAI	<i>Índice de área de planta</i>
IAV	<i>Índice de Área de Vegetação</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IGFOV	<i>Ground Instantaneous Field of View</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
IV	<i>Índice de Vegetação</i>
IVM	<i>Infravermelho Médio</i>
IVP	<i>Infravermelho Próximo</i>
LISS-3	<i>Linear Imaging Self Scanning Sensor</i>
ND	<i>Número Digital</i>
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NRSA	<i>National Remote Sensing Agency</i>
RD	<i>Rugosidade do dossel</i>
REM	<i>Radiação Eletromagnética</i>
RGB	<i>Red/Green/Blue</i>
SR	<i>Sensoriamento Remoto</i>
TRAC	<i>Tracing Radiation and Architecture of Canopies</i>
VAI	<i>Vegetation Area Index</i>
VIS	<i>Visível</i>
MDE	<i>Modelo Digital de Elevação</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contexto e justificativa	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Área de Planta (PAI)	5
2.2. Métodos de estimativa de IAF	6
2.3. Estimativas de IAF a partir de técnicas de campo	6
2.4. Estimativas do PAI por Fotografias Hemisféricas	7
2.5. Procedimentos recomendados para a geração das estimativas de PAI por fotografias hemisféricas	9
2.6. Estimativa de IAF por dados Orbitais.....	13
2.7. Os índices de vegetação no monitoramento e na estimativa de biomassa	15
2.8. Fatores que interferem nas estimativas de IAF a partir de dados Orbitais	18
2.9. Variação fenológica	18
2.10. Anisotropia da vegetação.....	19
2.11. O relevo e as alterações radiométricas provocadas pela topografia.....	21
2.12. O sensor LISS-3/Resourcesat - 1(IRS-P6).....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1. Área de Estudo.....	25
3.2. Definição das datas para execução dos trabalhos de campo	28
3.3. Localização das parcelas e definição das classes de iluminação	29
3.4. Coleta de dados biométricos em campo	31
3.5. Obtenção e pré-processamento dados radiométricos orbitais	31
3.6. Análise dos dados	33
3.6.1 - Influência do ângulo zenital de iluminação nas correlações entre PAI e IVs	34
3.6.2 - Influência do relevo na iluminação das amostras	34
3.6.3 - Influência das características estruturais na relação PAI x IVs	34
3.7. Análises estatísticas	35

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Caracterização estrutural dos dosséis.....	37
4.2. Tomada de fotografias hemisféricas	38
4.3. Estimativas de PAI a partir de fotografias hemisféricas	41
4.4. Caracterização espectral da vegetação a partir dos dados LISS-3 para cada etapa de campo.....	43
4.5. Resposta dos Índices de Vegetação às alterações do PAI observadas em campo.	51
4.6. Análises da correlação entre PAI e Índices de Vegetação	53
4.7. Dinâmica da iluminação e seu efeito sobre as correlações entre PAI e os índices de vegetação.	55
4.8. Correlações entre PAI e características estruturais do dossel	56
4.9. Comparação multi-temporal da relação entre PAI x IVs.....	58
5. CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE A – TABELAS COM OS PARÂMETROS DE CADA PARCELA REFERENTES ÀS TRÊS ETAPAS DE CAMPO	71
APÊNDICE B – PERFIS TRANVERSAIS DA VEGETAÇÃO	75
APÊNDICE C – TABELA DE CAMPO (DADOS DENDROMÉTRICOS)	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e justificativa

O estudo e o monitoramento da superfície florestada da Terra tem sido alvo de crescente número de pesquisas nos últimos anos, sobretudo devido à sua importância para estudos relacionados às mudanças climáticas (XIE et al. 2008). Estes estudos muitas vezes levam em consideração valores de parâmetros biofísicos da cobertura vegetal como dados de entrada para modelos que estimam cenários climáticos, modelos hidrológicos e a produtividade primária da vegetação.

A estimativa destes parâmetros é de difícil execução a partir de técnicas tradicionalmente aplicadas em campo devido à necessidade de grande número de amostras, envolvendo altos custos de execução. Estas restrições ocorrem especialmente em estudos envolvendo grandes extensões territoriais e necessitam contínua geração de dados (GREEN et al. 1997; ZHENG; MOSKAL, 2009).

O Sensoriamento Remoto (SR) tem se mostrado uma ferramenta eficiente em estudos que envolvem o monitoramento da vegetação em grandes extensões territoriais (JUSTICE et al. 1985; CHANDOLA et al. 2010). Entre suas vantagens está a capacidade de estimar parâmetros bio-geoquímicos da vegetação como biomassa, quantidade de água na folha, concentração de clorofila, evapotranspiração (JENSEN, 2011). Um dos parâmetros mais amplamente utilizados e explorados em diversos estudos é o Índice de área foliar (IAF) que é diretamente relacionado à produtividade fotossintética da vegetação e é frequentemente relacionado à biomassa vegetal (HUETE, 1988). A habilidade e a capacidade de estimar o IAF constituem-se em vantagens no monitoramento e na modelagem de processos ecológicos em florestas (CAMPS-VALLS et al. 2006).

O levantamento das variáveis biofísicas a partir de dados de SR é realizado geralmente a partir de modelos empíricos ou semi-empíricos desenvolvidos a partir de modelos de transferência radiativa. Os modelos empíricos são construídos pelo conhecimento

derivado de experimentos de laboratório, campo ou a partir de simulações de dados de SR (FRANKLIN, 2001) que são fundamentadas na aplicação de modelos de regressão estabelecidos entre variáveis biofísicas medidas em campo e dados radiométricos como a refletância ou índices de vegetação, extraídos de produtos de sensoriamento remoto gerados a partir de diferentes níveis de coleta (BREUNIG, 2011).

Os modelos semi-empíricos ou modelos de transferência radiativa associam informações oriundas de métodos empíricos e de modelos físicos envolvidos na transmissão e na interação da radiação com os alvos. Estes modelos têm como objetivo melhorar a correlação entre as estimativas através de dados auxiliares do alvo (por exemplo, a estrutura do dossel, o ângulo de distribuição foliar, a orientação do plantio, etc) ou relacionados ao processo de aquisição dos dados (como os ângulos de iluminação e de visada) (FRANKLIN, 2001). Um dos sistemas orbitais amplamente utilizados para estimar o Índice de Área Foliar (IAF) o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) se vale de modelos de transferência radiativa para a geração das estimativas de IAF (GALVÃO et al. 2011). Todavia, a baixa resolução espacial das imagens impede que os produtos do MODIS sejam satisfatoriamente utilizados em estudos que exijam maior escala cartográfica. Por consequência, grande parte dos usuários ainda utiliza modelos empíricos, construídos a partir de dados de melhor resolução espacial, com o objetivo de estabelecer correlações com estimativas do IAF em estudos que requerem melhor detalhamento.

Independente do modelo adotado é importante observar que vários fatores interferem na resposta espectral dos dosséis florestais à radiação incidente. Colwell (1974) destaca que a interação da radiação com dosséis é dependente de fatores morfológicos e fisiológicos da vegetação, além de outros relacionados à geometria de visada e de iluminação.

Conforme observam Breunig et al. (2009), e Galvão et al. (2011) dentre os fatores que impactam as estimativas de parâmetros biofísicos da vegetação geradas a partir de sensores orbitais está a condição de iluminação do alvo determinada pelo ângulo zenital de iluminação (AZI) que se altera sazonalmente. Os efeitos desta mudança do AZI

tornam-se ainda mais complexos quando o objeto em estudo encontra-se em áreas de relevo movimentado tendo em vista que a variação topográfica influencia diretamente na quantidade de energia/m² que atinge a superfície causando diferenças nas condições de iluminação também em âmbito local.

A grande parte dos estudos que analisam a influência de fatores geométricos e morfológicos na refletância de dosséis tem sido realizada para culturas agrônômicas que se desenvolvem principalmente em áreas de relevo plano, outros trabalhos são relacionados a florestas temperadas do hemisfério norte. E embora alguns trabalhos sejam voltados para a floresta Amazônica, seus resultados são específicos para as características biofísicas e estruturais destas culturas e florestas de modo que não podem ser extrapolados universalmente para toda e qualquer formação florestal e ainda sem levar em consideração as condições de relevo do terreno onde se desenvolvem, dadas às características anisotrópicas da vegetação.

Em áreas de relevo plano a variação do AZI implica na mudança da condição de iluminação local de modo semelhante para cada ponto da superfície, tendo em vista que a variação da geometria fonte-alvo-sensor se dá de forma parecida para a maior parte dos pontos na superfície. Em áreas de relevo acidentado esta condição se altera, cada ponto no terreno apresenta declividade e orientação de vertente característico, de modo que, mudanças no AZI alteram a condição de iluminação local de forma particular.

Considerando que os dados espectrais ou radiométricos são influenciados pela geometria de observação e de iluminação e que o relevo acarreta diferenças nas quantidades de energia recebida na superfície da Terra, espera-se que as relações entre os parâmetros biofísicos da vegetação e os dados radiométricos gerados a partir de plataformas orbitais sejam igualmente influenciadas por essas mudanças na condição de iluminação local.

Muitos dos estudos que correlacionam dados de sensores orbitais e parâmetros biofísicos da vegetação, em especial aqueles direcionados a florestas, adotam métodos indiretos baseados em sistemas ópticos como Fotografias Hemisféricas (FH), para a geração de dados de campo, a exemplo do que utilizaram Canham et al. (1990), Hale et

al. (2009) e Marsden et al. (2010). Quando da adoção destes métodos ópticos em campo, o termo IAF é normalmente substituído pelo termo Índice de Área de Planta (PAI – *Plant Area Index*) devido à impossibilidade da técnica de distinguir a fração fotossinteticamente ativa dos demais constituintes do dossel.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar, em diferentes períodos do ano, a influência da condição de iluminação local, imposta pela topografia, nas relações empíricas estabelecidas entre os IVs e valores de PAI em uma área com vegetação típica do bioma Mata Atlântica desenvolvida em área de relevo acidentado.

Para alcançar este objetivo principal estabelecemos os seguintes objetivos específicos:

- Estimar valores de PAI em diferentes épocas do ano mediante o emprego de fotografias hemisféricas tomadas no interior de um dossel florestal em pontos arbitrariamente definidos no terreno, procurando explorar variações de relevo;
- Estabelecer e avaliar as relações empíricas entre PAI e dados radiométricos extraídos de imagens orbitais referentes a períodos próximos às datas de levantamento de campo.
- Avaliar possíveis influências da estrutura da vegetação (altura dos indivíduos, rugosidade do dossel, diâmetro à altura do peito) nas correlações entre o dado de campo e o dado orbital.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Índice de Área Foliar (IAF) e o Índice de Área de Planta (PAI)

A variação anual da densidade foliar nas florestas é um exemplo de resposta fenológica da vegetação a algum tipo de mudança ambiental. Os estudos relacionados à vitalidade e às condições de crescimento da vegetação, normalmente levam em conta a análise do vigor de suas folhas (FRANKLIN, 2001). As folhas são órgãos fotossintetizantes por excelência, havendo uma relação muito estreita entre sua quantidade e a atividade fotossintética da vegetação (PALOSCIA, 2002). Principal meio de contato da vegetação com a atmosfera as folhas são ainda responsáveis por importantes processos fisiológicos, como a respiração, transpiração e reserva de nutrientes (POCEWICZ et al. 2004).

A mensuração da densidade das folhas nos dosséis é expressa por uma grandeza adimensional chamada Índice de Área Foliar (IAF). O IAF é definido pela razão da área total de uma das faces (ou limbo) das folhas por área no terreno, conforme observado na equação 2.1 apresentada por Ponzoni et al. (2012).

$$\text{IAF} = \frac{\text{área de folhas cm}^2}{\text{área no terreno cm}^2} \quad (2.1)$$

O IAF tem sido amplamente utilizado como parâmetro de investigação do vigor da vegetação, seja em análises empíricas ou como dado de entrada para modelos para avaliação do crescimento de florestas, trocas gasosas entre a vegetação e a atmosfera, balanço de água e práticas de manejo em sistemas florestais ou agrícolas (MAIRE, LE et al. 2011). Qualquer modificação no valor do IAF seja por causas naturais como tempestades, sazonalidade, doenças ou por manejos florestais, tem como consequência a alteração na produtividade fotossintética da vegetação (POCEWICZ et al. 2004).

O IAF é dependente da espécie vegetal, de seu estágio de desenvolvimento e do seu estado fenológico. Devido à grande quantidade de informações possíveis de serem investigadas a partir deste parâmetro, a precisão dos métodos de estimá-lo tem sido alvo de vários estudos há décadas (GOEL; STREBEL, 1983).

2.2. Métodos de estimativa de IAF

A estimativa dos valores de IAF pode ser feita a partir de técnicas de campo ou remotamente a partir de dados radiométricos coletados por aeronaves ou por sensores orbitais. Dentre as técnicas de campo destacam-se os métodos diretos (com contato físico e em alguns casos destrutivos) e indiretos (normalmente sem contato físico).

2.3. Estimativas de IAF a partir de técnicas de campo

Os métodos diretos, em especial com abordagem destrutiva, são considerados como mais precisos. São executados, entre outros, a partir da retirada e da mensuração da área das folhas através de *scanners* ou pela análise da relação entre o peso e a área da folha (WEISS, et al. 2004). No entanto, requerem muito tempo para sua execução e sua abordagem destrutiva dificulta a adoção em estudos multi-temporais ou em áreas em que a supressão da vegetação não é possível. Por estas características, estes têm sido usados preferencialmente em pesquisas de culturas agrícolas anuais, ou como referência para a calibração de outras técnicas de se estimar o IAF (JONCKHEERE et al. 2004; ZHENG; MOSKAL, 2009).

Dentre as técnicas indiretas de se estimar o IAF destacam-se os métodos ópticos que se fundamentam na relação entre a transmissão da radiação e a estrutura e a quantidade de folhas da copa (RICH, 1990). Esta abordagem tem sido utilizada devido à suas vantagens por ser um método mais rápido, de menor custo e logisticamente mais viável que os métodos diretos (GOSA et al. 2007). Para alguns pesquisadores como Chen (1996) os métodos ópticos podem gerar estimativas mais precisas que métodos destrutivos. As principais formas de estimativa indireta por meios ópticos em campo são: o LAI 2000, o *Tracing radiation and Architecture of Canopies* (TRAC), o *Plant Canopy Analyzer* (LI-COR) e por meio de Fotografias Hemisféricas (FH) cujo princípio de operação será abordado mais adiante.

Diversos pesquisadores como Canham et al.(1990), Hale et al.(2009) e Marsden et al. (2010), tem utilizado sistemas ópticos como Fotografias Hemisféricas para a geração de dados de validação em campo, sobretudo devido a rapidez na geração dos dados e aos

bons resultados da técnica. Baldocchi (1984) utilizou fotografias hemisféricas para analisar a capacidade de penetração da luz em dosséis de *oak-hickory* ao longo de um ano. O autor observou boa sensibilidade da técnica à variação fenológica daquele tipo de floresta. Recentes trabalhos no Brasil como o de Cantinho (2012) fizeram uso desta técnica para a geração de dados de referência em suas pesquisas.

2.4. Estimativas do PAI por Fotografias Hemisféricas

A aplicação de Fotografias Hemisféricas é uma técnica indireta para estimar parâmetros biofísicos, estruturais e fisiológicos. Apresenta como vantagem o fato de ser não destrutiva, de fácil e rápida utilização e baixo custo (RICH, 1990). A técnica se vale de modelos de transferência radiativa que se fundamentam na análise estatística da radiação difusa da esfera celeste que consegue atravessar os estratos superiores da copa das árvores e atingir um ponto no interior do dossel. O processo é feito através da aquisição de fotografias hemisféricas tomadas no interior do dossel, normalmente 1,2m acima do solo, com a objetiva voltada para o céu e orientada segundo os pontos cardeais.

A imagem resultante é a projeção do hemisfério celeste sobre uma superfície plana, (JONCKHEERE et al. 2004). Ela apresenta a fração vegetação/não vegetação da esfera celeste para aquele ponto no interior da floresta, fração esta que é relacionada à quantidade de folhas, à estrutura foliar e à distribuição e ao arranjo da arquitetura/estrutura do dossel. O centro da imagem corresponde ao zênite e as bordas do hemisfério projetado correspondem ao horizonte. A Figura 2.1 apresenta o sistema de coordenadas de uma fotografia hemisférica, como pode se observar que cada ponto da imagem pode ser identificado pelo seu ângulo zenital e azimutal.

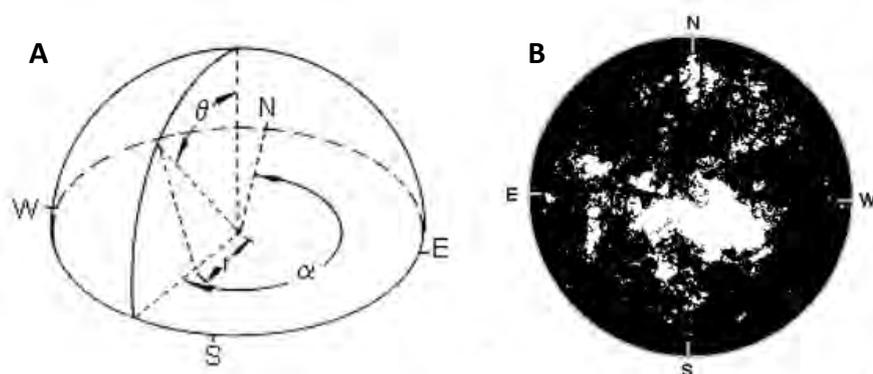


Figura 2.1- (A) Projeção angular zenital e azimutal do hemisfério celeste sobre o plano fotográfico. (B) Projeção dos pontos cardeais sobre a fração céu/vegetação resultante de uma FH.

Fonte: Adaptada de Rich (1990).

Uma característica da FH enquanto método óptico indireto é sua incapacidade em distinguir o material fotossinteticamente ativo de outros elementos que constituem o dossel como a liteira, frutos, galhos e troncos. Por este motivo vários pesquisadores atribuem à FH a capacidade de estimar não o IAF, mas sim um Índice de Área de Planta (PAI) ou Índice de área de Vegetação (IAV). Outros pesquisadores como Chen e Black (1992) preferem o termo IAF efetivo (L_e) em referencia ao IAF estimado a partir de métodos ópticos de campo. Neste estudo adotaremos o termo PAI, ou Índice de Área de Planta em conformidade com sua sigla no idioma Inglês.

A estimativa do PAI é fundamentada na lei de Beers Lambert a qual pressupõe que a partir da relação entre a absorvância e a transmitância de um meio é possível estimar os parâmetros que levaram à extinção da radiação nele incidente (CANHAM et al. 1990; JONCKHEERE et al. 2004). No caso da vegetação, pela análise do coeficiente de extinção (neste caso, dado pela fração não vegetação ou *gap fraction*) estima-se a quantidade de elementos (folhas, galhos ou troncos) que absorveram ou desviaram a radiação antes que ela atingisse a objetiva da câmera. (RICH, 1990; LEBLANC et al. 2002; BRÉDA, 2003).

A *Gap fraction* que neste caso representa a transmitância do dossel é dada através da Equação 2.2 apresentada por Bréda (2003).

$$P(\theta) = e^{-G(\theta,a)PAI/\cos(\theta)} \quad (2.2)$$

Em que:

- $P(\theta)$ = fração vazia (*gap fraction*), o pixel claro na imagem do dossel;
 $G(\theta, a)$ = chamada de função G corresponde à fração de folhas projetadas no plano normal à direção zenital, e é dependente da distribuição angular das folhas;
 PAI = índice de área de planta, e normalmente o dado que se deseja recuperar;
 θ = ângulo zenital de visada do quadrante analisado;

Nessa abordagem, assume-se que a Distribuição Angular de Folhas (DAF) é aleatória, o que nem sempre ocorre na natureza. Tendo em vista que a transmitância do dossel ou valor de P (*gap fraction*) é dada pela fotografia mediante a inversão da Equação 2.2 é possível estimar as variáveis que influenciam nesta transmitância. Isolando-se o termo PAI temos a Equação 2.3.

$$PAI = \ln(P(\theta)) \cdot \cos(\theta) / G(\theta) \quad (2.3)$$

O tamanho da área de amostragem e a quantidade de fotografias ideais para a geração das estimativas têm sido pouco discutidos na literatura. Canham et al. (1990) utilizaram dez fotografias hemisféricas aleatoriamente distribuídas em cada sitio experimental na condução de estudos sobre dosséis florestais no hemisfério norte. Gardingen et al. (1999) utilizaram doze amostras em seus estudos para transectos de aproximadamente 660m², enquanto Hale et al. (2009) utilizaram 7 e 9 fotografias para cada transecto de 640m² e 1000m² respectivamente. Nenhum destes pesquisadores discutiu como os resultados foram influenciados pelo número ou disposição das amostras em campo.

2.5. Procedimentos recomendados para a geração das estimativas de PAI por fotografias hemisféricas

Muitos fatores interferem nas estimativas dos parâmetros biofísicos obtidos por meio de FHs de forma que alguns cuidados devem ser tomados durante o processo de aquisição e de processamento das imagens com o objetivo de minimizar possíveis erros de amostragem (JONCKHEERE et al. 2004; KEARSLEY, 2011).

A tomada das fotografias deve ser feita em condição de iluminação difusa, céu nublado ou iluminação crepuscular. Deve-se evitar condições de céu claro com iluminação direta, pois o brilho direto do Sol sobre a lente da máquina pode ofuscar feições da vegetação. Além disso, a iluminação direta do Sol sobre as folhas e galhos pode aumentar excessivamente seu brilho fazendo com que estes objetos sejam erroneamente classificados como céu durante o processamento das imagens (KEARSLEY, 2011).

A regulagem do equipamento definindo a exposição das imagens é considerada uma das principais fontes de erros nos processos de estimativa do PAI por FH (RICH, 1990; JONCKHEERE et al. 2005; ZHANG et al. 2005). O processo de aquisição deve sempre ser conduzido pela busca do maior contraste possível entre o céu e a vegetação de modo que os pixels referentes ao céu sejam claros e os demais pixels sejam escuros.

Zhang et al. (2005) observaram que o uso da exposição automática é inadequada, pois gera imagens com baixo contraste e superestima as frações abertas do dossel especialmente em dosséis densos, podendo reduzir as estimativas de PAI em até 70%. Este efeito ocorre porque a exposição automática permite a entrada de grande quantidade de luz, saturando grande quantidade de pixels no entorno da fração céu, ofuscando parte da fração vegetativa. Além disso, o baixo contraste das fotografias tomadas com exposição automática dificulta a detecção da borda entre o céu e a vegetação dificultando o processo de classificação das imagens.

Mesmo em fotografias tomadas no modo de exposição manual é importante buscar o ajuste ideal de contraste para evitar a exposição inadequada das amostras. Diversos pesquisadores tem proposto métodos para a identificação da exposição ideal para a tomada das fotografias como Zheng et al. (2005) e Wagner (1998), todos eles destacam a necessidade da regulagem do equipamento no modo manual, buscando a subexposição das tomadas para maximizar o contraste e facilitar a identificação das bordas. Fotografias excessivamente sub-expostas também devem ser evitadas sob o risco de que pequenas frações abertas em meio ao dossel não sejam adequadamente registradas. A Figura 2.2 apresenta um dossel com a parte esquerda tomada com exposição automática e a direita com exposição manual.



Figura 2.2-Fotografia Hemisférica de um dossel florestal. A metade “A” apresenta o dossel a partir de uma imagem tomada com a câmera em modo automático. “B” apresenta o mesmo dossel no modo manual, com exposição subexposta, maximizando o contraste entre céu e vegetação.

A Figura 2.3 apresenta a sequência de fotografias tomadas com diferentes exposições do mesmo dossel florestal da figura anterior. No detalhe é possível observar como a exposição altera a relação céu/vegetação do mesmo dossel, impactando diretamente o cálculo do PAI.



Figura 2.3-Detalhe de uma fração de dossel obtidas em diferentes exposições. As figuras C, D e E permitem observar como a relação entre o céu e a vegetação é alterada pela exposição fotográfica. As figuras são referentes ao canal azul da imagem.

Na fase de processamento de imagens a etapa mais crítica é a definição do limiar de classificação ou de fatiamento da imagem (*thresholding*) (NOBIS; HUNZIKER, 2005; JONCKHEERE et al. 2005; KEARSLEY, 2011). Este limiar define o valor em número digital (ND) a partir do qual cada pixel da imagem será definido como fração vegetativa ou não vegetativa. Os pixels com número digital abaixo deste limiar são considerados vegetação, aqueles com ND acima do limiar adotado são classificados como fração não vegetativa, correspondendo à fração céu, ou seja os *gap fractions*. A definição de limiares muito baixos pode determinar a perda de elementos da vegetação, aumentando erroneamente a fração aberta do dossel. Todavia, limiares muito altos podem obscurecer os *gap fractions* existentes superestimando o PAI.

Pela importância da definição deste parâmetro, propostas para a definição deste limiar é alvo de vários estudos como os de Kato e Komiyama (2000), Hobis e Hunzinkger (2005) e Juárez et al. (2009).

Hobis e Hunziker (2005) desenvolveram um algoritmo de detecção automática de borda. Este método testa como limiar de separação todos os valores entre 0 e 255 no canal desejado, o valor selecionado é baseado na máxima distância entre as médias de ND dos dois grupos separados no fatiamento de um histograma. Este algoritmo de detecção de bordas está implementado no aplicativo Sidelook disponível em www.appleco.ch.

Embora alguns estudos tenham demonstrado que FH tende a subestimar os valores de PAI, sobretudo quando a DAF não é aleatória (WEISS, et al. 2004), a técnica é reconhecidamente sensível à variação do sazonal da vegetação (RICH, 1990; BRÉDA, 2003). Rich (1990) destaca que as FHs quando tomadas repetitivamente em um mesmo ponto ao longo do tempo permitem o acompanhamento da dinâmica temporal da densidade foliar do dossel.

Esta capacidade tem sido explorada para a geração de dados de validação em estudos que avaliam o ciclo fenológico da vegetação a partir de sistemas ópticos, a exemplo dos estudos de Sea et al. (2011), Cantinho (2012).

2.6. Estimativa de IAF por dados Orbitais

Pelo exposto anteriormente, fica claro que pelos métodos fundamentados em coleta de dados em campo e na teoria da transferência radiativa, o principal parâmetro estimado é aquilo que denominamos PAI. Apesar disso, quando trabalhamos com outros produtos de sensoriamento remoto como fotografias aéreas, imagens geradas por sensores aerotransportados ou orbitais, o parâmetro que, causa mais impacto nos padrões apresentados pelos dosséis vegetais nesses produtos é o IAF.

Embora muito utilizados, os métodos de campo apresentam como limitação o fato de gerarem apenas amostras pontuais, além da necessidade de que sejam feitas incursões de campo sempre que forem necessários novos dados (KIM, 2004). Tais aspectos são particularmente críticos quando envolvem estudos em florestas que se caracterizam por apresentar maior dificuldade de acesso tendo em vista a estrutura de dossel muito mais complexa que a de áreas campestres e sistemas agrícolas (LEE, 2004).

Para minimizar estes problemas, técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo usadas há décadas com o objetivo de gerar estimativas de IAF a partir de dados orbitais (GOEL; STREBEL, 1983). Segundo Curram et al. (1995), a estimativa do IAF a partir de dados de sensoriamento remoto foi, a princípio, baseada na análise das relações empíricas estabelecidas entre medidas de campo e as respostas espectrais observadas nos sensores. Inúmeros estudos ainda utilizam esta abordagem, avaliando o quão próxima é a relação entre dados obtidos em campo e produtos gerados a partir de dados de sensores remotos. Embora já existam modelos de transferência radiativa que efetivamente geram estimativas do IAF a partir de dados radiométricos de plataformas orbitais, os mesmos ainda se mostram muito complexos e sua utilização ainda é muito restrita.

As técnicas de sensoriamento remoto se fundamentam em explorar a interação da Radiação Eletromagnética (REM) com os diferentes alvos terrestres, que refletem ou emitem a REM em diferentes intensidades ao longo de seu espectro. Cada alvo tem um comportamento espectral que lhe é típico devido a suas características físicas químicas ou biológicas.

A folha é o elemento do dossel que mais contribui para o sinal detectado pelos sensores remotos (COLWELL, 1974). Seu comportamento espectral é, segundo, Ponzoni et al. (2012), dependente da análise conjunta de fatores, relacionados aos pigmentos fotossintetizantes, à água e a fatores estruturais como a organização dos tecidos da folha.

Estes fatores atuam em diferentes faixas do espectro eletromagnético e uma vez que a maioria dos sensores disponíveis explora três regiões bem definidas do espectro eletromagnético, a refletância da folha sadia pode ser brevemente descrita em cada uma destas regiões pelos seguintes aspectos principais:

- A região do visível (VIS) (0,4 a 0,7 μm) se caracteriza por grande absorção da REM devido à presença de pigmentos absorvedores como a clorofilas, carotenos e xantofilas. Esta faixa é especialmente importante devido ao fato de que o bom funcionamento destes pigmentos, em especial a clorofila, pode ser diretamente relacionado à produção fotossintética. Quanto maior o volume de clorofilas em funcionamento, maior a absorção da energia eletromagnética e menor a refletância nas faixas de 0,42 μm e 0,67 μm (GAO, 1996).
- Na região do infravermelho próximo (IVP) (0,72 μm a 1,1 μm) a refletância e a transmitância estão associadas à estrutura interna das folhas, sendo mínima a absorção. Quanto mais lacunosa estiver a estrutura celular, maior é o espalhamento interno da radiação incidente e, portanto, maior a refletância e a transmitância. Esta faixa é de importância especial para o SR da vegetação porque nela se caracteriza o aumento da refletância associado ao aumento do número de camadas de folhas, fenômeno chamado Reflexão Aditiva ou Reflexão Infinita. Embora esta correlação não seja linear e ocorra somente até certo número de camadas ela é intensamente explorada para o SR da vegetação (JENSEN, 2009; PONZONI et al. 2012).

- A região do infravermelho médio (IVM) (1,1 μ m a 3,2 μ m) caracteriza-se por ser sensível ao conteúdo de água na folha. Quanto maior o conteúdo de água na folha maior é a absorção da REM nesta região. (TUCKER, 1980; PONZONI et al. 2012).

A Figura 2.4 apresenta o comportamento espectral de uma folha sadia, e de uma folha senescente, por meio da qual é possível observar as diferenças na reflectância espectral da folha nestes dois estados ao longo destas três regiões do espectro eletromagnético.

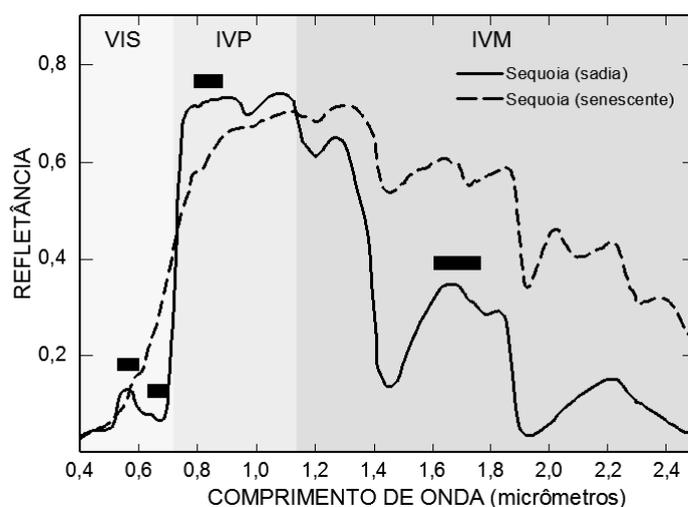


Figura 2.4- Espectros obtidos em laboratório de folhas de vegetação sadia e vegetação senescente nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os tons de cinza indicam as diferentes regiões do espectro eletromagnético, os quatro retângulos negros sinalizam as faixas de operação do sensor indiano LISS-3, o qual foi utilizado neste estudo.
Fonte: Adaptado de Gao (1996).

A partir da interpretação do comportamento espectral nessas diferentes faixas é possível inferir sobre o estado fisiológico da folha ou do dossel, o que pode ser feito a partir da análise de uma única faixa espectral ou a partir da combinação dos dados de diferentes faixas com o objetivo de destacar uma característica específica do alvo, potencializando sua identificação frente aos demais objetos da cena (EPIPHANIO et al.1996).

2.7. Os índices de vegetação no monitoramento e na estimativa de biomassa

De acordo com Baret e Guyot (1991), formulações matemáticas que exploram as características do comportamento espectral da vegetação para melhorar a correlação

entre o parâmetro estudado e os dados radiométricos são chamadas de Índices de Vegetação (IVs), os quais têm sido estudados desde meados da década de 1960. Os IVs foram primeiramente explorados por Jordan (1969) que utilizou a combinação de dados de refletância do vermelho e infravermelho próximo para estimar biomassa aérea foliar de florestas tropicais. Tucker (1980) propôs a utilização da faixa do Infravermelho médio (IVM) entre 1,55 μ m e 1,75 μ m para a monitoramento do conteúdo de água na vegetação. De modo semelhante, Gao (1996) propôs a combinação de dados de duas bandas do Infravermelho próximo para estimar este mesmo parâmetro.

Dezenas de IVs têm sido propostos desde a década de 1960, cada qual explorando características específicas do comportamento da vegetação. Neste trabalho destacam-se o Normalized Difference Vegetation Index – NDVI e o Normalized Difference Moisture Index – NDMI.

Normalized Difference Vegetation Index – NDVI

O NDVI foi proposto originalmente por Rouse et al. (1974), é o mais popular IV utilizado no SR (CHENG, 2008; MATSUSHITA et al. 2007). Este IV explora as características espectrais da vegetação nas bandas do vermelho e IVP tendo estreita ligação com conteúdo de clorofila da folha, motivo que o faz ter boa relação com a atividade fotossintética da vegetação. A formulação do NDVI é apresentada na equação (3.3)

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VERM}}{\rho_{IVP} + \rho_{VERM}} \quad (3.3)$$

Em que:

ρ_{VERM} = refletância na faixa do vermelho

ρ_{IVP} = refletância na faixa do infravermelho próximo

Apesar de sua ampla aplicação em estudos florestais e agrícolas, o NDVI caracteriza-se por ser insensível ao aumento da biomassa quando o IAF passa da faixa de 3 ou 4 (GAO

1996; PONZONI et al. 2012). Esta característica está ligada à sua formulação que utiliza a faixa do vermelho, que tem reduzida capacidade de penetração no dossel.

Normalized Difference Moisture Index - NDMI

O NDMI apresenta como principal característica o fato de utilizar duas faixas do infravermelho em sua formulação. Estas faixas segundo PONZONI et al. (2012) tem maior capacidade de penetração no dossel do que o observado nas faixas do visível.

Devido ao fato de uma de suas faixas de operação estar centrada no IVM entre 1,55 e 1,75, faixa adequada para estudos relacionados à avaliação de estresse por deficiência hídrica, o NDMI também se caracteriza por ser sensível ao conteúdo de água da folha, (JENSEN, 2011). A formulação do NDMI é apresentada na Equação 3.4.

$$NDMI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVM}} \quad (3.4)$$

Em que:

ρ_{IVP} = refletância na faixa do infravermelho próximo

ρ_{IVM} = refletância na faixa do infravermelho médio

Os dois índices apresentam uma característica importante nos estudos da vegetação em áreas montanhosas, sua formulação os caracteriza como índices de vegetação por diferença normalizada de modo que estes IVs se caracterizam por minimizar efeitos causados pela variação topográfica. Segundo Füreder (2010) a razão de bandas é o método mais simples de se minimizar os efeitos do relevo. Como a formulação dos dois índices considera uma etapa de razão entre as bandas, os efeitos do relevo são reduzidos. Matsushita (2007) observou que em florestas localizadas em áreas montanhosas no Japão o NDVI foi menos sensível às variações do relevo do que índices que apresentavam fatores de correção atmosférica ou do solo em seu numerador ou denominador. Esta característica diminuiu a necessidade de correções topográficas nas imagens antes de sua utilização o que facilita o uso destes IVs junto a um maior número de usuários.

2.8. Fatores que interferem nas estimativas de IAF a partir de dados

Orbitais

Embora inúmeros estudos tenham evidenciado a eficiência do uso dos IVs em estudos agrícolas ou florestais, vários outros têm demonstrado que a capacidade do SR em estimar as características biofísicas da vegetação apresenta limitações.

Conforme destacam Colwell (1974) e Ponzoni et al. (2012), a refletância que chega até os sensores é influenciada por diversos fatores que agem em diferentes proporções em cada ponto da cena. Dentre estes fatores destacamos: a densidade foliar do dossel que é alterada sazonalmente como uma resposta fenológica da vegetação às mudanças climáticas sazonais e a geometria de aquisição dos dados, que é influenciada tanto pela mudança do ângulo zenital de iluminação quanto pelas diferentes condições de iluminação impostas pelo relevo.

2.9. Variação fenológica

Embora seja em si um dos parâmetros que comumente se deseja avaliar a partir de dados de sensores remotos, alterações biofísicas e estruturais que ocorrem no dossel pela mudança do estado fenológico podem alterar a precisão com que os IVs expressam a densidade foliar de florestas. Além da mudança no comportamento espectral das folhas, a alteração do estado fenológico também pode contribuir para perda de sua densidade no dossel, o que leva à maior exposição de outros elementos como galhos, troncos, sub-bosque e o substrato (solo ou liteira) que também contribuem na relação entre a refletância e o parâmetro biofísico desejado (HUETE, 1988).

Alguns estudos têm confirmado que essa relação se altera ao longo do ano e de forma particular em tipos específicos de florestas. É o caso do estudo desenvolvido por Wang et al. (2005) que utilizaram dados de três sensores orbitais (MODIS, AVHRR e VEGETATION) para monitorar a variação do IAF de florestas decíduas da França entre 1999 e 2001. Os pesquisadores consideraram ótima a correlação entre o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o IAF estimado em campo nos meses em que a vegetação estava senescente (R^2 maior que 0,8). Entretanto, não observaram

boa correlação nos períodos em que a floresta apresentava alto vigor vegetativo, resultado que foi atribuído à saturação característica do NDVI para florestas com altos valores de IAF.

Cantinho (2012) também avaliou a aderência de dados orbitais e de campo em duas diferentes estações climáticas em plantios de eucalipto no Estado do Espírito Santo. Neste caso o autor observou que correlações entre IVs gerados a partir de dados MODIS/TERRA tiveram melhor aderência aos referenciais de campo no período chuvoso do que aqueles obtidos no período seco.

Estes resultados demonstram que diferentes tipos de florestas podem ter respostas distintas a essas mudanças. Deste modo, embora a fenologia seja uma característica implícita do objeto estudado, conhecer suas influências sobre formações florestais permite que os dados obtidos a partir de sensores remotos sejam avaliados com maior cautela dadas as condições em que foram gerados. Mesmo numa floresta perene como a Mata Atlântica cuja variação do IAF pode ser considerada baixa ao longo do ano, é importante entender quais os efeitos da variação na densidade foliar sobre as relações esperadas entre estes e os diferentes IVs.

2.10. Anisotropia da vegetação

Outra característica importante quando do interesse de se relacionar dados radiométricos a parâmetros biofísicos da vegetação se refere à mudança do ângulo de iluminação solar e suas implicações na refletância de um dossel. A maior parte dos alvos terrestres, como as florestas, não apresenta características isotrópicas ou lambertianas, sendo então denominados de anisotrópicos (KRIEBEL, 1978). A anisotropia pode ser entendida como a característica de certos alvos em não refletir a radiação igualmente em todas as direções, de modo que, dependendo do ângulo de iluminação e de visada, pontos ainda que homogêneos na superfície em termos de constituição e natureza podem parecer mais claros ou escuros (JENSEN, 2011).

De acordo com Ponzoni et al. (2012), para o caso do uso de dados gerados por sensores orbitais ou aerotransportados, ao tratar de refletância de dosséis está-se na verdade

mensurando um Fator de Refletância Bidirecional (FRB), uma vez que estamos lidando com duas geometrias bem definidas, a de iluminação e a de visada. Desta forma os sensores são sensíveis à anisotropia porque a refletância detectada é apenas uma fração da refletância total do objeto e é dependente do ângulo que se forma entre a fonte-alvo-sensor (JENSEN, 2011).

Efeitos anisotrópicos relacionados ao ângulo de visada podem ser facilmente notados em imagens com larga faixa de imageamento (*swath*) como os dados do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) nos quais mesmo em alvos semelhantes é comum perceber áreas mais claras e outras mais escuras (QI et al. 1995).

Segundo Asner (1998) além da variação da geometria fonte-alvo-sensor, a anisotropia também é dependente das características biofísicas da vegetação, tendo em vista que estas características definem o ângulo preferencial de espalhamento da radiação para cada geometria de iluminação. As principais características biofísicas dos dosséis que influenciam a direção do espalhamento são: o IAF, a distribuição angular das folhas (DAF), arquitetura do dossel, densidade dos dosséis, a rugosidade e as características do substrato, (COLWELL, 1974; GOEL; STREBEL, 1983; MYNENI; ASRAR, 1993).

Vários estudos têm confirmado como a variação na geometria de iluminação e visada alteram a refletância espectral de dosséis. Breunig et al. (2011) observaram que mudanças no ângulo de iluminação e visada alteraram significativamente a refletância de culturas de soja, podendo induzir a estimativas imprecisas do IAF desta cultura a partir de modelos empíricos.

Efeitos causados pela mudança do AZI também foram analisados por Galvão et al. (2011) que ao avaliarem os efeitos da mudança do AZI na floresta amazônica observaram que índice de vegetação *Enhanced Vegetation Index* - EVI é fortemente relacionado à banda do IVP, e que o aumento nos valores de refletância desta banda no mês de outubro, devido à mudanças do AZI, influenciaram o IV apontando aumento do IAF.

2.11. O relevo e as alterações radiométricas provocadas pela topografia

O relevo tem grande influência nas condições de iluminação local, sobretudo, em condições de alto AZI. Vários pesquisadores alertam que a topografia modifica a geometria entre a fonte-alvo-sensor causando diferentes condições de iluminação nos diferentes alvos (SCHAAF et al. 1994; COMBAL; ISAKA, 2000). Estudo realizado por Combal e Isaka (2002) mostrou que existe dependência da Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB) de dosséis em relação à declividade e orientação do terreno. Srinivasulu; Kulkarni, (2004) e Valeriano, (2011) destacam que as variações nas formas do relevo implicam em diferentes ângulos de incidência da radiação sobre a superfície, alterando a relação energia/m² que atinge cada ponto do terreno, o que é chamado de efeito topográfico. Quanto menor o ângulo de iluminação, menor a quantidade de fótons que atinge a vertente, resultando em diferentes respostas radiométricas dos alvos (FALKENSTRÖM, 1999). A figura 2.5 ilustra como o relevo influencia na condição de iluminação dos alvos no terreno alterando seus valores de reflectância. Os parâmetros topográficos que determinam essa relação energia/m² são a orientação e declividade (VALERIANO, 2011).

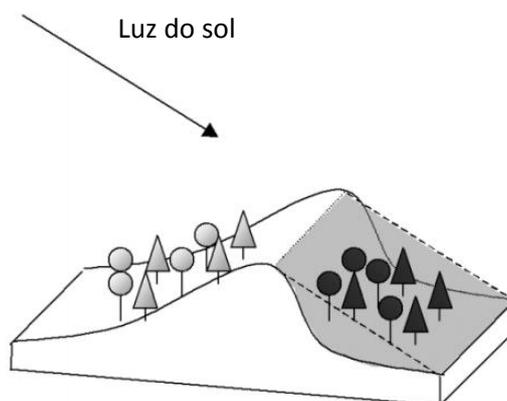


Figura 2.5 – Influência do relevo na condição de iluminação dos alvos.
Fonte: Rião et al. (2003).

Riano et al. (2003) destacam que apesar de grande quantidade de métodos de correção topográfica já terem sido propostos, não existe consenso quanto a um método que possa ser universalmente utilizado, de modo que a normalização topográfica ainda é um

recurso pouco adotado. O método de normalização topográfica mais simples baseia-se na premissa de que o efeito de sombreamento atinge todas as bandas de modo semelhante, e que o quociente de duas bandas normaliza aos efeitos do sombreamento local, minimizando as diferenças de iluminação causadas pelo relevo. Embora não seja o método mais indicado para a normalização topográfica, a razão de bandas tem a vantagem de dispensar o uso de modelos digitais de elevação (DEM) para seu cálculo, dependendo apenas dos dados já disponíveis nas imagens (FÜREDER 2010).

Exemplos de como a topografia pode alterar as correlações entre dados radiométricos orbitais e os parâmetros biofísicos da vegetação pode ser visto no trabalho de Canavesi (2008) que utilizou dados radiométricos do sensor Hyperion EO-1 para estimar volume de madeira em plantações de eucalipto. O autor constatou que com a estratificação das amostras em classes de iluminação, houve aumento da correlação entre o parâmetro estimado pelos dados radiométricos orbitais e o volume de madeira estimado em campo.

Importante destacar que a avaliação da reflectância da cobertura vegetal em diferentes condições de iluminação ou de visada (ângulo de observação do sensor) não deve somente levar em conta estes dois parâmetros que caracterizam a geometria de aquisição de dados. O posicionamento topográfico do dossel na paisagem assume relevância, uma vez que ele condiciona aquilo que podemos denominar de “iluminação local”. Assim, quando imaginamos que o aumento do ângulo zenital solar promove diminuição na reflectância de um dossel, isso não se verificará para todo e qualquer ponto no dossel, senão dependerá de seu posicionamento topográfico. Dessa forma, a variação da geometria de iluminação (e até a de observação), acarretará alteração nas condições de iluminação em cada ponto do terreno de forma particular e específica, cabendo a particularização na análise.

2.12. O sensor LISS-3/Resourcesat - 1(IRS-P6)

Os dados orbitais adotados neste estudo foram gerados pelo sensor *Linear Imaging Self-Scanner* (LISS-3) do satélite indiano de recursos terrestre RESOURCESAT-1 (IRS-P6). O LISS-3 é um sensor multi-espectral tipo *pushbroom*, operando em 4 bandas, duas delas operando na faixa do visível, uma no infravermelho próximo (IVP) e uma no infra

vermelho médio (IVM). O sistema de varredura de cada banda consiste em sensores *Charge-Couple-Device* (CCD) com arranjo linear de 6000 detectores cada CCD (NRSA, 2003). O satélite executa orbita polar helio-sincrona, a uma altitude de 817 km e horário de passagem no equador às 10:00 da manhã, em modo descendente. As principais características do Sensor LISS-3 estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2.1 - Principais características do sensor LISS-3.

IGFOV	23.5 m
Resolução radiométrica	7 bits – 10 bits (swir)
Bandas espectrais (μm)	B2 0.52 - 0.59
	B3 0.62 – 0.68
	B4 0.77 – 0.86
	B5 1.55 – 1.70
Faixa de imageamento (Swath)	141 Km
Resolução temporal	24 dias

Fonte: NRSA, (2003).

O registro dos dados em sistemas imageadores como o LISS-3 se fundamenta na fração captada da energia refletida pelos alvos que é representada em matrizes bidimensionais através de valores chamados de Número Digital (ND), cujo valor depende da resolução radiométrica (em bits) e dos parâmetros de calibração do sensor (SRINIVASULU; KULKARNI, 2004). Os ND não representam uma grandeza física e precisam ser convertidos para valores de radiância que representam a quantidade de energia em watts/m^2 que é refletida para o ângulo sólido projetado entre o alvo e o detector.

Para esta transformação deve ser fornecido o valor mínimo e máximo da radiância captados pelo detector de cada banda. Informação normalmente fornecida pelo fabricante do sensor.

Como a radiância quantifica a intensidade de energia refletida para determinada faixa espectral, essa grandeza é influenciada por muitas variáveis tais como constituintes atmosféricos, ângulo de elevação solar, horário da passagem do satélite, anisotropia da superfície e características do sensor (SRINIVASULU; KULKARNI, 2004). Além disso, não é possível comparar os dados entre bandas devido às diferenças na quantidade de energia emitida pelo Sol para cada faixa espectral.

Devido a estes motivos é recomendado trabalhar com valores de refletância, cuja conversão inclui processo de normalização dos dados de radiância (CHANDER; MARKHAM, 2003). A refletância é a razão da energia refletida pelo objeto pela energia nele incidente para cada comprimento de onda. O valor final será sempre entre 0 e 1, o que permite a comparação entre faixas espectrais, dados de diferentes datas e até de diferentes sensores.

Considerável parte da energia refletida pelos alvos é perturbada pela atmosfera antes de chegar ao sensor. Esta perturbação se deve basicamente a dois processos, absorção e espalhamento, causado por aerossóis e gases atmosféricos. Segundo Vermote et al. (2006) apenas 50% do sinal refletido chega a um sensor remoto na faixa espectral de $0,45\mu\text{m}$, aos $0,85\mu\text{m}$ o valor sobe para 85%. A correção destes efeitos tem sido feita por dois métodos distintos, a técnica do pixel escuro proposta por (Chavez, 1996) e por meio de modelos de transferência radiativa como o *Second Simulation of the Satellite signal in the solar spectrum* (6S), este modelo foi desenvolvido para a simulação do sinal que chega aos sensores remotos entre $0,25\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$ (VERMOTE et al. 2006). Devido ao melhor desempenho e por apresentarem procedimentos ligados ao comportamento físico dos processos de espalhamento e absorção da atmosfera vários pesquisadores recomendam o uso preferencial dos modelos de transferência radiativa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Pelo exposto anteriormente, a estimativa dos parâmetros biofísicos da vegetação a partir de dados de SR são influenciados por uma grande gama de fatores. Neste trabalho foi investigada a influência da condição de iluminação imposta pela topografia nas relações entre os IVs e valores de PAI em uma área com vegetação de porte florestal. Para tanto, foi selecionado um fragmento florestal localizado dentro do domínio do bioma Mata Atlântica, em desenvolvimento em terreno que apresenta relevo acidentado, e que apresentava dimensões compatíveis com a observação orbital. Sobre esse fragmento e seu entorno serão apresentados detalhes mais adiante.

Foi estimado o índice de área de planta (PAI) das comunidades arbóreas desse fragmento florestal como fonte de dados para análise de possível alteração da densidade foliar no fragmento ao longo do período de estudo. As variações angulares da geometria de iluminação, aliadas ao posicionamento topográfico diferenciado foram igualmente exploradas para avaliar seus efeitos sobre as relações entre dados radiométricos e PAI. Para tanto, foram então definidas três datas de coletas de dados procurando explorar as variações de iluminação sobre o fragmento.

3.1. Área de Estudo

O Parque Natural Municipal Augusto Ruschi tem área de aproximadamente 245 hectares e localiza-se na porção norte do município de São José dos Campos – SP a aproximadamente 15 quilômetros do centro da cidade. O parque está embasado sobre o complexo rochoso da Serra da Mantiqueira, na faixa de transição do planalto para o Vale do Paraíba. O relevo da região apresenta formas mamelonares do domínio mares de morros, a amplitude altimétrica do parque varia dos 600m até 900m do nível do mar. O solo mais comumente observado é o Latossolo Vermelho Amarelo pouco profundo, entretanto, devido à variação topográfica, outros tipos de solo são encontrados, entre eles o Cambissolo Latossólico, e no sopé das elevações predominam neossolos aluviais (SILVA, 1989). O clima regional é na classificação de Köppen do tipo Continental Atlântico Cwa, com duas estações climáticas bem definidas, sendo verão e inverno. As principais chuvas começam no mês de novembro e se prolongam até o mês de março

apresentando média de precipitação anual em torno de 1252mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso com média acima de 250mm, os meses mais secos se estendem de junho a agosto, com médias mensais inferiores a 50mm. A temperatura média acompanha a tendência do regime pluviométrico registrando mínimas no mês de junho e máxima em fevereiro com médias de 23,3° e 30,7°C respectivamente. O Parque é constituído de um fragmento florestal secundário decorrente de regeneração natural de antigas áreas destinadas a cultura do café, não havendo registros de exploração madeireira nos últimos 80 anos (SILVA, 1989). A Figura 3.1 apresenta a área de estudo localizada na porção norte do município de São José dos Campos.

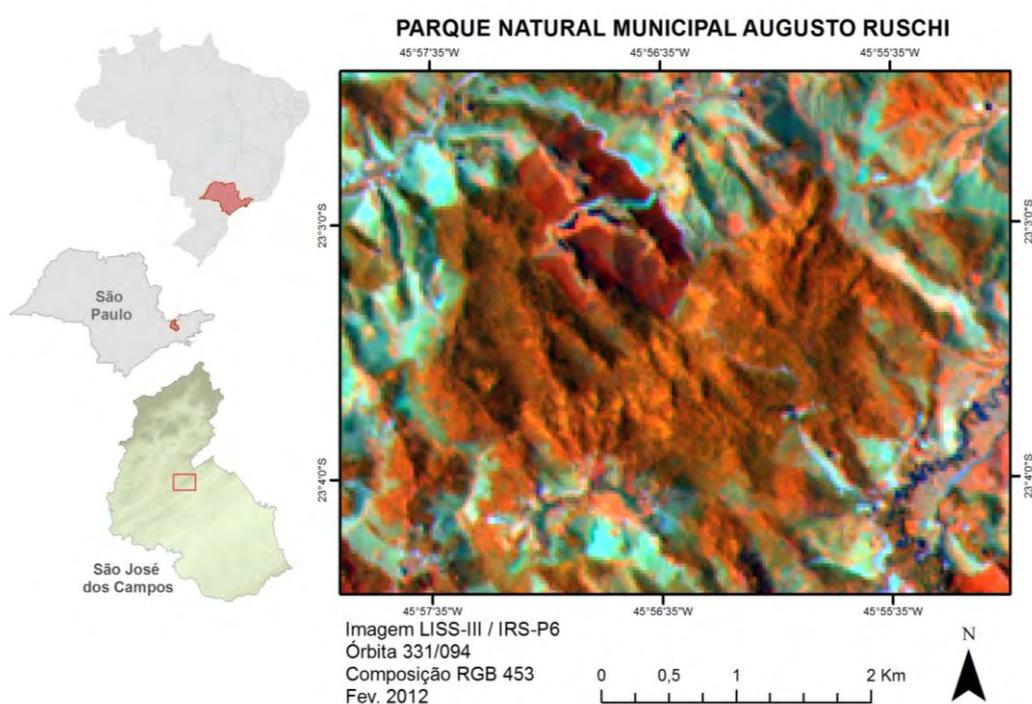


Figura 3.1 -Imagem Liss-3 do Parque Natural Municipal Augusto Ruschi e sua localização no município de São José dos Campos.

A cobertura florestal típica do fragmento é a sub-formação Floresta Ombrófila Densa Submontana. De acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira publicado pelo IBGE, se caracteriza por ser uma floresta densa e perene, apresentando precipitação alta e bem distribuída durante o ano com curtos períodos de seca, uma vez que a ausência de chuvas dificilmente ultrapassa os 60 dias. Esta boa distribuição das chuvas combinada a

temperaturas relativamente altas propiciam um ambiente úmido que contribui para a manutenção da maior parte da biomassa foliar ao longo do ano (IBGE 2012).

Embora seja considerada uma floresta de baixa variação sazonal, estudos avaliando a dinâmica fenológica das diferentes sub-classes do bioma têm mostrado que diferenças nos padrões fenológicos da floresta estão relacionados às características ambientais de cada sítio analisado. Estudos como o de Lemos Filho e Mendonça Filho (2000) e Pereira, (2008) têm demonstrado que a variação do IAF na floresta é muito dependente da proporção de espécies perenes, semi-decíduas e decíduas existentes.

Estes mesmos estudos apontam que a floresta efetivamente perene ocorre com maior frequência nas faixas litorâneas onde os períodos de seca são menos rigorosos e a presença de espécies perenes são dominantes chegando a até 87% da composição da floresta (MORELLATO et al. 2000). À medida que se desloca para o interior, a floresta passa a ter maior número de espécies decíduas e semi-decíduas além de uma estação seca que, embora curta, exerce alguma influência no ciclo fenológico da vegetação (OLIVEIRA FILHO E FONTES, 2000). De modo geral, alguns pesquisadores têm observado que a queda das folhas é fortemente relacionada à ocorrência de estresse hídrico (MORELLATO; 1995), outros estudos, como o de Lemos Filho e Mendonça Filho (2000) observaram que a queda foliar nas florestas interioranas como em Caratinga - MG foi mais relacionada à diminuição da umidade do ar do que à deficiência hídrica no solo. Outros condicionantes como fotoperíodo e radiação (PEREIRA, 2008) também têm sido avaliadas como potenciais controladores do ciclo fenológico da vegetação de Mata Atlântica. Borchert (1994) observou que mudanças foliares têm menor dependência da sazonalidade climática à medida que árvores se desenvolvem em microambientes com maior disponibilidade de água no solo o que as protege do estresse hídrico sazonal.

No ano de 2012 o período chuvoso se estendeu até meados do mês de julho, apresentando média pluviométrica acima da historicamente observada. O mês de junho, cuja média histórica de chuvas é de cerca de 40 mm, registrou o índice de 121 mm em 2012, de modo que a estação de seca começou efetivamente nos meses de agosto e

setembro nos quais a precipitação acumulada foi de apenas 10 e 13 milímetros respectivamente (Figura 3.2). As temperaturas também se mantiveram acima do padrão histórico chegando à média de 30,5 C° em julho, período que também foi observada a maior amplitude térmica. Já nos meses de agosto e setembro as temperaturas médias caíram respectivamente para 17C° e 19C°, acompanhados pela queda na precipitação.

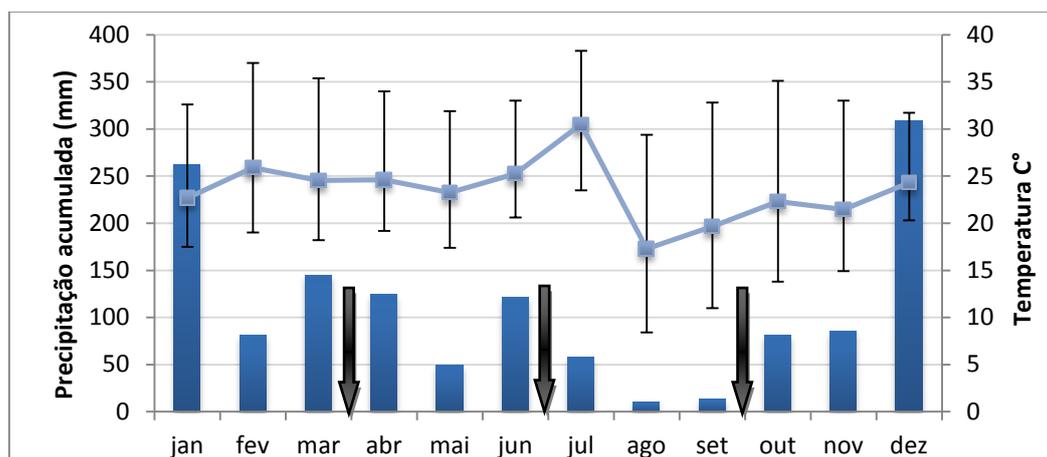


Figura 3.2 -Precipitação acumulada mensal (mm) e temperaturas média, mínima e máxima para a região de estudo no ano de 2012. As setas apontam o período aproximado da execução dos trabalhos de campo.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet, Estação Taubaté (2012).

3.2. Definição das datas para execução dos trabalhos de campo

Com o objetivo de explorar diferenças sazonais e de iluminação que maximizassem as oportunidades de variação de PAI e mudanças na condição de iluminação local, foram executados três trabalhos de campo nos meses de março, julho e outubro. As datas de realização foram definidas de forma a explorar condições de iluminação distintas para os mesmos alvos.

A primeira etapa em fevereiro foi realizada no fim da estação chuvosa, entre os dias 25 de março e 03 de abril e a imagem do sensor LISS-3 referente a esta etapa foi gerada em fevereiro e apresentava ângulo de elevação de 58 graus. A segunda etapa foi realizada entre os dias 26 de junho e 03 de julho e caracterizava-se como o período mediano da estação seca, a imagem do sensor LISS-3 referente a esta etapa foi gerada no dia 01 de julho, seis dias após o solstício de inverno, apresentando ângulo de elevação solar de apenas 35,5 graus. A terceira e última etapa foi realizada entre os dias 24 de setembro a

02 de outubro a qual climaticamente se caracteriza como o fim da estação seca. A imagem do sensor LISS-3 referente a esta etapa foi tomada três dias após o fim dos trabalhos de campo, ou seja, no dia 05 de outubro. As principais características da coleta dos dados são apresentadas resumidamente na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Características gerais dos dados referentes às etapas de aquisição de dados.

Data Aquisição imagem	Período de trabalho de campo	Característica climática	Ângulo de Elevação	Ângulo Azimutal
08/02/2012	25/03 a 07/04	fim estação chuvosa	58,08	81,53
01/07/2012	26/06 a 03/07	meio da estação seca	35,51	34,39
05/10/2012	24/09 a 02/10	fim da estação seca	59,86	57,19

3.3. Localização das parcelas e definição das classes de iluminação

Foram estabelecidas arbitrariamente dentro do Parque 30 parcelas de 10x20 metros para caracterização estrutural da vegetação, procurando ainda distribuí-las em diferentes faixas do relevo. O posicionamento central de cada parcela foi georreferenciado mediante o emprego de um GPS de navegação (modelo Garmin etrex Vista HCx).

A partir de um mapa topográfico em escala de 1:25000 fornecido pela prefeitura municipal de São José dos Campos foi gerado um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 20 metros. Sobre este MDE foi calculado o fator cosseno para cada um dos pontos nas datas e horário de passagem do satélite Resourcesat sobre a área de estudo. A Partir da amplitude máxima dos valores do fator cosseno (observado no mês de julho) foram estabelecidos intervalos arbitrários que passaram a representar classes de iluminação definidas como: Pouco Iluminada (fator cosseno inferior a 0,4), Iluminado (áreas com fator cosseno entre 0,4 e 0,6) e Muito Iluminado (áreas com fator cosseno superior a 0,6). A Figura 3.3 apresenta a localização das parcelas na área de estudo sobre um mapa de iluminação calculado para a data e hora de passagem do satélite. Nota-se que somente a imagem do mês de julho apresentou amostras com três classes de iluminação.

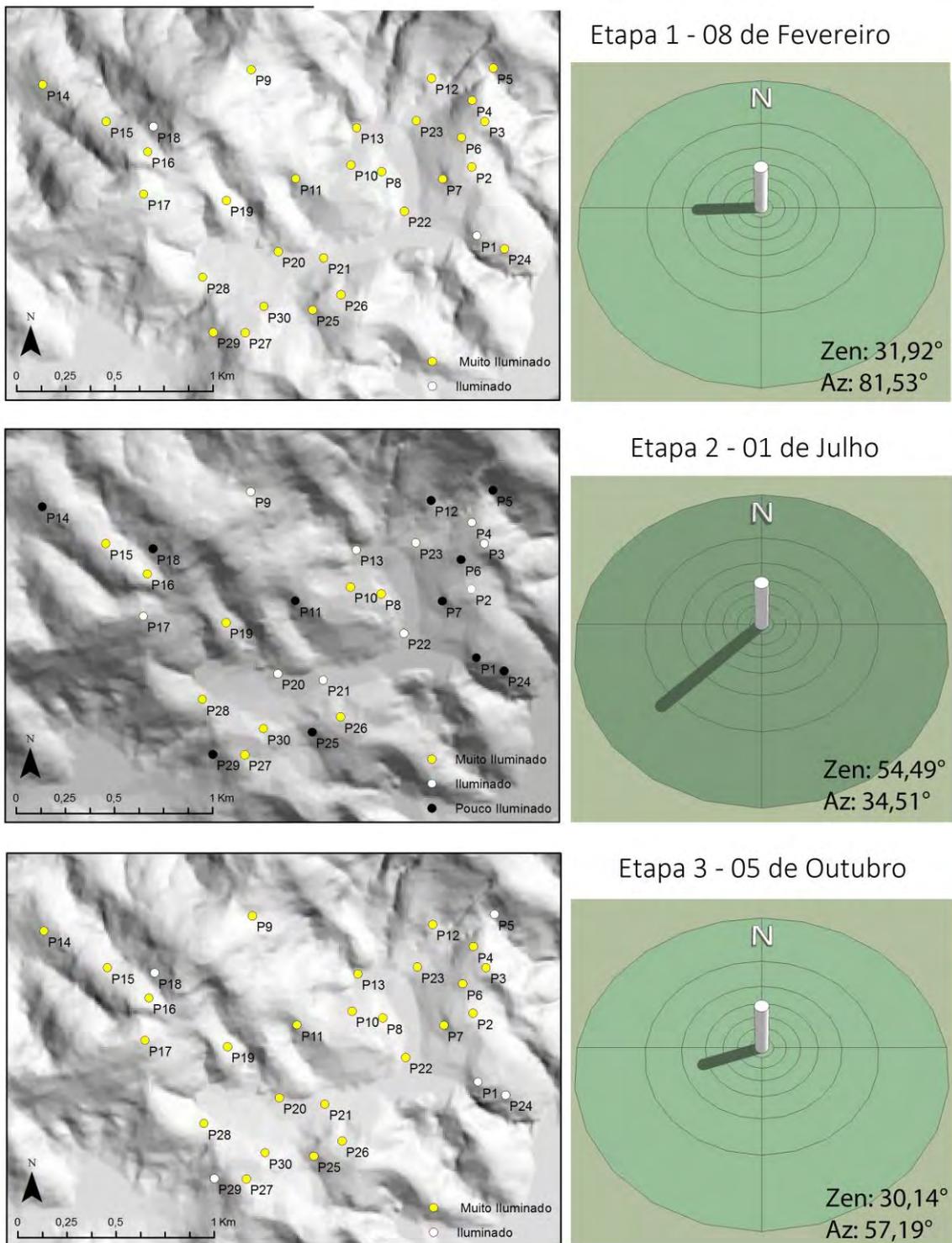


Figura 3.3 - Posicionamento das parcelas sobre mapas de iluminação calculados para a data e hora de passagem do satélite (esquerda). Esquema da projeção da sombra para as respectivas datas (direita).

3.4. Coleta de dados biométricos em campo

Para a caracterização estrutural da vegetação em cada parcela foram tomadas medidas dendrométricas como Diâmetro à Altura do Peito (DAP), Altura Total dos indivíduos (H), Altura da Primeira Bifurcação (APB), Projeção Horizontal da Copa (PHC), Qualidade do Fuste (QF) e Posição Sociológica (PS). Neste levantamento foram considerados somente indivíduos arbóreos vivos que apresentassem DAP superior a cinco centímetros. Tendo em vista que a pesquisa fora conduzida em tempo relativamente curto (oito meses) estes parâmetros foram considerados como invariáveis e, portanto, foram coletados apenas na primeira etapa de campo. A tabela utilizada em campo para o registro destes parâmetros encontra-se no Apêndice C.

A partir destes dados foram elaborados manualmente perfis transversais dos dosséis em cada parcela a partir dos quais foi possível visualizar, ao menos esquematicamente, a altura, a posição sociológica, o formato e a estrutura das copas, além da distribuição espacial dos indivíduos na parcela. O objetivo dos perfis foi o de auxiliar a interpretação dos resultados permitindo observar características como a rugosidade densidade e altura do dossel.

Além dos dados dendrométricos, foram geradas estimativas do PAI pelo emprego de FH, procedimento que foi executado nas três etapas de campo.

3.5. Obtenção e pré-processamento dados radiométricos orbitais

Os dados do sensor LISS-3 foram obtidos junto ao banco de dados do INPE, disponível em seu catálogo de imagens na internet. As imagens foram referentes a órbita 331/94. Foram utilizadas as imagens ausentes de nuvens geradas na semana mais próxima da realização dos trabalhos de campo. Os dados foram georreferenciados no *datum* WGS-84 utilizando como base cartográfica imagens Geocover, cuja resolução espacial é de 14,5 metros. Visando garantir maior fidelidade radiométrica aos dados, o interpolador utilizado foi o vizinho mais próximo, conforme recomendado por Schowengerdt (2007).

As imagens originalmente disponibilizadas em números digitais (DN) foram transformadas em valores de radiância e posteriormente em refletância no topo da atmosfera (TOA) através das Equações 3.1 e 3.2 apresentadas por Markham e Barker (1987). Os parâmetros adotados nas transformações podem ser observados nas Tabelas 3.2 e 3.3. As operações desta fase foram executadas no aplicativo Envi 4.5.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{DN_{max}} \right) DN_{max} + LMIN_{\lambda} \quad (3.1)$$

Em que:

- L_{λ} = radiância no sensor (expresso em mW/m²/Sr/μm)
 $LMAX_{\lambda}$ = máxima radiância registrada pelo sensor (expresso em mW/m²/Sr/μm)
 $LMIN_{\lambda}$ = mínima radiância registrada pelo sensor (expresso em mW/m²/Sr/μm)
 DN_{max} = máximo número digital (quantização em bits da imagem)

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (3.2)$$

Em que:

- ρ_{λ} = reflectância de sensor (%)
 L_{λ} = radiância de sensor (mW/m²/sr/μm)
 d = distância terra Sol para o dia do ano (unidades astronômicas)
 θ_s = ângulo solar de elevação (graus decimais)
 $ESUN_{\lambda}$ = média da irradiância solar na faixa de operação do sensor (mW/m²/μm)

Tabela 3.2 - Parâmetros das bandas do sensor LISS-3.

LISS-3				
Banda	QMin (mw/m ² /str)	Qmax (mw/m ² /str)	Qmax	ESUN W/m ²
B2	0	120,64	255	1846,77
B3	0	151,31	255	1575,5
B4	0	157,57	255	1087,34
B5	0	34,06	255	236,651

Fonte: Resourcesat metadata LISS-3 (2012)

Tabela 3.3 - Parâmetros de aquisição das imagens LISS-3 nas respectivas datas.

Data Aquisição	Hora GMT	DOY	Distância Terra/Sol	Elevação	Cosseno Ângulo Zenital	Azimute
08/02/2012	13:07	39	0,98662	58,08	0,8488	81,53
01/07/2012	13:08	182	1,01667	35,51	0,5809	34,39
05/10/2012	13:12	279	0,99976	59,86	0,8648	57,19

Fonte: Adaptada de NOAA Solar Calculator (2012); Chander et al. (2009); Resourcesat metadata LISS-3 (2012).

No processo de correção atmosférica utilizou-se o modelo de transferência radiativa SecondSimulationof a SatelliteSignal in the Solar Spectrum (6S), implementado no aplicativo GRASS e acessível pelo aplicativo QuantunGis - Lisboa. Como parâmetros para a correção utilizou-se o modelo continental de atmosfera com parâmetro de visibilidade igual a 50 quilômetros para as imagens de fevereiro e julho, e 35 quilômetros para a imagem de outubro, a altitude média adotada para a área de estudo foi de 600 metros. O dado de reflectância de superfície para cada parcela foi calculado pela média aritmética dos cinco pixels mais próximos do centro de cada sítio amostral, os dados de cada banda foram transcritos para uma planilha eletrônica sobre a qual se calcularam os índices de vegetação NDVI e NDMI a partir das Equações 3.3 e Equação 3.4. o calculo foi executado para cada parcela e para cada etapa do estudo.

3.6. Análise dos dados

Ao fim das etapas de coleta e de processamento de dados encontrava-se disponível o seguinte conjunto de dados: (1) dados dendrométricos (coletados apenas na primeira etapa de campo), (2) o PAI obtido através das fotografias hemisféricas, (3) os valores de fator cosseno para cada parcela, (4) os valores de reflectância de superfície de cada parcela e os (5) IVs referentes às três etapas.

3.6.1 - Influência do ângulo zenital de iluminação nas correlações entre PAI e IVs.

Para avaliar a relação entre os IVs e o PAI estabeleceu-se uma análise linear de regressão simples entre as 30 amostras de PAI e índices de vegetação (NDVI e NDMI) para cada uma das três etapas da pesquisa.

Com o objetivo de avaliar a influência que a mudança do ângulo de iluminação tem sobre estas relações analisou-se a regressão referente ao mês de julho, período de menor elevação do ângulo zenital de iluminação. O resultado dessa regressão foi então comparado aos resultados das etapas de fevereiro e outubro. Ainda com o objetivo de complementar esta análise estabeleceu-se, para os mesmos períodos, correlações entre o Fator Cosseno calculado para a data e hora de passagem do satélite e os IVs utilizados no estudo.

3.6.2 - Influência do relevo na iluminação das amostras

Uma vez estabelecidas as correlações para todo o conjunto de dados uma segunda análise foi feita visando determinar se as diferentes condições de iluminação dos dosséis, decorrente da inclinação e orientação do relevo, influenciam a relação entre o dado de campo e o dado orbital. Para esta análise os dados foram estratificados de acordo com sua condição de iluminação local em três grupos: Pouco Iluminado, Iluminados e Muito iluminado. Para a divisão em classes foram utilizados os dados do mês de julho, tal como apresentado no item 3.3. Para cada classe de iluminação foi estabelecida a regressão entre os dados de campo e os dados orbitais considerando-se as três etapas do estudo.

3.6.3 - Influência das características estruturais na relação PAI x IVs

Uma terceira análise teve o objetivo de averiguar de que modo as características estruturais do dossel interferem nestas mesmas relações. Os dados foram divididos em grupos definidos a partir de características estruturais do dossel como rugosidade do

dossel, altura média das árvores e Diâmetro à Altura do Peito. Os parâmetros estruturais definidos para esta divisão em classes foram estabelecidos da seguinte forma:

Rugosidade do dossel (RD), calculada a partir do desvio padrão da altura das árvores de cada parcela, sendo que quanto maior o desvio padrão, mais rugoso foi considerado o dossel. Foram determinadas três classes:

- RDmenor - para parcelas com desvio padrão menor que 3;
- RDintermediário - parcelas com desvio padrão entre 3 e 4;
- RDmaior - parcelas com desvio padrão maior que 4.

Altura das árvores (H), classes definidas a partir da altura média das árvores da parcela:

- Hmenor - parcelas cuja altura média das árvores foi menor que 7 metros;
- Hmaior - para as parcelas cuja altura média das árvores foi maior que 7 metros.

Diâmetro à altura do peito (DAP), definidas a partir do diâmetro do tronco:

- DAP menor, parcelas com DAP menor que 12 cm.
- DAP maior - amostras com diâmetro à altura do peito superior a 12cm.

A partir dessas classes estabeleceu-se novamente a relação entre o PAI e os IVs para os dados das referidas classes em cada uma das etapas do estudo.

3.7. Análises estatísticas

A análise de correlação entre os IVs e o PAI estimado em campo foi feita a partir da aplicação de um teste de significância através de um modelo linear de regressão simples (MRLS).

O modelo linear de regressão simples estuda o relacionamento entre duas variáveis sendo uma variável dependente e outra independente. O relacionamento entre elas é representado por um modelo matemático que associa a variável dependente à variável independente a partir de uma equação linear. O método requer que existam dados pareados X e Y a partir dos quais se constrói uma “nuvem de pontos” chamada

diagrama de dispersão. Através da análise do diagrama combinado a testes estatísticos, é possível verificar se existe ou não relacionamento entre as variáveis. O relacionamento é considerado forte ou fraco pela análise da proximidade pontos a uma reta imaginária e inclinada que deve se aderir à nuvem de pontos. Quanto menor for o desvio dos pontos em relação a esta reta, maior será a relação linear entre as duas variáveis. A equação ou modelo de regressão linear simples é apresentado na Equação 3.3.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_i + E \quad (3.3)$$

Em que: Y é a variável dependente cuja alteração deve ser explicada através do comportamento da variável X . Os valores de β_0 e β_1 são os coeficientes da regressão, β_0 representa o ponto de interceptação da reta nos eixos X e Y . O valor de β_1 representa a inclinação da reta, ou seja, estima a mudança esperada na variável dependente Y em função da mudança de X . Seu sinal indica se a correlação é positiva (reta crescente) ou inversa (reta decrescente). Destaca-se que, normalmente, a variação de Y não é totalmente explicada pela variação de X , a esta diferença chamamos de erro ou resíduo (E). O resíduo é dado pela distância ou diferença entre as estimativas de \hat{Y} obtida pela projeção de X sobre a reta e seu valor correspondente no eixo Y ($E = Y - \hat{Y}$).

A análise da regressão foi feita a partir da ANOVA que avalia a variação dos valores observados em Y (IVs) em torno de sua média \bar{Y} e que são explicadas pela reta \hat{Y} obtida por meio da regressão. Em seguida foi feito o teste de significância da regressão através do teste F de Fischer Snedecor. O teste F avalia se há relação linear entre a variável Y e a variável X . O valor F calculado foi então comparado ao valor F tabelado com nível de significância de 5%.

Nesta análise consideramos como variável independente (X) o PAI (gerado a partir das fotografias hemisféricas obtidas em campo), como variável dependente (Y) foram utilizados os índices de vegetação (NDVI e NDMI) calculados a partir dos dados radiométricos do LISS-3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização estrutural dos dosséis

Conforme descrito anteriormente, foram amostradas 30 parcelas de 20x10m distribuídas arbitrariamente dentro do Parque, totalizando 607 árvores medidas, valor que equivale a uma densidade média de 1011 indivíduos por hectare. O número médio de indivíduos observados por parcela foi igual a 20, variando entre 10 e 32 indivíduos.

A partir dos dados dendrométricos coletados em campo, foram elaborados perfis transversais como os apresentados na Figura 4.1. A análise destes perfis permitiu observar que a floresta estava em sua maior parte dividida entre dois e três estratos arbóreos com aproximadamente 66% das árvores situadas entre 2 e 7 metros de altura, 24% situadas entre 7 e 12 metros e aproximadamente 10% com alturas superiores a 12 metros, atingindo o máximo de 18 a 20 metros. Os dados referentes à rugosidade do dossel mostraram que a maior parte da floresta apresentava superfície rugosa, e intermediária sendo que das 30 parcelas, 11 apresentaram dossel rugoso, 11 com rugosidade intermediária, e oito apresentaram o topo de dossel relativamente liso. A Figura 4.1 apresenta perfis representativos dos dosséis das três categorias de rugosidade observados.

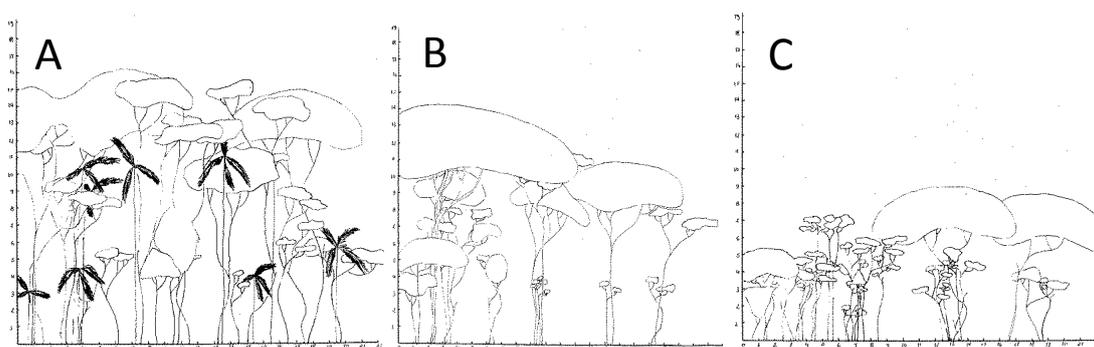


Figura 4.1 - Perfis representativos dos dosséis Rugoso(A), Intermediário(B) e Liso(C).

Além das árvores amostradas, observou-se que o sub-bosque apresentava grande quantidade de indivíduos com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) inferior a 5cm que então não foram amostrados. Observaram-se ainda muitos arbustos em todas as parcelas

e embora não tenham sido coletados dados relacionados a estes sub-bosques, os mesmos podem ser considerados densos ou de média densidade.

A Tabela 4.1 apresenta as características gerais como número de indivíduos, altura média e DAP de cada parcela estudada.

Tabela 4.1- Características estruturais do dossel em cada parcela amostrada

Identificador da parcela	Número de árvores	Altura			DAP		
		média	Desv. Pad.	H máxima	média	DesvPad	Dap Max
1	19	7,23	4,4	18	40,36	31,64	120
2	17	6,81	2,14	10	34,59	12,56	60
3	21	6,42	4,28	17	41,47	30,13	109
4	24	6,48	3,65	16	35,58	21,11	86
5	29	6,02	3,36	16	43,79	21,69	97
6	25	6,94	3,79	18	42,2	27,77	116
7	17	8,55	4,46	16	52,18	26,6	108
8	16	8,33	5,68	15	43,06	19,05	72
9	23	8,45	4,81	18	47,13	27,39	108
10	10	9,74	4,95	18	65,4	31,53	120
11	11	7,1	4,94	17	40,63	25,78	88
12	23	5,93	3,73	15	33,65	24,96	111
13	27	8,7	4,16	19	50,37	26,66	114
14	20	6,46	3,83	15	24	16,91	91
15	12	9,31	3,95	16	36,91	16,77	66
16	14	8,9	4,98	16	38,14	25,76	97
17	15	5,95	2,74	10	33,25	22,51	85
18	10	4,81	3,28	14	26,4	13,76	61
19	33	6,88	4,36	18	35,62	23,1	114
20	10	7,65	3,96	15	49,4	19,15	101
21	25	7,88	3,69	18	45,32	38,7	180
22	18	6,19	3,32	12	40	41,77	190
23	27	8,55	3,91	15	47,96	36,04	190
24	19	6,23	2,7	12	36,73	30,86	110
25	18	7,27	2,94	12	41,95	24,69	86
26	18	7,28	3,15	14	47,111	30,81	114
27	26	5,63	1,47	8,5	33,4	15,71	72
28	27	5,73	2,38	12	33,7	24,6	110
29	28	5,16	1,39	8	31,62	13,4	70
30	28	5,61	2,98	15	34,18	24,4	95

4.2. Tomada de fotografias hemisféricas

Antes de serem apresentados os resultados referentes às estimativas de PAI mediante o emprego das FHS, é relevante apresentar alguns comentários considerados importantes na realização de trabalhos futuros envolvendo aplicação fotografias hemisféricas para a estimativa de PAI.

Uma potencial fonte de erro foi observada no momento das tomadas das fotografias e se referiu ao processo de focalização das imagens que, quando feito de modo inadequado,

pode resultar em erros relevantes. Durante o trabalho observou-se que o processamento de fotografias desfocadas tende a aumentar consideravelmente os valores de PAI. A Figura 4.2 mostra o resultado do processamento de duas fotografias da mesma área, uma adequadamente focada e outra desfocada. Após o processo de fatiamento observou-se que a imagem desfocada resultava numa imagem binária com menor número de frações abertas (fração céu) que a imagem binária processada a partir da fotografia nítida. O menor número de frações abertas induz a estimativas incorretas no processamento das imagens como se pode observar na Figura 4.2.

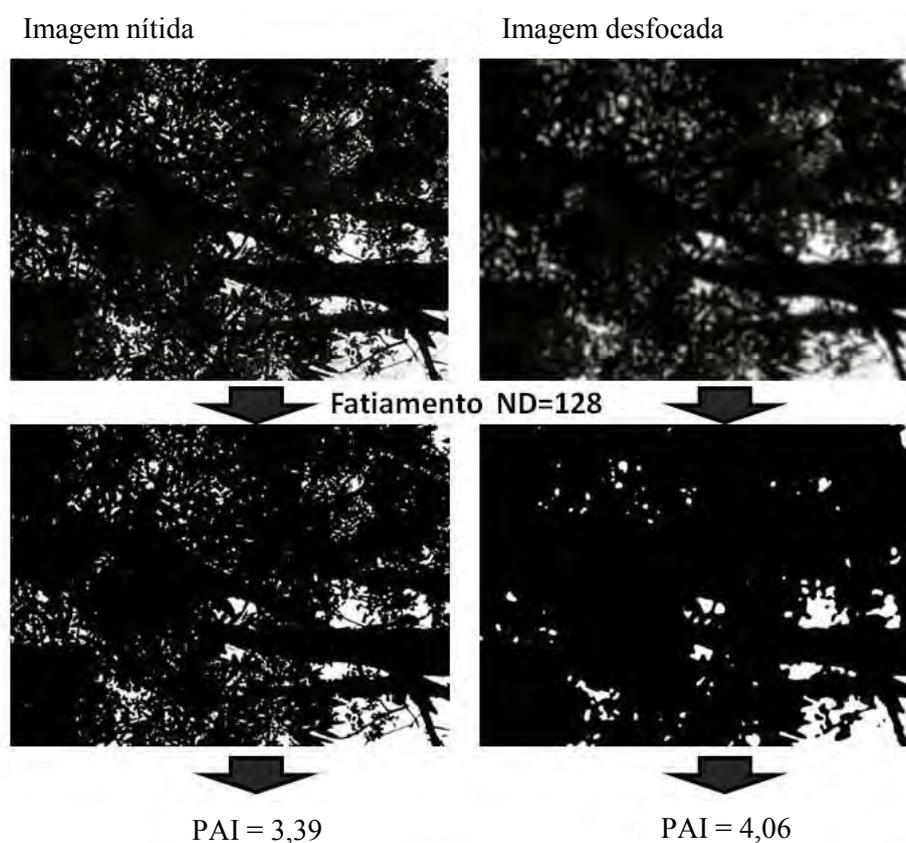


Figura 4.2 - Diferença nos valores de PAI estimado em fotografia corretamente focada e desfocada

O efeito é causado pela contaminação dos pixels puros (céu ou vegetação a depender das características do dossel) pelos pixels vizinhos alterando seu valor digital. Em dosséis densos o pixel puro relativo ao céu (pixel claro) ocorre em pequenos e múltiplos pontos na fotografia, nas imagens desfocadas o pixel puro recebe contribuição dos pixels vizinhos contaminando-o. O pixel contaminado tem seu valor digital reduzido

fazendo-o, muitas vezes, desaparecer no processo de fatiamento da imagem. A figura 4.3 apresenta o perfil de duas imagens em que é possível observar a linha de fatiamento fixada num ND = 128. Na imagem nítida o valor digital dos pixels do perfil traçado ultrapassa em diversas oportunidades o limiar de corte estabelecido, evidenciando a fração não vegetação. No perfil da imagem desfocada nota-se menor frequência de pixels com valor superior a 128 omitindo as lacunas existentes no dossel.

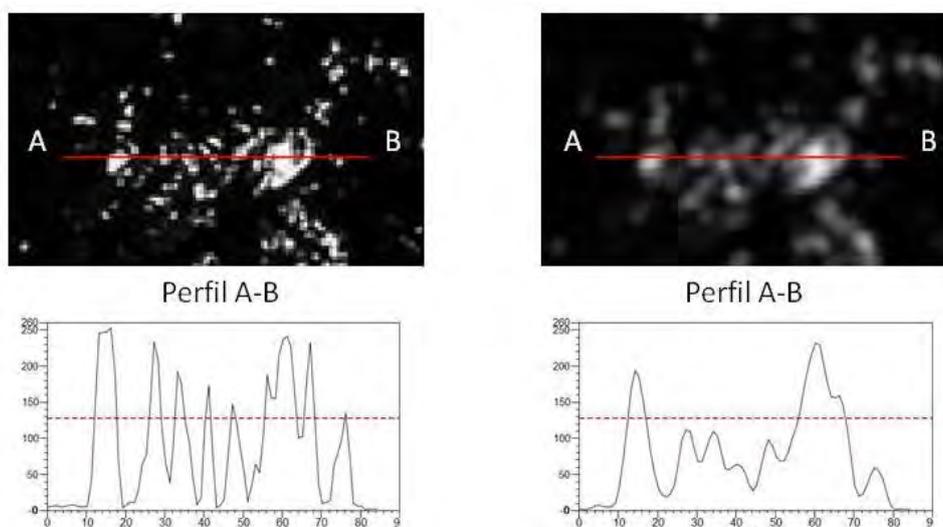


Figura 4.3 - Perfil A-B de imagem focada e desfocada a linha pontilhada mostra o limiar de fatiamento em 128 NDs. Através do perfil é possível observar que imagens desfocadas o valor do pixel atinge com menor frequência o limiar de fatiamento em 128.

Normalmente a utilização do foco no modo automático é suficiente para o registro de fotografias com boa nitidez, mas a presença de galhos, folhas ou troncos próximos à objetiva podem impedir que o equipamento obtenha o ajuste de foco adequado sendo recomendado que galhos e folhas a menos de 1,5 metros da objetiva sejam removidos antes da tomada da imagem. Fotografias desfocadas também são comuns em dosséis com diferentes estratos arbóreos nos quais o equipamento tende focar o dossel em suas camadas inferiores. Nestas condições recomenda-se utilizar o foco manual ajustando o equipamento para focar as camadas superiores do dossel.

A baixa quantidade de luz também pode dificultar a tomada de fotografias nítidas, nestes casos o aumento da sensibilidade do sensor (ISO) pode ser suficiente para que o equipamento obtenha o ajuste adequado. Alternativamente pode-se optar pelo aumento do tempo de exposição, embora esta solução tenha como inconveniente o registro do balanço das folhas, fenômeno que pode diminuir a nitidez das fotografias quando tomadas a em baixas velocidades, por isso é recomendável que as fotografias sejam tomadas sempre que possível com velocidade acima 1/50s e nunca com velocidades inferiores a 1/30s.

Apesar de todos estes cuidados ainda é possível que as fotografias sejam tomadas com algum tipo de erro além do foco, como exposição e orientação inadequados. Por isso recomenda-se, sempre que possível, que as fotos sejam rapidamente analisadas *in loco* por meio do visor do aparelho, evitando assim que se corra o risco de tomada de fotos com exposição e foco inadequados e retornos desnecessários ao campo.

4.3. Estimativas de PAI a partir de fotografias hemisféricas

A partir das FHs foi observada tendência de queda do PAI conforme se avançava da estação chuvosa para a estação seca. A Figura 4.4 mostra a variação do conjunto de dados coletados nas três datas.

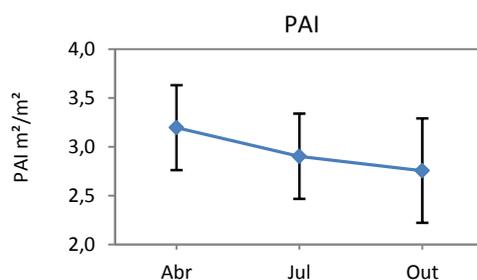


Figura 4.4 - Valor médio e desvio padrão do PAI estimado a partir das FH nas três etapas de campo.

Os dados apontam queda mais acentuada do PAI entre os meses março e julho do que aquele registrado entre julho e outubro embora a precipitação acumulada nos 90 dias anteriores a outubro tenha sido quase três vezes menor que as chuvas observadas entre março e julho.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de PAI obtidos em campo para cada ponto. A maior parte das amostras apontou redução do índice ao longo das três etapas de estudo, outras amostras apontaram a estabilização e em alguns pontos observa-se aumento do PAI, como nos pontos p8 e p20.

Tabela 4.2 -Valores dePAI para cada parcela ao longo das três etapas.

Ponto	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Ponto	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Ponto	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	3,48	3,18	2,96	P11	2,87	2,70	2,57	P21	3,08	2,98	3,05
P2	3,62	3,13	2,90	P12	3,82	3,48	3,39	P22	3,62	3,17	3,18
P3	2,69	2,37	2,06	P13	3,49	3,20	3,22	P23	3,56	3,22	3,11
P4	2,89	2,54	2,44	P14	3,12	3,06	2,78	P24	3,36	3,30	3,24
P5	3,56	3,38	2,93	P15	2,80	2,94	2,30	P25	3,21	3,03	2,67
P6	3,31	2,94	2,84	P16	3,43	3,06	2,77	P26	2,99	2,71	2,30
P7	3,35	3,06	3,03	P17	3,17	2,85	2,41	P27	1,97	1,65	1,24
P8	3,29	2,88	3,24	P18	3,50	2,90	2,65	P28	3,70	3,49	3,51
P9	3,39	3,27	3,35	P19	3,48	3,02	3,11	P29	2,10	1,73	1,52
P10	2,62	2,40	2,38	P20	3,19	2,87	3,21	P30	3,24	2,56	2,26

Esta flutuação nos valores de PAI era esperada em algumas amostras tendo em vista a possibilidade da ocorrência de ciclos fenológicos desarmônicos entre algumas espécies. Além disso, considerando-se que a Mata Atlântica de modo geral apresenta sazonalidade relativamente pequena, deve-se considerar que a própria margem de erro da técnica de fotografias hemisféricas pode, em algum momento, ser próxima da variação real do PAI, o que pode dificultar a detecção de mudanças.

Embora tenha se observado a flutuação de alguns valores de PAI, de modo geral o comportamento típico observado foi a gradual redução no PAI ao longo do período de estudo. A queda das folhas pode ser observada na Figura 4.5 que apresenta amostras de fotografias hemisféricas tomadas em três parcelas com dosséis de diferentes densidades e tomadas nos três períodos de estudo. Da esquerda para a direita é perceptível o aumento de frações não vegetadas no dossel (*GapFractions*) decorrentes da progressiva queda de folhas.

ordem crescente dos valores de fator cosseno do ângulo zenital do mês de julho, ou seja, das parcelas menos iluminadas para as mais iluminadas.

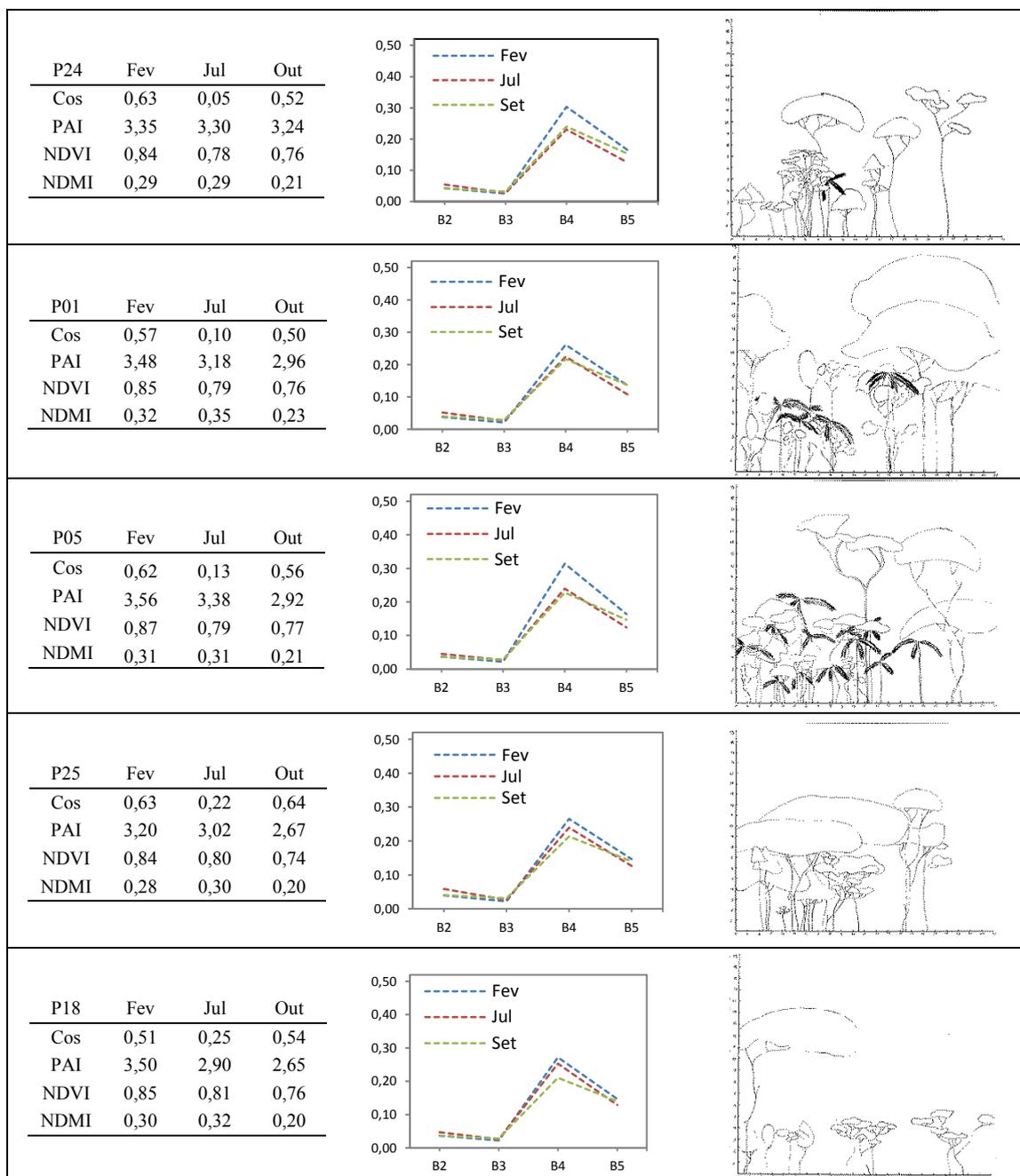


Figura 4.6- Fator cosseno e índices de vegetação e perfil espectral da vegetação para cada parcela nas três etapas, à direita o perfil estrutural longitudinal da respectiva parcela. (Continua)

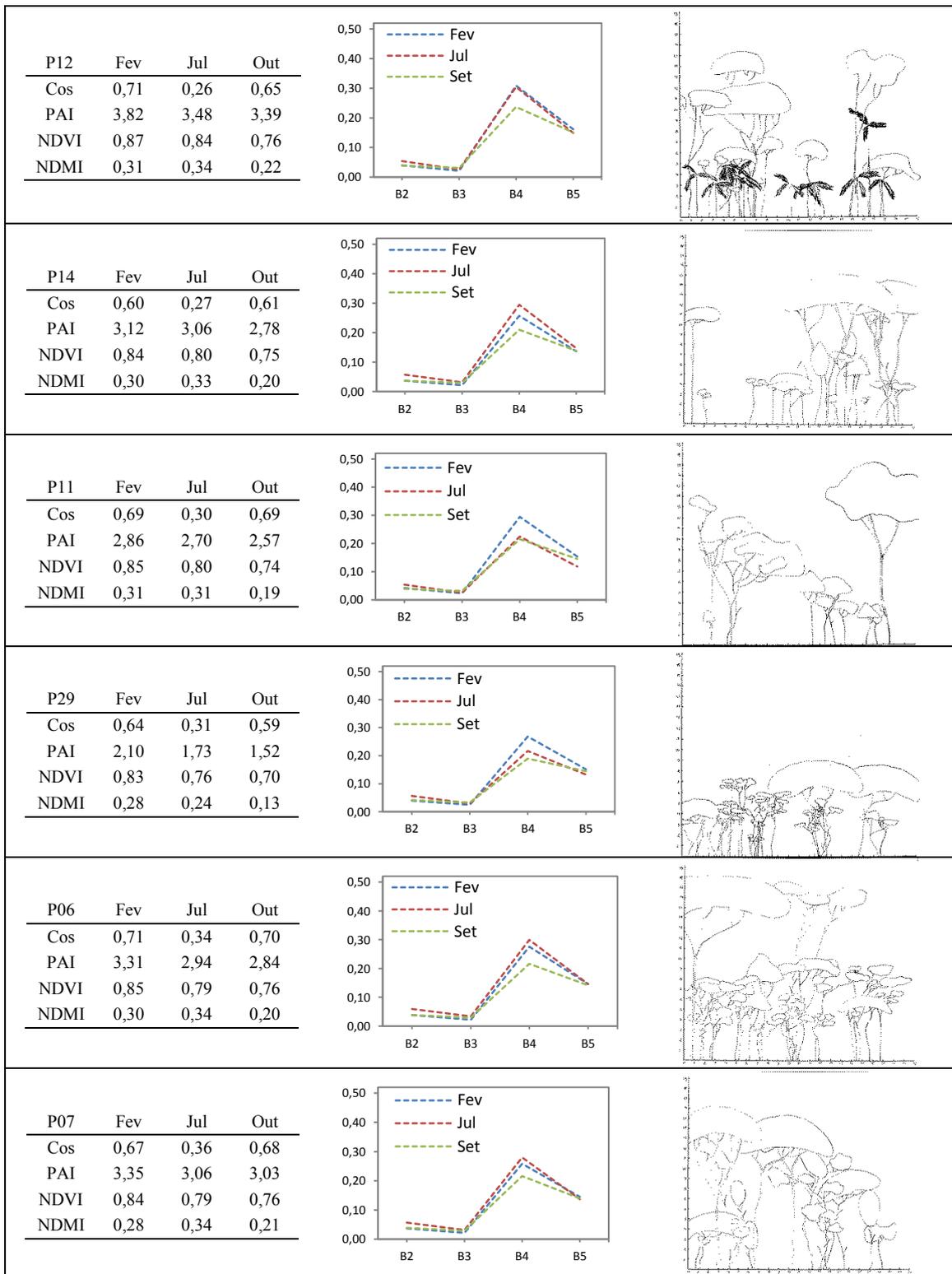


Figura 4.6 – Continuação. (Continua)

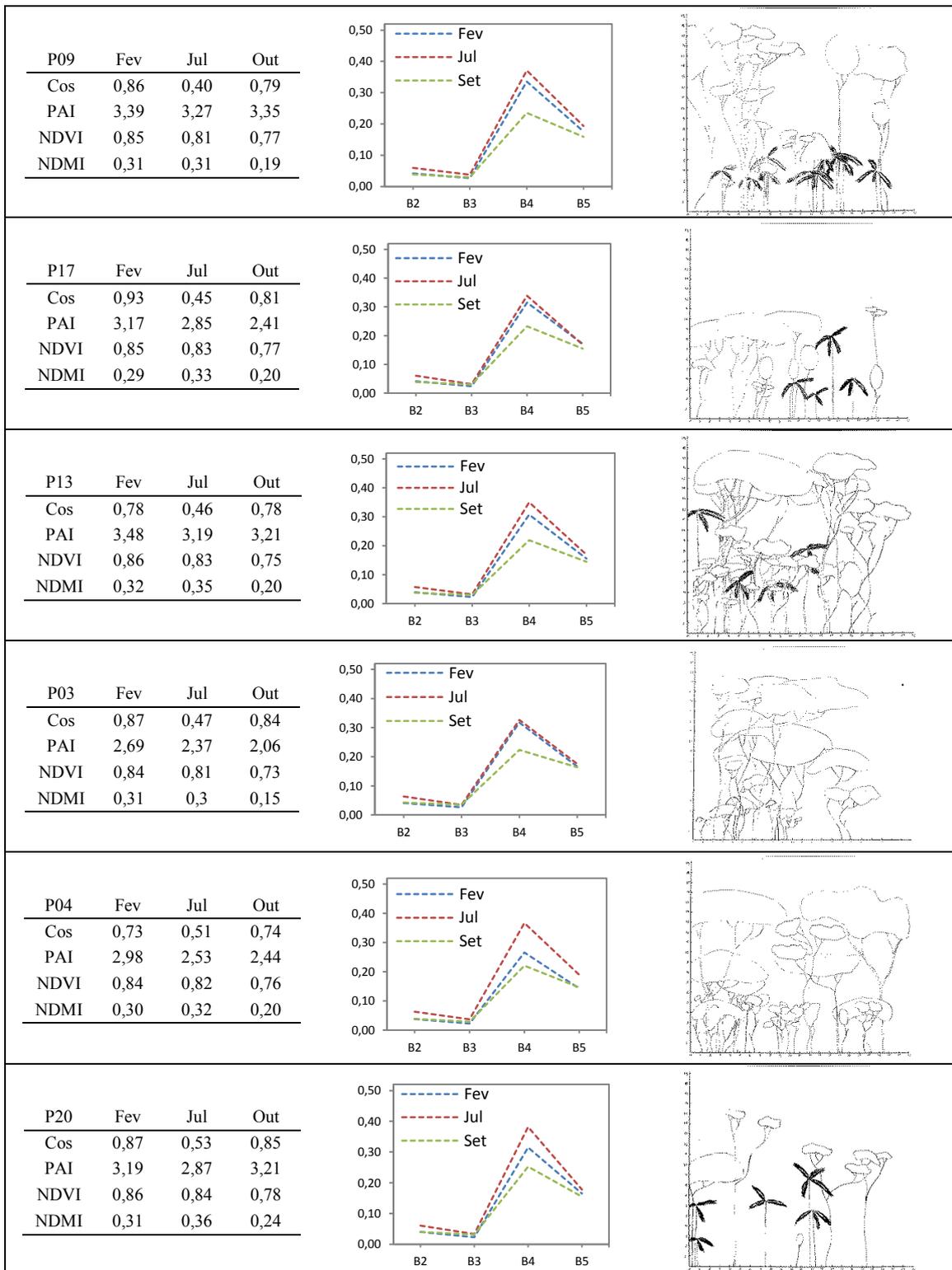


Figura 4.6 – Continuação. (Continua)

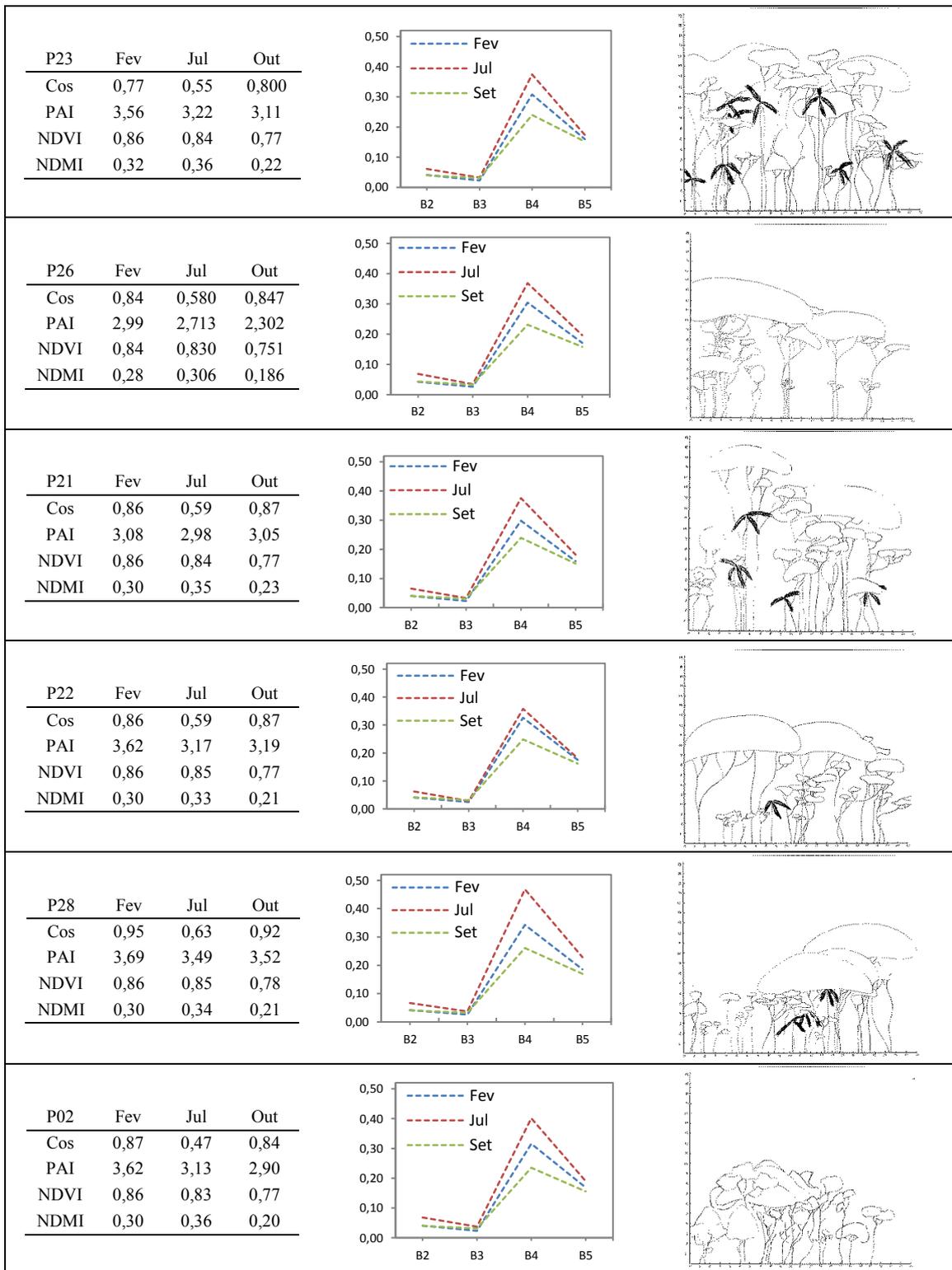


Figura 4.6 – Continuação. (Continua)

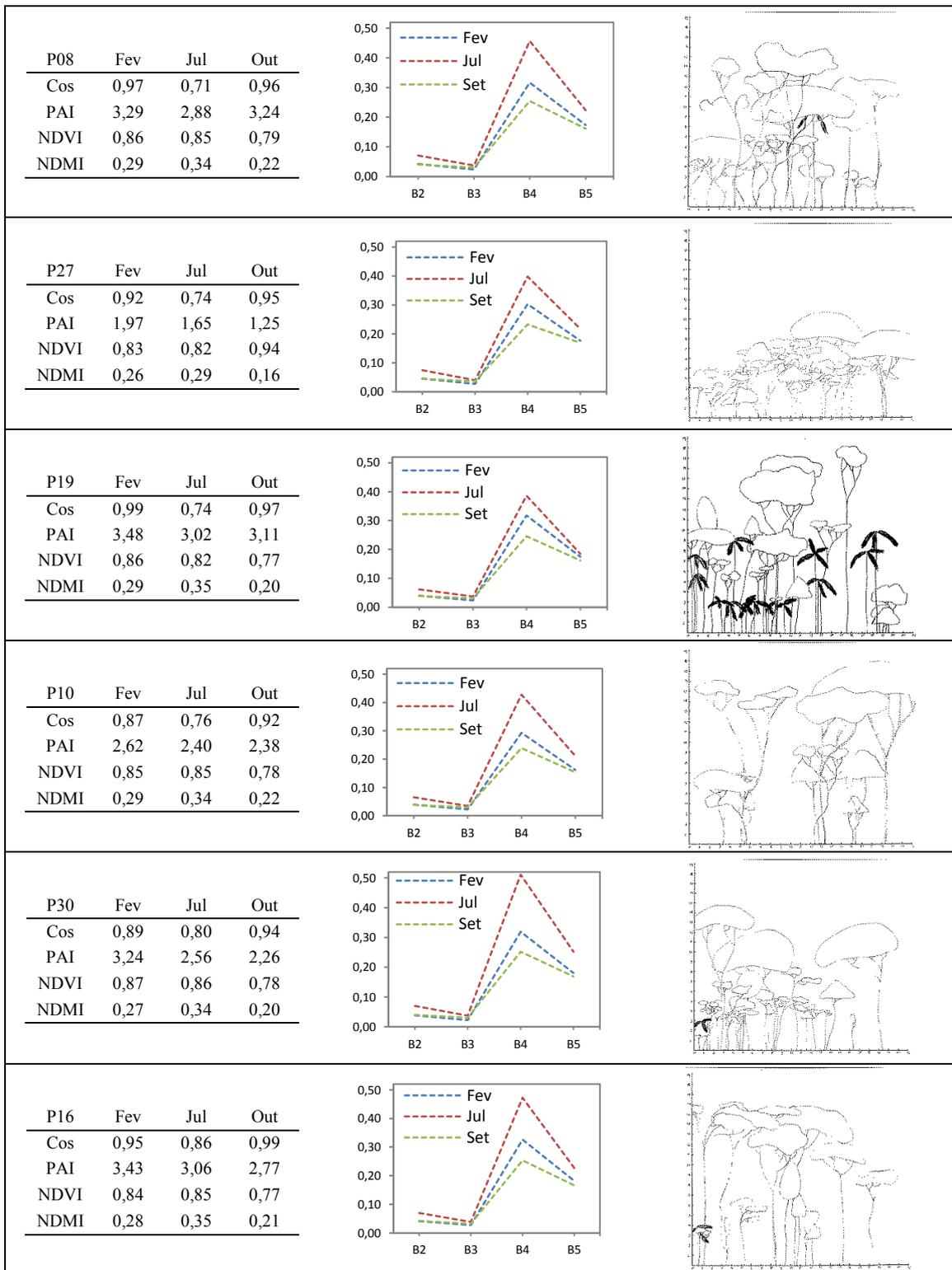


Figura 4.6 – Continuação. (Continua)

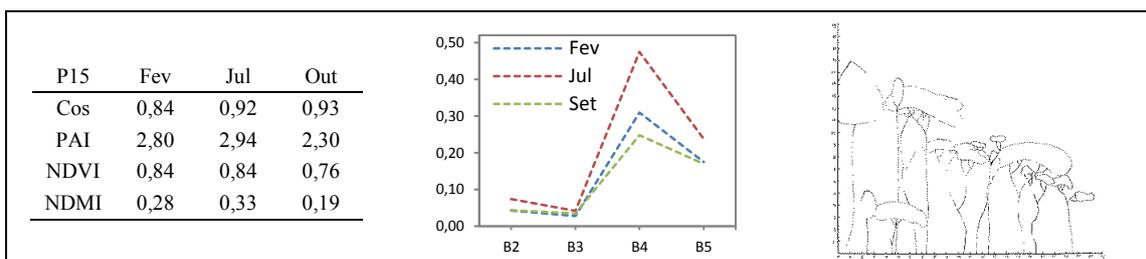


Figura 4.6 - Conclusão.

Uma característica notável nos perfis espectrais é que apesar da redução nos valores de fator cosseno no mês de julho a refletância da maior parte dos alvos aumentou, em especial nas parcelas melhor iluminadas. No mês de outubro, embora se observem os maiores valores no fator cosseno dentre os três períodos do estudo é também a etapa em que se observa a menor taxa de refletância do IVP em praticamente todas as parcelas.

Uma análise conjunta dos dados permite observar melhor estas alterações na dinâmica da refletância dos dosséis nos três períodos. A Figura 4.7 apresenta o valor médio e o desvio padrão da refletância das 30 parcelas nas três etapas avaliadas.

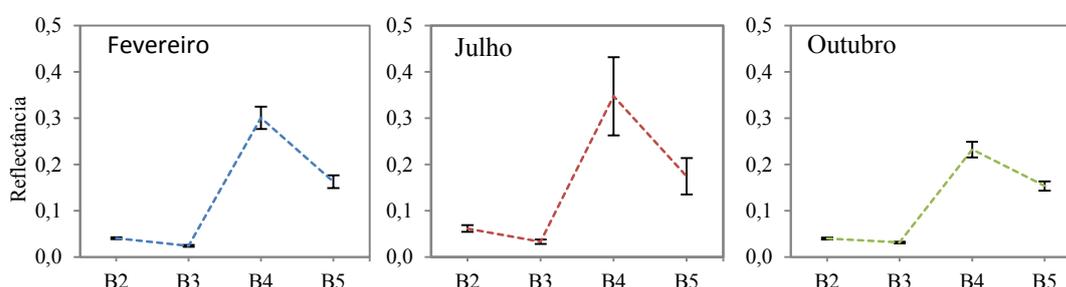


Figura 4.7 - Refletância espectral média dos dosséis para os três períodos de estudo.

Considerando-se a média das 30 parcelas nota-se que entre as etapas de fevereiro e outubro houve aumento da refletância na faixa do vermelho (B3) e considerável redução da refletância na faixa do IVP (B4). Tendo em vista que ambas as imagens foram obtidas sob ângulos de iluminação e visada semelhantes, haveria de se supor que as diferenças na refletância entre os dois períodos se refiram exclusivamente às reduções da biomassa aérea foliar decorrente da mudança sazonal.

Os dados de julho apresentaram aumento geral nos valores de refletância, o que não é explicado exclusivamente pela alteração fenológica da vegetação. Considerando a

dinâmica fenológica do fragmento florestal em questão, em julho a quantidade de folhas existentes nas porções superiores do dossel, fotossinteticamente ativas, deve ser menor do que aquela verificada em fevereiro. Assim, seriam esperados aumentos na refletância nas bandas B2 e B3 (verde e vermelho) e diminuição na refletância nas bandas B4 e B5 (infravermelho próximo e infravermelho médio, respectivamente), conforme descrito por Ponzoni et al. (2012).

Os aumentos na refletância na região do visível foram discretos, mas ocorreram, todavia, também foi verificado aumento na refletância na região do infravermelho próximo, caracterizando dinâmica inversa da esperada. Isso sugere que a variação fenológica (neste caso perda de folhas) não predominou no sinal registrado pelo sensor orbital, havendo, portanto, indicação de interferência de outros fatores sobre esse sinal. É possível que a iluminação mais oblíqua possa ter privilegiado a participação de porções mais interiores do dossel sobre a refletância nessa região espectral, como o sub-bosque e até da liteira que no fragmento como um todo eram sempre presentes. Esse aumento da refletância na faixa do infravermelho na etapa de julho pode estar relacionada ao comportamento anisotrópico da vegetação associada à diminuição do ângulo de elevação solar que passou de 59° em fevereiro para $35,5^\circ$ em julho.

Mudanças nos valores de refletância causados por alteração nos ângulo de incidência da radiação já foi objeto de vários estudos. Chappelle et al. (1980) utilizaram uma placa de sulfato de bário para avaliar os efeitos que a elevação do ângulo zenital de iluminação causam na refletância de uma superfície isotrópica em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Os resultados apontaram que mudanças no ângulo de incidência da radiação causaram variações assimétricas na refletância nos diferentes comprimentos de onda, principalmente quando os dados foram tomados com ângulos zenitais de iluminação inferiores a 50° . Para dados obtidos com ângulos de iluminação elevados (58° e 65°) as variações angulares resultaram em mudanças insignificantes na refletância das diferentes faixas espectrais.

Deering e Middleton (1994) desenvolveram estudos avaliando a anisotropia de florestas temperadas e observaram que alterações no ângulo zenital de iluminação alteraram os

valores de refletância de dosséis de coníferas nos EUA. Os autores observaram que com a elevação do ângulo zenital de iluminação aumentaram os valores de refletância na floresta. Entre os ângulos de 35° e 75° a refletância aumentou em aproximadamente 60%, 30% e 45% para as faixas do vermelho, IVP e IVM respectivamente. A variação nos valores observados por aqueles pesquisadores é diferente da verificada neste trabalho o que pode ser explicado pelas diferentes características arquitetônicas e estruturais das duas florestas. Pinter et al. (1985) ao avaliarem as consequências da alteração do ângulo de iluminação em diferentes culturas de trigo, constataram diferenças na refletância em diferentes comprimentos de onda à medida que o ângulo zenital de iluminação se alterava. Os pesquisadores observaram que estas alterações foram próprias para cada cultura e muito influenciadas pelas suas características biofísicas.

Outro aspecto interessante refere-se às variações estruturais dos dosséis e suas interferências sobre suas refletâncias espectrais. Se observados os perfis transversais apresentados na Figura 4.6 será possível constatar que há alguma diversidade estrutural considerável. Contudo essa diversidade não parece interferir significativamente nas dinâmicas de refletância dos dosséis que parece mais fortemente influenciada pelas mudanças de geometria de iluminação. Há de se considerar ainda que nestes perfis não foram descritas ou apresentadas as condições do sub-bosque, que segundo Huete (1988), exercem grande influência na refletância do dossel.

4.5. Resposta dos Índices de Vegetação às alterações do PAI observadas em campo.

Nesta secção foi avaliado o padrão de resposta dos índices de vegetação NDVI e NDMI à flutuação do PAI estimado mediante o emprego das FH. A Figura 4.8 apresenta a evolução do PAI e dos IVs avaliados considerando as amostras coletadas nos 30 pontos ao longo das três etapas deste estudo.

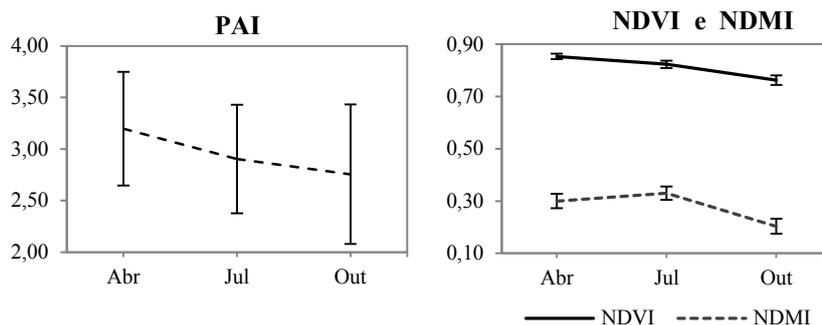


Figura 4.8- Evolução dos valores de PAI e IVs com o desvio padrão para nas três etapas de pesquisa.

De modo geral, os índices não acompanharam fielmente a flutuação dos valores de PAI observados em campo. As FHs apontaram redução mais acentuada do PAI entre as etapas de fevereiro e julho do que aquela apresentada entre julho e outubro. O NDVI apontou dinâmica semelhante, todavia com redução mais pronunciada entre a segunda e terceira etapa. O NDMI, por sua vez, registrou aumento em seus valores em julho assumindo entre julho e agosto trajetória concordante com a queda do PAI.

A Figura 4.9 apresenta, por meio de um gráfico de barras, a variação percentual observada no PAI e nos índices de vegetação para as etapas de julho e outubro em referência aos valores observados em fevereiro.

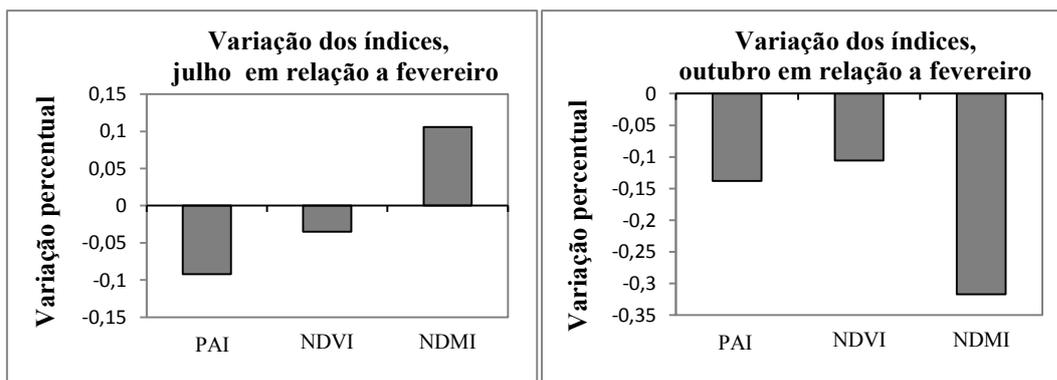


Figura 4.9- Variação do PAI, NDVI e NDMI para as etapas de julho e outubro em relação à etapa de fevereiro.

A análise da Figura 4.9 mostra que em julho o PAI teve redução de aproximadamente 9,5% enquanto o NDVI diminuiu somente 3,5%. No mesmo período o NDMI registrou

aumento próximo a 10% expressando equivocadamente aumento nos valores de biomassa. Na etapa de outubro, quando a condição de iluminação das parcelas é semelhante à de fevereiro a queda do PAI é acompanhada pelos dois índices de vegetação, enquanto o PAI reduziu 14% em relação aos valores de fevereiro, o NDVI teve redução de 11% e o NDMI em 32%.

4.6. Análises da correlação entre PAI e Índices de Vegetação

A figura 4.10 apresenta os diagramas de dispersão para o NDVI e NDMI referente às três etapas da pesquisa.

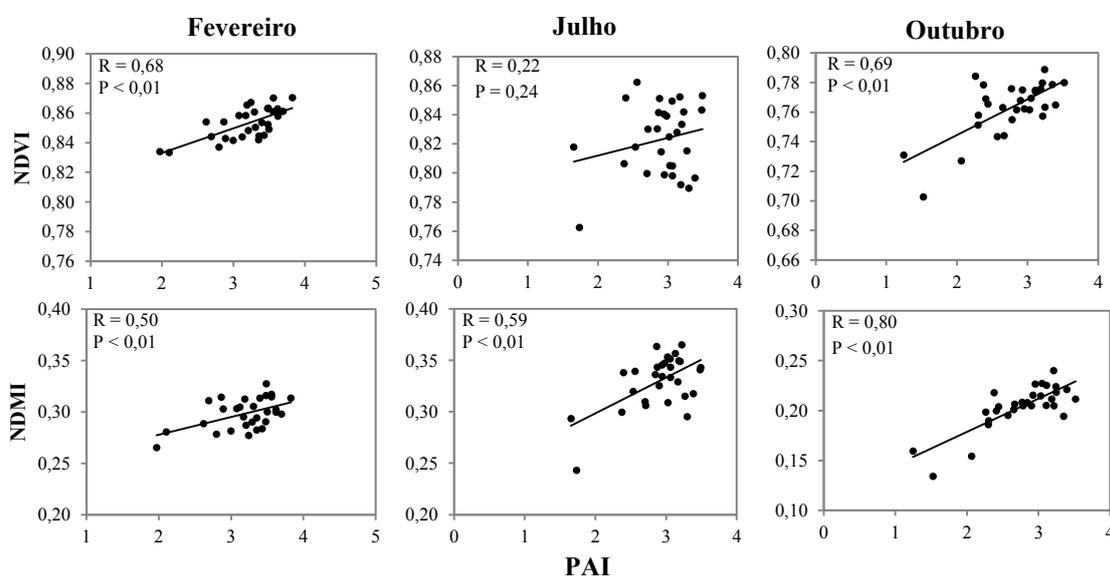


Figura 4.10 - Relação entre IVs x PAI para as três etapas do estudo.

De modo geral observa-se baixa aderência entre os valores dos IVs e o PAI nas três etapas do estudo. O NDVI e o PAI tiveram suas melhores correlações nas etapas de fevereiro e outubro atingindo, respectivamente, coeficientes de relação $R = 0,684$ ($p < 0,01$) e $R = 0,69$ ($p < 0,01$). No mês de julho o índice não apresentou correlação significativa com o PAI com $R = 0,22$ ($p = 0,24$). O NDMI apresentou dinâmica diferente partindo de uma correlação muito baixa em fevereiro $R = 0,50$ ($p < 0,01$) e julho $R = 0,59$ ($p < 0,01$) e alcançando um melhor desempenho na etapa de outubro quando o índice obteve $R = 0,80$ ($p < 0,01$).

Ainda que estes resultados mostrem baixa relação geral entre os índices de vegetação e o PAI, os mesmos apontam fatores que parecem interferir nestas correlações. A análise do desempenho do NDMI nas etapas de fevereiro e outubro sugere que este IV foi influenciado pela mudança sazonal, tendo em vista que, sob condições de iluminação semelhantes, o índice obteve relação sensivelmente melhor no período de seca. Tal resultado pode estar associado à sensibilidade do índice ao conteúdo de água na folha. Apesar disso, a inexistência de dados de umidade das folhas nos dois períodos impede análises mais conclusivas a este respeito.

A correlação entre o NDVI e o PAI permaneceram semelhantes na primeira e terceira etapas do trabalho o que demonstra que a mudança sazonal não alterou a capacidade do IV em estimar os valores de biomassa. Todavia, no mês de julho o NDVI apresentou correlação não significativa com o PAI. Isso sugere que o índice foi influenciado pela mudança na condição de iluminação local em cada ponto, o qual é resultante da combinação entre a mudança do AZI, observada nesta etapa, e o relevo montanhoso, resultando em diferentes condições de iluminação local para cada ponto. Esta influência pode ser notada na Figura 4.11 que apresenta a correlação entre os IVs e o fator cosseno para as três etapas do estudo.

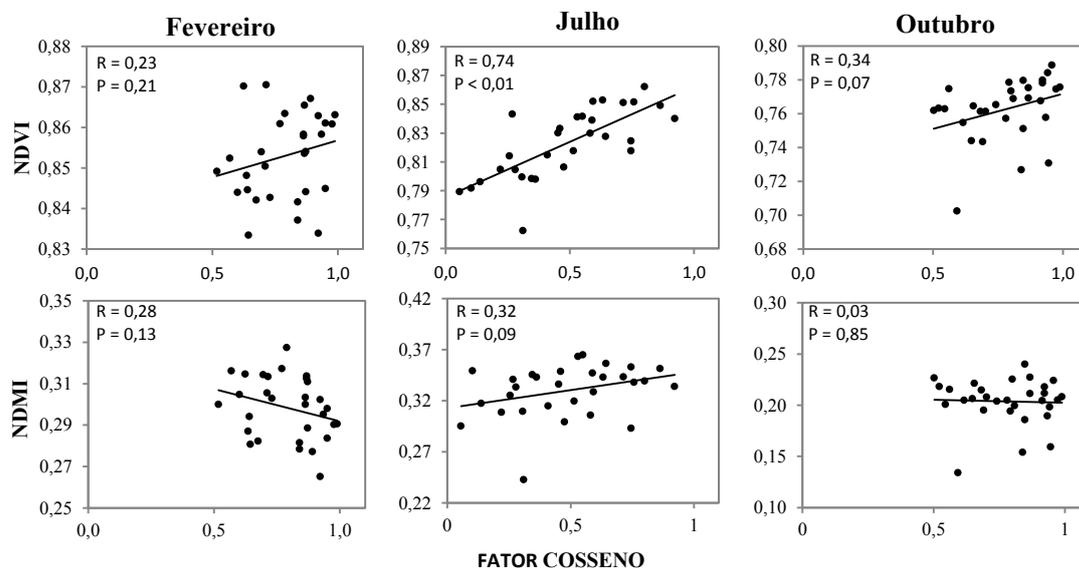


Figura 4.11- Relação entre o fator cosseno e os índices de vegetação nas três etapas do estudo.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.11 observa-se que tanto o NDVI quanto o NDMI tiveram suas relações com o fator cosseno mais fortes em julho, quando a amplitude do fator cosseno foi mais ampla do que nos outros dois meses (fevereiro e outubro). Em julho, conforme já foi apresentado, as relações entre estes mesmos índices e o PAI foram mais fracas do que aquelas verificadas nos outros dois meses, indicando que quando a iluminação foi mais homogênea na cena, prevaleceu a relação entre os índices de vegetação e o PAI. Quando a iluminação foi mais heterogênea, ela passou a dominar na relação com os índices de vegetação.

Quando avaliamos o comportamento dos dois índices no mês de julho observou-se que o NDMI mostrou-se menos influenciado pelo fator cosseno que o NDVI. Esse resultado pode indicar que os índices baseados na faixa do infravermelho sejam menos propensos às variações de iluminação que aqueles baseados na faixa do visível.

4.7. Dinâmica da iluminação e seu efeito sobre as correlações entre PAI e os índices de vegetação.

De acordo com os critérios estabelecidos na definição das classes de iluminação, somente em julho a classe Pouco Iluminado apareceu na cena, enquanto em fevereiro e outubro a maioria das parcelas visitadas aparece bem iluminada. A correlação entre o PAI e os IVs destas parcelas foi avaliada em cada período, deste modo, de fevereiro para julho, oito parcelas que estavam inseridos na classe Bem Iluminado passaram à condição de parcelas Pouco Iluminados, enquanto em outubro, cinco delas voltaram à condição de Muito Iluminados. A partir de fevereiro, 10 parcelas Muito Iluminadas passaram à classe Iluminado no mês de julho, retornando à classe Bem Iluminado em outubro. Nove parcelas permaneceram na classe Bem iluminado durante as três etapas da pesquisa. A correlação entre o PAI x IVs destas amostras é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação entre PAI e Índices de Vegetação para grupos de parcelas sob diferentes condições de iluminação ao longo das etapas de coleta de dados em campo. Em amarelo as amostras bem iluminadas, em cinza claro a amostras Iluminadas, e em cinza escuro as amostras Pouco Iluminadas.

Fevereiro			Julho			Outubro		
Número de mostras	valor r NDVI	valor r NDMI	Número de mostras	valor r NDVI	valor r NDMI	Número de mostras	valor r NDVI	valor r NDMI
8	0,64	0,38	7	0,41	0,08	5	0,92	0,94
10	0,6	0,76	10	0,56	0,54	10	0,75	0,7
9	0,77	0,47	9	0,31	0,84	9	0,76	0,82

À exceção do NDMI na classe Muito Iluminado observou-se que, de modo geral, as três classes de iluminação observadas em julho apresentaram menor correlação do PAI com os IVs do que nas etapas de fevereiro e outubro. A redução das correlações observadas neste comportamento indicaram que não foi a condição de iluminação, neste caso entendida como a quantidade de energia que chega à superfície, que influenciou a relação PAI x IVs, mas sim o ângulo de incidência da luz sobre o dossel configurando uma geometria fonte-alvo-sensor diferente daquela observada nas etapas de fevereiro e outubro. A iluminação mais oblíqua interage de maneira diferente com os constituintes do dossel iluminando partes outrora não iluminadas em seu interior como galhos, troncos e a liteira. Além disso, devido à rugosidade do dossel há maior projeção de sombras das árvores mais altas sobre o dossel das árvores mais baixas. Deste modo, o topo ou superfície do dossel, predominantemente composto por folhas passa a ter menor representatividade na refletância total de cada pixel o que pode diminuir a relação entre a refletância do alvo e o PAI do mesmo.

4.8. Correlações entre PAI e características estruturais do dossel

Das três características estruturais avaliadas neste trabalho, DAP, rugosidade do dossel e altura média das árvores, não foi observada correlação significativa direta entre estes atributos biofísicos e o PAI ou mesmo com os IVs. (Tabela 4.4)

Tabela 4.4 - Coeficiente de correlação (R) entre os parâmetros biofísicos estimados e os índices de vegetação PAI, NDVI e NDMI para as três etapas do estudo.

	Fevereiro			Julho			Outubro		
	PAI	NDVI	NDMI	PAI	NDVI	NDMI	PAI	NDVI	NDMI
DAP	0,01	0,17	0,37	0,06	0,19	0,24	0,20	0,25	0,33
Altura	0,05	0,01	0,07	0,20	0,31	0,45	0,31	0,23	0,46
Rugosidade	0,2	0,25	0,33	0,26	0,31	0,36	0,43	0,43	0,45

Todavia ao se estabelecer correlações entre PAI e IVs a partir de classes divididas de acordo com estes parâmetros observou-se influência estrutural da vegetação nestas correlações.

A Tabela 4.4 apresenta os coeficientes de correlação entre o PAI e os índices de vegetação levando em consideração a estrutura da vegetação. Os parâmetros adotados para a divisão das classes estão descritos no item 3.8.

Tabela 4.5 – Coeficiente de correlação calculados para as relações entre PAI e índices de vegetação considerando a estrutura dos dosséis florestais.

Classes	Fevereiro		Julho		Outubro	
	NDVI	NDMI	NDVI	NDMI	NDVI	NDMI
DAP menor	0,82	0,74	0,43	0,70	0,71	0,88
DAP maior	0,37	0,24	0,28	0,31	0,68	0,65
H menor	0,82	0,61	0,35	0,67	0,74	0,87
H maior	0,30	0,43	0,13	0,28	0,51	0,53
Rug. menor	0,83	0,82	0,37	0,66	0,70	0,88
Rug. inter.	0,77	0,64	0,09	0,25	0,70	0,86
Rug. maior	0,27	0,02	0,14	0,16	0,62	0,54

Considerando-se estas categorias estruturais, observa-se a tendência das classes de menor porte, compostas de árvores de menor altura e com dossel menos rugoso apresentarem correlações mais fortes que os dosséis de maior porte. Isto significa que à medida que a floresta passa a apresentar características mais homogêneas com estrutura de vegetação mais próxima das características típicas de culturas agrícolas as relações entre PAI e dados radiométricos se fortalecem. Correlações menos significativas foram observadas em julho, mais uma vez indicando a influência que a geometria de iluminação exerce sobre as relações estabelecidas, tal como já foi observado por Breunig et al. (2010).

4.9. Comparação multi-temporal da relação entre PAI x IVs

Os resultados dos secções anteriores demonstram a grande quantidade de fatores que influenciam as relações entre dados radiométricos e dados de campo. Mostram ainda a dificuldade de se estabelecer alguma padronização que permita a comparação multi-temporal de dados gerados a partir de sensores radiométricos, mesmo para formações florestais que apresente variação da biomassa aérea foliar relativamente pequena como no fragmento investigado. A Figura 4.12 apresenta em um mesmo gráfico a nuvem de dispersão de pontos que se estabelece da correlação entre PAI x IV das três etapas da pesquisa. Ao analisar as retas de regressão que expressam a tendência da distribuição dos pontos observa-se que, embora os valores de PAI sejam semelhantes nas três etapas (aproximadamente entre 2 e 3,8), suas estimativas baseadas nos índices de vegetação não são equivalentes. Tomemos por exemplo um PAI = 3; a reta da regressão que estima este valor apresentará para a o mês de fevereiro NDVI = 0,85, todavia este mesmo valor de PAI terá para o mês de julho NDVI = 0,82 e em outubro NDVI = 0,77. De modo semelhante, a estimativa do NDMI apresentará para o mesmo PAI valores diferentes para a imagem de fevereiro, julho e outubro com se pode observar na figura 4.12.

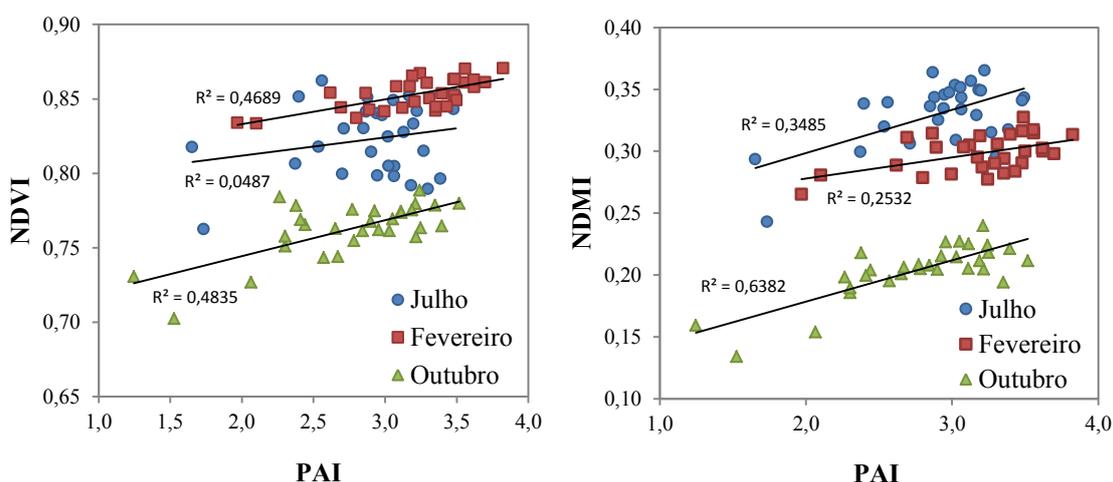


Figura 4.12 - Nuvem de dispersão das regressões entre PAI e IVs para as três etapas de pesquisa

Este resultado indica que não é possível assumir relações estáveis e absolutas entre estes dois conjuntos de dados, ainda que para uma mesma formação florestal. Essa dinâmica nas relações se explica pela ação diferenciada e conjunta da geometria de iluminação e da topografia nos valores de refletância nas regiões espectrais envolvidas nos cálculos dos índices de vegetação (LIESENBERG et al. 2007; GALVÃO et al. 2009; PONZONI et al. 2012).

5. CONCLUSÕES

Durante as etapas de tomada e de processamento das fotografias hemisféricas observou-se que além dos cuidados com exposição e condição de iluminação, amplamente discutidos na literatura, é importante estar atento à qualidade da focalização das imagens que pode se mostrar problemática em dosséis densos devido a existência de vários estratos arbóreos. Fotografias desfocadas apresentam a tendência de aumentar o PAI por obscurecer frações abertas do dossel, sobretudo em condições de dossel mais denso, cujas frações abertas (*gap fractions*) se apresentam menores e em menor número.

Considerando-se o monitoramento da biomassa o NDVI apresentou correspondência com a variação do PAI ao longo do período de estudo apontando redução da biomassa nos meses de julho e outubro. Já os valores do NDMI mostraram dinâmica inversa, indicando propensão ao aumento da biomassa no mês de julho e assumindo entre julho e outubro tendência concordante com a dinâmica dos valores de PAI.

Quando avaliamos a relação entre o PAI e os IVs no período chuvoso e no período seco observaram-se dinâmicas diferentes no comportamento dos dois Índices. As correlações entre NDVI e PAI mostraram-se pouco influenciadas pela alteração da vegetação entre a estação chuvosa e seca apresentando correlações muito semelhantes nos dois períodos. O NDMI apresentou-se mais sensível às mudanças de estação. Mostrando considerável melhora de desempenho na estação seca em relação aos resultados obtidos na estação chuvosa. Esta diferença no desempenho dos dois índices de vegetação pode estar relacionada às diferentes características mensuradas no comportamento espectral das folhas por parte dos IVs.

O NDVI foi fortemente influenciado pela variação da condição de iluminação local observada nas amostras no mês de julho. A relação entre NDVI x Fator Cosseno na etapa de julho foi superior à relação do índice com o PAI, demonstrando que a iluminação exerceu maior influência sobre os valores do índice que a biomassa aérea foliar no referido período. O segundo índice avaliado, o NDMI, mostrou-se menos influenciado pela variação topográfica de modo que sua correlação com o PAI foi superior à relação entre o índice e o Fator Cosseno no mesmo período.

Estes dados sugerem que índices baseados em comprimentos de onda da faixa do infravermelho podem ser menos susceptíveis aos efeitos da iluminação que aqueles que se valem de dados da faixa do visível. Nas etapas de fevereiro e outubro, período em que as condições de iluminação foram mais homogêneas, não foi observada relação significativa entre o fator cosseno e os IVs. O resultado demonstra que a condição de iluminação local, decorrente da combinação entre relevo montanhoso e baixo ângulo de elevação solar, diminui a eficiência dos índices em estimar a variação da biomassa aérea foliar da vegetação, em especial para o NDVI.

A relação entre o PAI e os IVs de alvos sob diferentes condições de iluminação em função do relevo somente foram avaliadas no mês de julho, período de maior amplitude de iluminação entre os alvos. As relações estabelecidas entre o PAI e os IVs para as diferentes classes mostraram que independente da condição de iluminação dos alvos, as relações diminuem na etapa de julho, de modo que nenhuma das classes avaliadas foi imune à influência das mudanças do ângulo zenital de iluminação.

As características estruturais como altura e rugosidade do dossel não tiveram correlação direta com os índices avaliados, todavia a estratificação das amostras baseadas nos critérios estruturais de DAP, altura média e rugosidade mostraram que os dosséis de menor porte e mais homogêneos apresentaram melhor correlação entre o PAI e os dados orbitais que aqueles com maior altura e de dossel mais complexo.

Finalmente ao se avaliar os valores do PAI e as estimativas que os IVs fazem deste parâmetro biofísico nas três etapas do estudo observou-se que para o mesmo valor de PAI foram geradas, diferentes estimativas de NDVI e NDMI. O que demonstra que a refletância de cada cena e os produtos dela obtidos são influenciados por múltiplos fatores, interdependentes e relacionados à geometria de iluminação, à topografia, às características atmosféricas entre outros, contribuindo para a que se estabeleçam diferentes dinâmicas na refletância nas regiões espectrais envolvidas nos cálculos dos índices de vegetação. Portanto, estimativas de PAI realizadas por meio destas relações não devem ser assumidas em termos absolutos, ainda que para uma mesma formação florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASNER, G. P.; WESSMAN, C. A.; SCHIMMEL, D.S.; ARCHER, S. Variability in leaf and litter optical properties: Implications for BRDF model inversions using AVHRR, MODIS, and MISR. **Remote Sensing of Environment**, v. 63 p. 243-257, 1998.
- BALDOCCHI, D.; BOYD H.; MATT, D.; McMILLEN R. Seasonal variation in the statistics of photosynthetically active radiation penetration in an oak-hickory forest. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 36, p.343-361, 1986.
- BALDOCCHI, D.D.; HUTCHINSON, B.A.; MATT, D.R.; McMILLEN, R.T. Seasonal variations in the radiation regime within an oak-hickory forest. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v33, p.177-191,1984.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 35, n. 35, p. 161-173, 1991.
- BORCHERT, R. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. **Ecology**, n. 75, p. 1437-1449, 1994.
- BRÉDA, N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 54, n. 392, p. 2043-2417, Nov. 2003.
- BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Directional effects on NDVI and LAI retrievals from MODIS: A case study in Brazil with soybean. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 1, p. 34-42, 2011.
- CAMPS-VALLS, G.; BRUZZONE, L.; MELGANI, F. Robust Support Vector Regression for Biophysical Variable Estimation From Remotely Sensed Images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 3, n. 3, p. 1-5, 2006.
- CANAVESI, V. **Aplicação de dados Hyperion EO-1 no estudo de plantações de eucalyptus spp.** 2008. 124 p. (INPE-15316-TDI/1360). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.01.14.06>>. Acesso em: 24 jun. 2013.
- CANHAM, C. D.; DENSLOW, J. S.; PLATT, W. J.; RUNKLE, J. R. Light regimes beneath canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. **Canadian Journal Forest Resources**, v. 20, p. 620 - 631, 1990.
- CANTINHO, R. Z. **Avaliação de propriedades biofísicas de dosséis de Eucalyptus spp. mediante aplicação de técnicas de sensoriamento remoto.** 2012. 129 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.11.20.08-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C4E3UE>>. Acesso em: 20 out. 2012.

- CHANDER G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893-903, 2009.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on, v. 41, n. 11, p. 2674–2677, 2003.
- CHANDOLA, V.; HUI, D.; GU, L.; BHADURI, B.; VATSAVAI, R. R. Using time series segmentation for deriving vegetation phenology indices from MODIS NDVI Data. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA MINING WORKSHOPS, 13., 2010, Sydney, Australia. **Proceedings...** Sydney: IEEE, 2010. p. 202-208.
- CHAPPELLE, F.W.; WOOD, F. W.; NEWCOMB, W.W. **Time of day effects on wheat reflectance in fifteen selected bands**, p. 257-259, 1980. Disponível em http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800012290_1980012290.pdf acesso em setembro 2012.
- CHAVEZ, P. S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 62, n. 9, p. 1025–1035. 1996.
- CHEN, J M; BLACK, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves. **Plant Cell and Environment**, v. 15, n. 4, p. 421-429, 1992.
- CHEN, J. M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 80, n. 2-4, p. 135-163, 1996.
- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 3, p. 175-183, 1974.
- CURRAIN, P.J.; WINDHAN, W. R.; GHOLZ, H. L.; Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. **Tree Physiology**, n.15, p 203-206, 1995.
- DALLA NORA, E. L.; SANTOS, J. E. Análise da dinâmica sazonal de duas formações florestais do bioma mata atlântica com base em índices de vegetação. **Perspectiva**, v. 34, p. 41-51. Erenchim, 2010.
- DEERING D.W.; MIDDLETON, E.M.; ECK, T. F. Reflectance anisotropy for a spruce-hemlock forest canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p. 242-260, 1994.
- DUNN, A.H., BEURS, K.M. Land surface phenology of North American mountain environments using moderate resolution imaging spectroradiometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 1220-1233, 2011.
- EPIPHANIO, J.C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A.R.; RUDORFF, B.F.T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, n.6, p.445-454, 1996.

- FALKENSTRÖM, H. Evaluation of IRS-1C LISS-3 satellite data for Norway spruced foliation assessment. **Swedish Water and Air**. February 1999, p. 1-26, 1999.
- FRANKLIN, S. E. **Remote Sensing for Sustainable Forest Management**. Lewis Publishers, 2001. 407 p.
- FÜREDER, P. Topographic correction of satellite images for improved LULC classification in alpine areas. 2010 in: 10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, **Proceedings...** 2010p. 187 - 194..
- GALVÃO, L.; PONZONI, F. J.; LIESENBERG, V.; SANTOS, J. Possibilities of discriminating tropical secondary succession in Amazônia using hyperspectral and multiangular CHRIS/PROBA data. **ITC Journal**, p. 1, 2009.
- GAO, B. C.. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.
- GARDINGEN, P. R. V.; JACKSON, G. E.; RUSSELL, G.; SHARP, L. Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 94, 1999.
- GOEL, N.; STREBEL, D. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. I. Problem definition and initial results using the suits model. **Remote Sensing of Environment**, v. 13, n. 6, p. 487-507. 1983.
- GOSA, A. G.; STRUB, G. S.; KOOISTRA, L.; SCHAEPMAN, M.; PELLIKKA, P. Estimation of leaf area index using optical field instruments and imaging spectroscopy. **5th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy**, p. 1-13. Bruges. 2007.
- GREEN, E. P.; MUMBY, P. J.; EDWARDS, A. J.; CLARK, C. D.; ELLIS, A. C. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. **Aquatic Botany**, v. 58, n. 1, p. 11-19, 1997.
- HALE, S. E.; EDWARDS, C.; MASON, W. L.; PRICE, M.; PEACE, A. Relationships between canopy transmittance and stand parameters in Sitka spruce and Scots pine stands in Britain. **Forestry**, v. 82, n. 5, p. 503-513, 2009.
- HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da Vegetação Brasileira**. ed. 2, Rio de Janeiro: IBGE. 2012. 271p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2011. 598p.
- JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERT, K. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1-2, p. 19-35, 2004
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, p. 663-666, 1969.

JUÁREZ, N. R.; ROCHA, H.R.; FIGUEIRA, A.M.S.; GOLDEN, M.L.; MILLER, S.D. An improved estimate of leaf area index based on the histogram analysis of hemispherical photographs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.14, p. 920 -928, 2009.

JUSTICE C.O.; TOWNSHEND J. R. G.; HOLBEN, B.N.; TUCKER, C. J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.8, p. 1271-1318, 1985.

KATO, S.; KOMIYAMA, A. A calibration method for adjusting hemispherical photographs to appropriate black and white images. **Journal of Forest Research**. v. 5, n.2, p. 109 -111, 2000.

KEARSLEY, E. **Characterizing spatial variability of tropical rainforest structure using hemispherical photography, in the reserves of Yangambi and Yoko (Democratic republic of Congo)**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosciências) Universidade de Gante, Belgica, 2011.

KIM, S.K.; LEE, K.S. Quality assessment of global MODIS LAI product for the regional scale applications. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS (ISPRS), 20., 2004, Istanbul, Turkey **Proceedings...** Istanbul: ISPRS, 2004.

KRIEBEL, K. T. Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces. **Applied Optics**, v. 17, n. 2, p. 253-259, 1978.

KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M.; GOWER, S. T. Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. **Tree physiology**, v. 19, n. 11, p. 695-706, 1999.

LEBLANC, S. G.; FERNANDES, R.; CHEN, J.M. Recent advancements in optical field leaf area index, foliage heterogeneity, and foliage angular distribution measurements. In: IGARSS- INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2002, Toronto. **Proceedings...** Toronto: IEEE Press, 2002. v. 5, n. 613, p. 2902–2904.

LEE, K. S. et al. Remote sensing estimation of forest LAI in close canopy situation. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, 20, 2004, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul: OrhanAltan, 2004. p. 400 – 404.

LEMOS FILHO, J.P.; MENDONÇA FILHO, C.V. Seasonal changes in the water status of three wood legumes from the Atlantic forest, Caratinga, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v 16, p. 21-32, 2000.

LEMOS FILHO, J.P.; MENDONÇA FILHO, C.V. Seasonal changes in the water status of three wood legumes from the Atlantic forest, Caratinga, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v 16, p. 21-32, 2000.

LIESENBERG, V.; GALVÃO, L.S.; PONZONI, F.J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna

physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n.1-2, p. 276-286, 2007.

LIMA E. N. **Variações na dinâmica de algumas populações herbáceas de uma área de caatinga de Pernambuco, Brasil**. 2007. 57 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, 2007.

MAIRE, G. LE; MARSDEN, C.; VERHOEF, W. et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 2, p. 586-599, 2011.

MANTOVANI, M.; RUSCHEL, A. R.; REIS, M. S.; PUCHALSKI, A.; NODARI, R. O. Fenologia reprodutiva de espécies arbóreas em uma formação secundária da floresta Atlântica. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 451–458, 2003.

MARKHAM, B. L. e BARKER, J.L. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n.3, p. 517-523, 1987.

MARSDEN, C.; MAIRE,G.; STAPE, J.L.; SEEN, D.; ROUPSARD, O.; CABRAL, O.; EPRON, D.; LIMA,A.M.N.; NOUVELLON, Y.; Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v.259 p.1741-1753, 2010.

MATSUSHITA, B.; YANG, W.; CHEN, J.; ONDA, Y.; QIU, G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. **Sensors**, v.7, p.2636-2651, 2007.

MORELLATO, L.P.C. As estações do ano na floresta. In: MORELLATO P.C.; H.F. LEITÃO-FILHO, (orgs.). **Ecologia e preservação de uma floresta tropical urbana**. Campinas: Unicamp, 1995, p. 37-41

MORELLATO, L.P.C.; TALORA, D.C.; TAKAHASI, A.; BENKLE, C.C.; ROMERA, E.C.; ZIPPARRO, W.B. Phenology of Atlantic Rain Forest trees: a comparative study. **Biotropica**, v. 32, p. 811-823. 2000.

MYNENI, R. B.; ASRAR, G. Radiative transfer in three-dimensional atmosphere-vegetation media. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 49, n. 6, p. 585–598, 1993.

NATIONAL REMOTE SENSING AGENCY (NRSA). **Resourcesat – 1 (IRS-P6) data user handbook**. Hyderabad: NRSA. 2003. 142p.

NETTESHEIM, F.C.; MENEZES, L.F.T.; CARVALHO, D.C.; CONDE, M.M.S.; ARAUJO, D.S.D. Influence of environmental variation on Atlantic Forest Tree-shrub-layer phytogeography in southeast Brazil, **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 2 p.369-377, 2010.

NEWCOMER, M.E.; BIRD, J.E.; SABATINE, S.M.; SADY, G.C.; STALZER,A.M.; WHEELER,T.A. Utilizing NASA satellite missions to identify Bark Beetle infestation

- in Sequoia National Park In: ANNUAL CONFERENCE AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 26, San Diego, 2010. , **Proceedings...** San Diego, 2010. p. 691-702.
- NOBIS, M.; HUNZIKUER, U. Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection. **Agricultural and Forest Meteorology**. V128, p 243-250, 2005.
- OLIVEIRA FILHO, A; FONTES, M. A. I. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in south-eastern Brazil, and the influence of climate. **Biotropica**, v.32 n.4 p.793-810, 2000.
- PALOSCIA, S. A summary of experimental results to assess the contribution of SAR for mapping vegetation biomass and soil moisture. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 246-261, 2002
- PEREIRA, T. S.; COSTA, M. L. M. N.; MORAES, L. F. D.; LUCHIARI, C. Fenologia de espécies arbóreas em Floresta Atlântica da reserva biológica de Poço das Antas, Rio de Janeiro, Brasil. **Iheringia**, Série Botânica, Porto Alegre, v. 63, n. 2, p. 329 - 339, 2008.
- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C.E. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars **International Journal of Remote Sensing**, v.6, n.12, p.1813-1825, 1985.
- PIRES-O'BRIEN, M.J.; O'BRIEN, C.M. **Ecologia e Modelamento de Florestas Tropicais**. Belém: FCAP, Serviço de Documentação e Informação, 400p. 1995.
- POCEWICZ, A. L.; GESSLER, P.; ROBINSON, A. P. The relationship between effective plant area index and Landsat spectral response across elevation, solar insolation, and spatial scales in a northern Idaho forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 2, p. 465–480, 2004.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2 ed. São José dos Campos: Parêntese, 2012. 164p.
- QI, J.; CABOT, F.; MORAN, M. S.; DEDIEU, G. Biophysical Parameter Estimations Using Multidirectional Spectral Measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. June 1994, p. 71-83, 1995.
- RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. **IEEE Geoscience and Remote Sensing**, IEEE Transactions on, v. 41, n. 05, p. 1056–1061, 2003.
- RICH, P. M. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, n. 1, p. 13-29, 1990.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLA, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt, 1974. 371p. type II, progress report.

- SCHAAF, C. B.; XIAOWEN, L.; STRAHLER, A. H. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances calculated with a geometric-optical canopy model. **IEEE Transactions on geosciences and remote sensing**, v. 32 n. 6 p. 1186 – 1194, 1994.
- SCHOWENGERDT, R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. **Science**, v. 332, p.515, 2007.
- SEA, W. B.; CHOLER, P.; BERINGER, J.; WEINMANN, R.A.; HUTLLEY, L.B.; LEUNING, R. Documenting improvement in leaf area index estimates from MODIS using hemispherical photos for Australian savannas. **Agricultural and forest meteorology**, v.151, p. 1453-1461, 2011.
- SHULTIS, J. K.; MYNENI, R. Radiative transfer in vegetation canopies with anisotropic scattering. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 39, n. 2, p. 115–129, 1988.
- SILVA, A. F. **Composição florística e estrutura fitossociológica do estrato arbóreo da Reserva Florestal Professor Augusto Ruschi, São José dos Campos, SP**. 1989. 162 p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 1989.
- SRINIVASULU, J.; KULKARNI, A. V. Estimation of spectral reflectance of snow from IRS-1D LISS-III sensor over the Himalayan terrain. **Journal of Earth System Science**, v. 113, n. 1, p. 117-128, 2004.
- TUCKER, C. J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. **Remote Sensing of Environment**, v. 10, n. 1, p. 23–32. 1980.
- VALERIANO, M. DE M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.5933-5940.
- VERMOTE, E.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. et al. **Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV)**. n. 2, p. 1-55, 2006.
- WAGNER, S. Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 90, n. 1-2, p. 103-117, 1998.
- WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2005.
- WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G. J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI,

errors and sampling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, n. 1-2, p. 37-53, 2004.

WHITE, A.; THOMTON, P. E. A continental responses phenology model climatic for monitoring variability vegetation to interannual. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 11, n. 2, p. 217-234, 1997.

XIE, Y.; SHA, Z.; YU, M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. **Journal of Plant Ecology**, v. 1, n. 1, p. 9-23. 2008.

ZHANG, Y.; CHEN, JING M.; MILLER, J. R. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 133, n. 1-4, p. 166-181, 2005.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. **Sensors**, v. 9, n. 4, p. 2719-2745, 2009.

APÊNDICE A – TABELAS COM OS PARÂMETROS DE CADA PARCELA REFERENTES ÀS TRÊS ETAPAS DE CAMPO

Tabela A1 – Parâmetros biofísicos e dados radiométricos da amostras referentes à etapa 1.

ETAPA 1 - FEVEREIRO											
PARCELA	IAF	Fator Cos	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	NDVI	NDMI	DAP *	H média*	Rugosidade*
1	3,483	0,569	0,038	0,021	0,261	0,136	0,852	0,316	12,850	7,23	4,40
2	3,620	0,922	0,041	0,023	0,315	0,169	0,863	0,302	11,010	6,81	2,14
3	2,693	0,871	0,041	0,027	0,317	0,167	0,844	0,311	13,202	6,42	4,28
4	2,892	0,729	0,038	0,023	0,266	0,142	0,843	0,303	11,327	6,48	3,65
5	3,560	0,624	0,037	0,022	0,314	0,164	0,870	0,315	13,940	6,02	3,36
6	3,310	0,710	0,038	0,022	0,275	0,146	0,850	0,306	13,433	6,94	3,79
7	3,354	0,675	0,037	0,022	0,258	0,145	0,842	0,282	16,612	8,55	4,46
8	3,293	0,976	0,042	0,024	0,317	0,174	0,861	0,290	13,707	8,33	5,68
9	3,398	0,867	0,042	0,027	0,336	0,175	0,854	0,314	15,002	8,45	4,81
10	2,620	0,871	0,039	0,023	0,293	0,162	0,854	0,289	20,817	9,74	4,95
11	2,867	0,694	0,042	0,023	0,295	0,154	0,854	0,314	12,935	7,10	4,94
12	3,825	0,714	0,040	0,021	0,309	0,162	0,871	0,313	10,712	5,93	3,73
13	3,488	0,788	0,039	0,023	0,307	0,156	0,863	0,327	16,033	8,70	4,16
14	3,122	0,600	0,037	0,022	0,257	0,137	0,844	0,305	7,639	6,46	3,83
15	2,800	0,839	0,042	0,027	0,310	0,175	0,837	0,278	11,751	9,31	3,95
16	3,432	0,949	0,041	0,027	0,327	0,182	0,845	0,284	12,141	8,90	4,98
17	3,173	0,933	0,041	0,024	0,315	0,171	0,858	0,295	10,584	5,95	2,74
18	3,500	0,518	0,037	0,022	0,272	0,146	0,849	0,300	8,403	4,81	3,28
19	3,480	0,988	0,040	0,023	0,318	0,175	0,863	0,291	11,340	6,88	4,36
20	3,192	0,867	0,040	0,023	0,315	0,165	0,865	0,312	15,725	7,65	3,96
21	3,080	0,863	0,040	0,023	0,298	0,159	0,858	0,303	14,426	7,88	3,69
22	3,623	0,863	0,041	0,025	0,326	0,176	0,858	0,300	12,732	6,19	3,32
23	3,558	0,769	0,041	0,023	0,308	0,160	0,861	0,317	15,267	8,55	3,91
24	3,357	0,639	0,042	0,026	0,303	0,166	0,845	0,294	11,694	6,23	2,70
25	3,208	0,635	0,039	0,022	0,265	0,147	0,848	0,287	13,351	7,27	2,94
26	2,997	0,839	0,043	0,026	0,305	0,171	0,842	0,281	14,996	7,28	3,15
27	1,970	0,922	0,046	0,027	0,303	0,176	0,834	0,265	10,632	5,63	1,47
28	3,698	0,949	0,041	0,026	0,343	0,185	0,861	0,298	10,728	5,73	2,38
29	2,103	0,643	0,040	0,024	0,269	0,151	0,833	0,281	10,065	5,16	1,39
30	3,245	0,890	0,038	0,023	0,319	0,181	0,867	0,277	10,879	5,61	2,98

*Dados coletados na primeira etapa de campo

Tabela A2 – Parâmetros biofísicos e dados radiométricos da amostras referentes à etapa 2.

ETAPA 2 - JULHO											
PARCELA	IAF	Fator Cos	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	NDVI	NDMI	DAP *	H média*	Rugosidade*
1	1,654	0,745	0,074	0,040	0,398	0,218	0,818	0,293	10,632	5,63	1,47
2	3,020	0,745	0,062	0,037	0,386	0,185	0,825	0,353	11,340	6,88	4,36
3	3,480	0,267	0,055	0,026	0,304	0,149	0,843	0,341	10,712	5,93	3,73
4	2,947	0,345	0,059	0,034	0,300	0,146	0,799	0,346	13,433	6,94	3,79
5	3,130	0,643	0,068	0,038	0,401	0,190	0,828	0,357	11,010	6,81	2,14
6	2,905	0,255	0,047	0,026	0,253	0,129	0,814	0,325	8,403	4,81	3,28
7	3,168	0,592	0,063	0,029	0,358	0,181	0,852	0,329	12,732	6,19	3,32
8	3,183	0,102	0,052	0,026	0,225	0,108	0,792	0,350	12,850	7,23	4,40
9	3,386	0,137	0,045	0,027	0,240	0,124	0,796	0,318	13,940	6,02	3,36
10	2,702	0,306	0,054	0,025	0,225	0,118	0,800	0,310	12,935	7,10	4,94
11	2,560	0,800	0,070	0,038	0,511	0,252	0,862	0,339	10,879	5,61	2,98
12	2,850	0,451	0,061	0,031	0,339	0,168	0,830	0,336	10,584	5,95	2,74
13	2,980	0,588	0,065	0,033	0,375	0,182	0,839	0,347	14,426	7,88	3,69
14	3,027	0,220	0,058	0,026	0,239	0,126	0,805	0,309	13,351	7,27	2,94
15	2,878	0,714	0,070	0,037	0,457	0,223	0,851	0,344	13,707	8,33	5,68
16	3,058	0,863	0,070	0,039	0,473	0,227	0,849	0,352	12,141	8,90	4,98
17	2,537	0,514	0,063	0,037	0,367	0,189	0,818	0,320	11,327	6,48	3,65
18	3,300	0,055	0,054	0,027	0,231	0,126	0,789	0,295	11,694	6,23	2,70
19	3,270	0,408	0,060	0,038	0,371	0,193	0,815	0,315	15,002	8,45	4,81
20	3,065	0,278	0,057	0,032	0,295	0,147	0,805	0,334	7,639	6,46	3,83
21	2,868	0,529	0,061	0,033	0,381	0,178	0,841	0,364	15,725	7,65	3,96
22	3,198	0,459	0,057	0,032	0,350	0,169	0,833	0,349	16,033	8,70	4,16
23	3,223	0,549	0,061	0,032	0,374	0,174	0,842	0,365	15,267	8,55	3,91
24	1,735	0,310	0,057	0,029	0,217	0,132	0,762	0,243	10,065	5,16	1,39
25	3,493	0,631	0,066	0,037	0,468	0,229	0,853	0,343	10,728	5,73	2,38
26	2,943	0,922	0,074	0,041	0,475	0,237	0,840	0,334	11,751	9,31	3,95
27	3,064	0,361	0,057	0,031	0,280	0,137	0,798	0,343	16,612	8,55	4,46
28	2,373	0,475	0,063	0,035	0,326	0,176	0,806	0,300	13,202	6,42	4,28
29	2,713	0,580	0,068	0,034	0,369	0,196	0,830	0,306	14,996	7,28	3,15
30	2,398	0,757	0,065	0,034	0,428	0,211	0,852	0,338	20,817	9,74	4,95

*Dados coletados na primeira etapa de campo

Tabela A3 – Parâmetros biofísicos e dados radiométricos da amostras referentes à etapa 3.

ETAPA 3 - OUTUBRO											
PARCELA	IAF	Fator Cos	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	NDVI	NDMI	DAP *	H média*	Rugosidade*
1	2,957	0,502	0,040	0,029	0,217	0,137	0,762	0,227	12,850	7,23	4,40
2	2,900	0,914	0,040	0,031	0,235	0,155	0,768	0,205	11,010	6,81	2,14
3	2,064	0,839	0,042	0,035	0,223	0,163	0,727	0,154	13,202	6,42	4,28
4	2,442	0,741	0,039	0,029	0,220	0,146	0,765	0,204	11,327	6,48	3,65
5	2,926	0,561	0,036	0,029	0,228	0,147	0,775	0,215	13,940	6,02	3,36
6	2,844	0,702	0,038	0,029	0,216	0,142	0,762	0,208	13,433	6,94	3,79
7	3,030	0,682	0,038	0,029	0,216	0,140	0,762	0,215	16,612	8,55	4,46
8	3,242	0,957	0,041	0,030	0,255	0,162	0,789	0,224	13,707	8,33	5,68
9	3,350	0,792	0,038	0,029	0,235	0,159	0,779	0,194	15,002	8,45	4,81
10	2,378	0,922	0,038	0,030	0,239	0,154	0,778	0,218	20,817	9,74	4,95
11	2,572	0,690	0,039	0,032	0,216	0,145	0,743	0,195	12,935	7,10	4,94
12	3,395	0,655	0,039	0,032	0,237	0,151	0,765	0,221	10,712	5,93	3,73
13	3,216	0,780	0,037	0,030	0,219	0,145	0,757	0,205	16,033	8,70	4,16
14	2,783	0,616	0,037	0,029	0,210	0,138	0,755	0,205	7,639	6,46	3,83
15	2,303	0,933	0,043	0,034	0,248	0,169	0,758	0,190	11,751	9,31	3,95
16	2,772	0,988	0,042	0,032	0,254	0,166	0,776	0,208	12,141	8,90	4,98
17	2,410	0,808	0,039	0,030	0,233	0,155	0,769	0,200	10,584	5,95	2,74
18	2,653	0,545	0,037	0,028	0,211	0,140	0,763	0,201	8,403	4,81	3,28
19	3,110	0,973	0,039	0,031	0,246	0,162	0,775	0,205	11,340	6,88	4,36
20	3,212	0,847	0,040	0,031	0,252	0,154	0,780	0,240	15,725	7,65	3,96
21	3,052	0,867	0,040	0,031	0,239	0,151	0,769	0,227	14,426	7,88	3,69
22	3,187	0,867	0,042	0,031	0,249	0,162	0,775	0,211	12,732	6,19	3,32
23	3,113	0,800	0,040	0,031	0,240	0,152	0,774	0,225	15,267	8,55	3,91
24	3,248	0,522	0,042	0,032	0,239	0,154	0,763	0,218	11,694	6,23	2,70
25	2,670	0,647	0,040	0,031	0,213	0,140	0,744	0,206	13,351	7,27	2,94
26	2,302	0,847	0,043	0,033	0,231	0,159	0,751	0,186	14,996	7,28	3,15
27	1,247	0,945	0,045	0,036	0,233	0,169	0,731	0,159	10,632	5,63	1,47
28	3,518	0,922	0,041	0,032	0,261	0,170	0,780	0,212	10,728	5,73	2,38
29	1,527	0,592	0,042	0,033	0,190	0,145	0,703	0,134	10,065	5,16	1,39
30	2,265	0,941	0,040	0,031	0,253	0,169	0,784	0,198	10,879	5,61	2,98

*Dados coletados na primeira etapa de campo

APÊNDICE B – PERFIS TRANVERSAIS DA VEGETAÇÃO

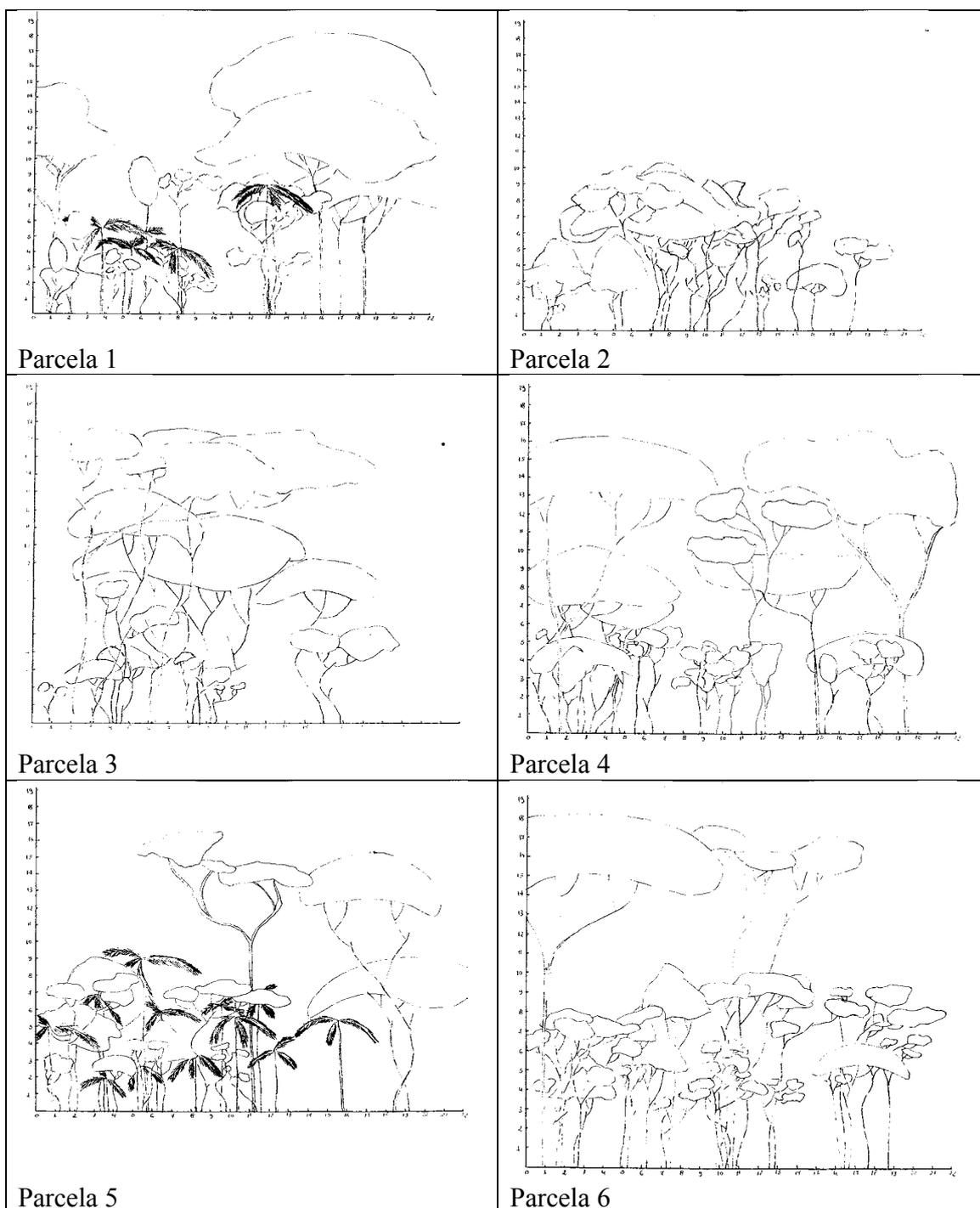
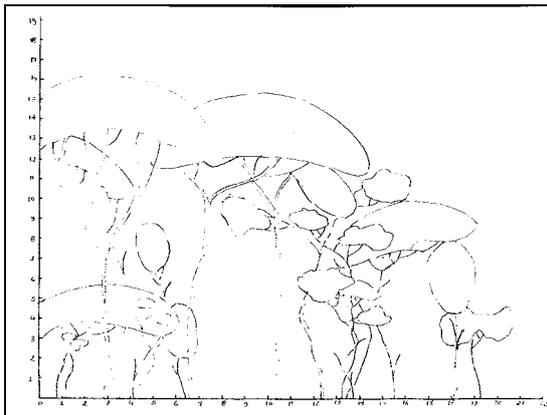
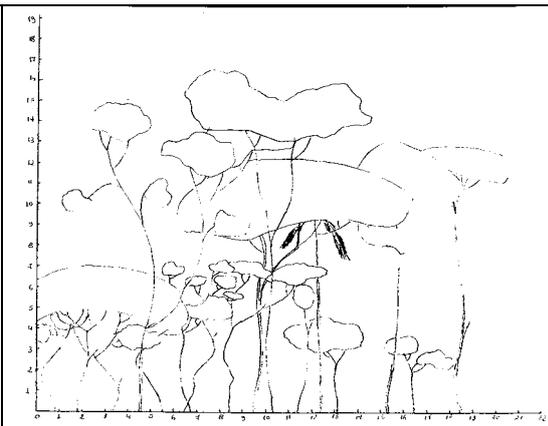


Figura B1 – Perfis esquemáticos transversais referentes à cada parcela do estudo. Os perfis não representam a declividade da parcela. (Continua)



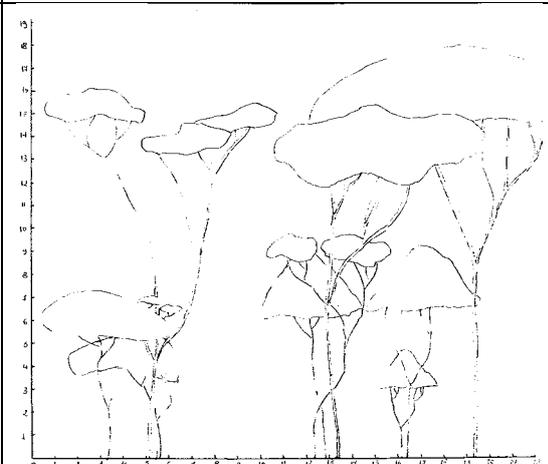
Parcela 7



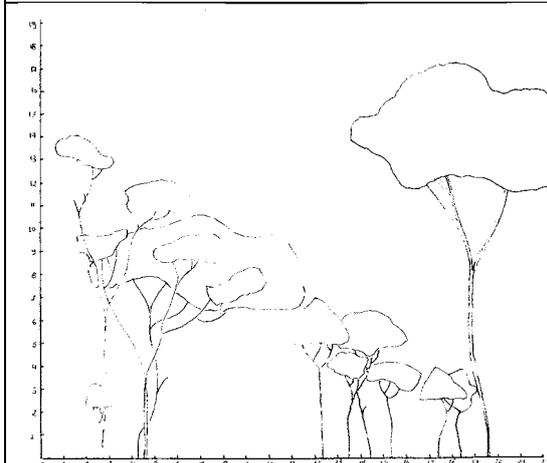
Parcela 8



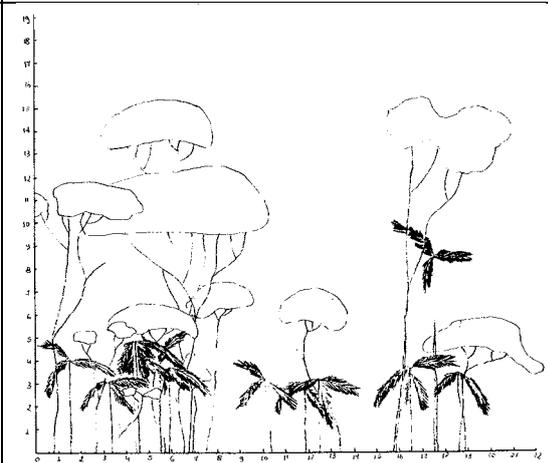
Parcela 9



Parcela 10

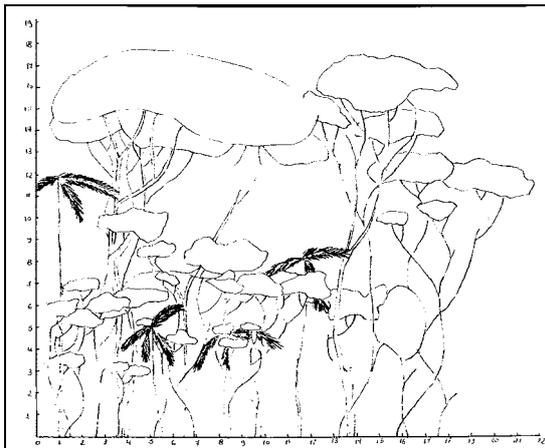


Parcela 11

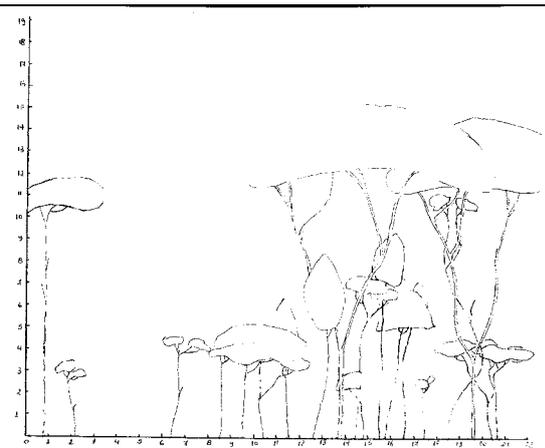


Parcela 12

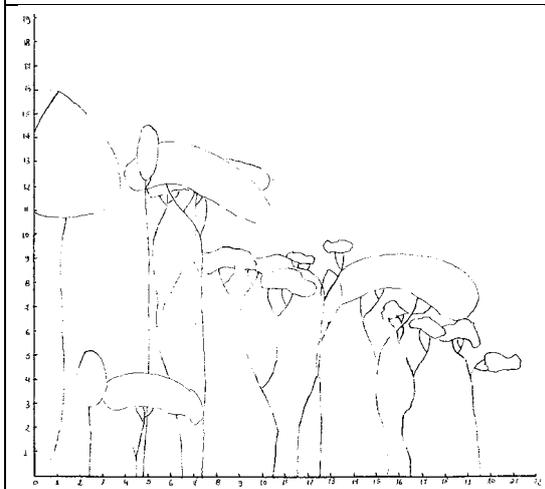
Figura B.1 – Continuação - Continua



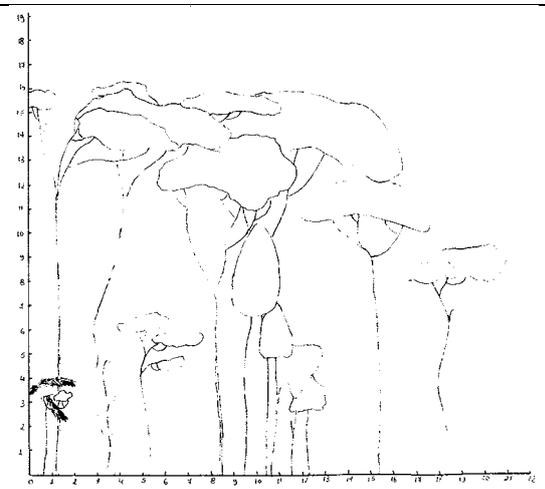
Parcela 13



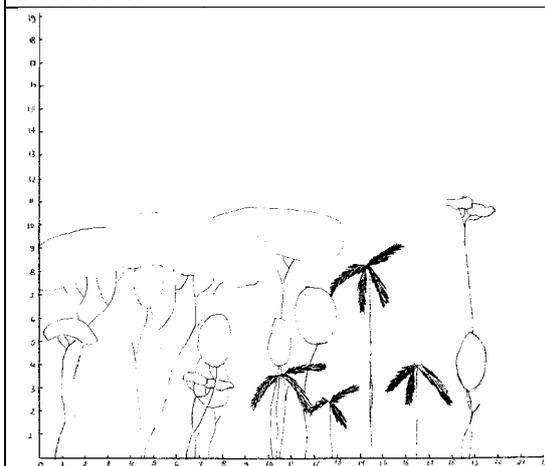
Parcela 14



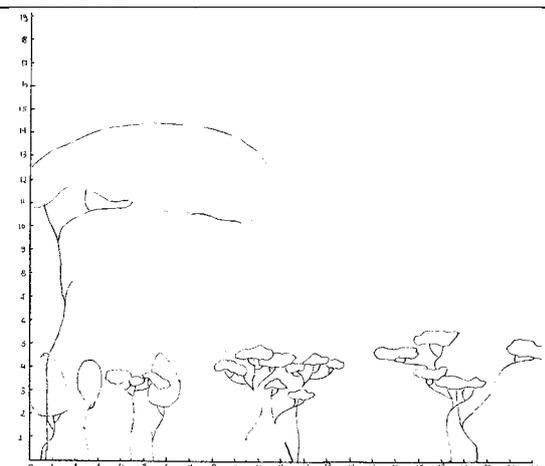
Parcela 15



Parcela 16

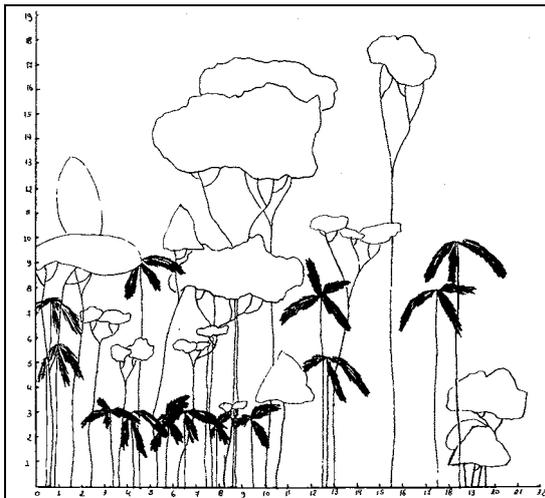


Parcela 17

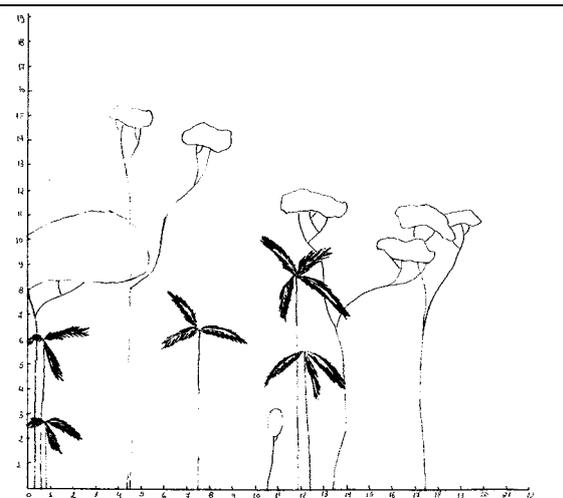


Parcela 18

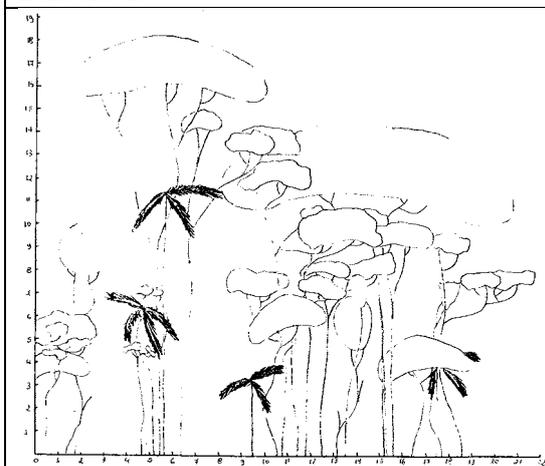
Figura B.1 – Continuação - Continua



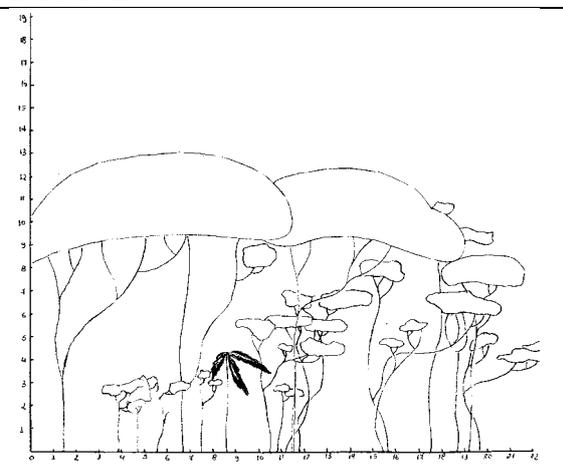
Parcela 19



Parcela 20



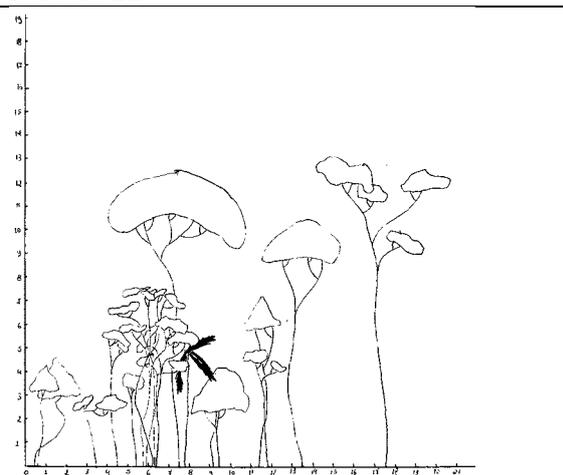
Parcela 21



Parcela 22

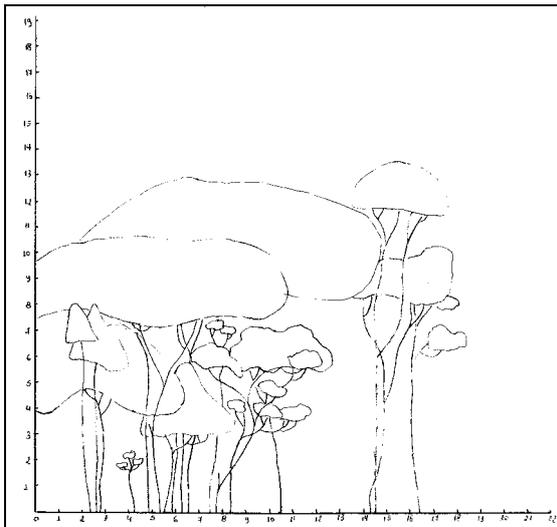


Parcela 23

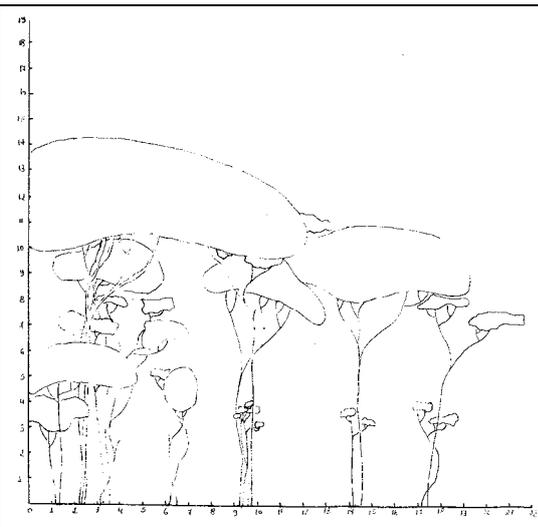


Parcela 24

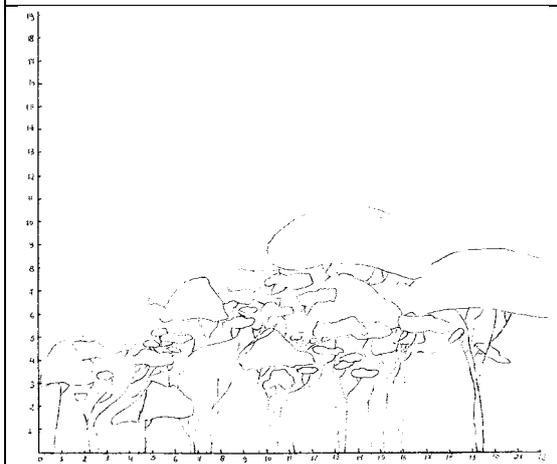
Figura B. 1 – Continuação - Continua



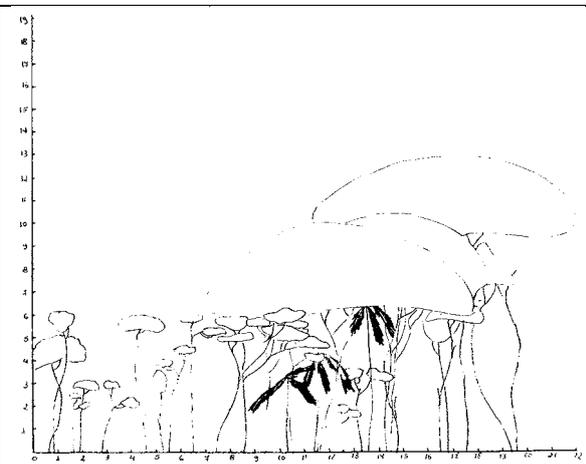
Parcela 25



Parcela 26



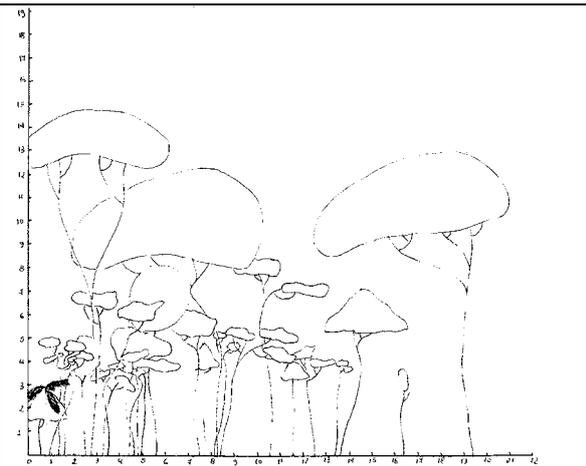
Parcela 27



Parcela 28



Parcela 29



Parcela 30

Figura B.1 – Conclusão

APÊNDICE C – TABELA DE CAMPO (DADOS DENDROMÉTRICOS)

Parcela número:		Lat:	Long:	Data: / /					
Classe de Iluminação:									
Bosque: () denso () médio () aberto									
Árvore nº	posição no talhão		CAP	h total	h fuste	Qualidade fuste	Tipo Copa	Projeção Copa	Posição sociológica
	X (0 a 20m)	Y (0 a 10m)							
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
Posição Sociológica		Qualidade do Fuste		Copa	1 - Globosa	5 -Flabeliforme			
1 Superior		1 Boa			2 - Cônica	6 -Irregular			
2 Média		2 Média			3 -Elíptica	7 -Carimbiforme			
3 Inferior		3 Má			4 -Umbeliforme	8 -Múltipla			